

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

**AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR EM  
ENSAIOS DE FURAÇÃO**

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

FABIANO MOCELLIN

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 2002

AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR  
EM ENSAIOS DE FURAÇÃO

FABIANO MOCELLIN

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FABRICAÇÃO

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

\_\_\_\_\_  
Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.

Orientador

\_\_\_\_\_  
Prof. Júlio César Passos, Dr.

Coordenador

BANCA EXAMINADORA

\_\_\_\_\_  
Prof. Pedro A. N. Bernardini, Dr. Eng.

\_\_\_\_\_  
Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

\_\_\_\_\_  
Prof. Wilson Luiz Guesser, Dr. Eng.

## AGRADECIMENTOS

- Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de realização deste trabalho;
- Ao Prof. Lourival Boehs, pela orientação, colaboração e companheirismo;
- Aos integrantes da Banca Examinadora, pela contribuição e enriquecimento do trabalho;
- À Empresa Tupy Fundições, pela doação de materiais fundidos, ferramentas e material bibliográfico;
- Aos colaboradores da Tupy Fundições, que participaram diretamente do desenvolvimento da pesquisa, em especial ao Eng. Eitan Melleras, M.Eng. e ao Dr. Wilson Guessser;
- Aos colegas e amigos do Laboratório Grucon, em especial ao Eng. Delmonte N. Friedrich, M. Eng. e ao Eng. Fábio Antônio Xavier, pelo apoio e companheirismo;
- Aos membros dos laboratórios LMP, Labmat e Usicon, pela disponibilização de equipamentos e informações;
- À CAPES, pelo apoio financeiro;
- Aos familiares, à namorada, parentes e amigos, pela compreensão e apoio incondicionais.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>SIMBOLOGIA</b> .....	<b>xii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Objetivo .....	3
2.1.1 Objetivo geral.....	3
2.1.2 Objetivos específicos .....	3
2.2 Justificativa .....	3
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
3.1 Ferro fundido vermicular (CGI) .....	5
3.1.1 Obtenção do CGI .....	6
3.2 Processo de furação .....	7
3.2.1 Tipos de ferramentas de furar.....	8
3.2.2 Brocas helicoidais .....	9
3.2.3 Revestimentos de brocas helicoidais.....	13
3.2.4 Parâmetros de corte em furação .....	16
3.3 Critérios de usinabilidade .....	17
3.3.1 Desgaste em brocas .....	17
3.3.2 Tipos e formas de cavaco em furação .....	20
3.3.3 Forças de corte em furação .....	22
3.4 Estado da arte em usinagem de ferros fundidos vermiculares .....	25
3.5 Fatores influentes na usinabilidade de vermiculares .....	26
3.5.1 Efeito da forma da grafita.....	26
3.5.2 Influência da perlita.....	27
3.5.3 Efeito do silício.....	32

3.5.4 Efeito do enxofre.....	34
3.5.5 Efeito das inclusões.....	34
3.5.6 Efeito do titânio e do cromo.....	35
3.6 Mecanismos de desgaste de ferramentas em ferros fundidos vermiculares..	37
3.7 Ferramentas para usinagem de vermiculares.....	39
3.7.1 Torneamento.....	39
3.7.2 Furação.....	40
3.7.3 Fresamento.....	42
3.7.4 Mandrilamento de cilindros.....	43
3.8 Considerações finais.....	47
<b>4 METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....</b>	<b>49</b>
4.1 Metodologia.....	49
4.2 Caracterização dos materiais usinados.....	49
4.2.1 Geometria dos corpos de prova.....	49
4.2.2 Composição química e tempo de desmoldagem.....	50
4.2.3 Análise microestrutural.....	52
4.2.4 Determinação da dureza.....	57
4.2.5 Resistência mecânica.....	59
4.3 Caracterização das brocas.....	59
4.4 Critério de fim de vida utilizado.....	61
4.5 Ensaio de usinagem.....	62
4.5.1 Parâmetros de corte utilizados.....	64
4.5.2 Fixações de peça e ferramenta.....	65
4.5.3 Máquina-ferramenta.....	66
4.6 Medição de forças.....	66
4.7 Medição do desgaste.....	68
4.8 Aquisição de fotos.....	68
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>70</b>
5.1 Resumo das características dos materiais em estudo.....	70
5.2 Resultados dos ensaios de usinabilidade: critério desgaste da ferramenta...	71
5.2.1 Efeito da variação da velocidade de corte.....	72
5.2.2 Repetibilidade dos ensaios de usinagem.....	72

5.2.3 Comparação da usinabilidade dos materiais: critério $VB_{max}$ .....	73
5.3 Resultados da usinabilidade dos materiais: Critério forças de corte .....	79
5.3.1 Correlação entre forças de corte e desgaste da ferramenta .....	79
5.3.2 Resultados das medições de forças de corte .....	80
5.3.3 Determinação da constante e do expoente da Equação de Kienzle .....	86
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>92</b>
6.1 Proposições para novos trabalhos .....	94
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>

## LISTA DE FIGURAS

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 3.1: Micrografia do ferro fundido vermicular. (a) Micrografia óptica atacada com Nital. (b) Forma espacial da grafita compactada. MEV 395x. (ASM, 1996).....	6
Figura 3.2: Partes de uma broca helicoidal (Stemmer, 1992). .....	9
Figura 3.3: Comparação entre uma broca helicoidal e uma ferramenta de torneamento (Stemmer, 1992). .....	9
Figura 3.4: Gumes de uma broca helicoidal (Stemmer, 1992). .....	10
Figura 3.5: Afições especiais de ponta para reduzir a influência do gume transversal: (a) afiação da ponta e (b) afiação cruzada (Stemmer, 1992). .....	11
Figura 3.6: Principais ângulos em brocas helicoidais (Stemmer, 1992). .....	12
Figura 3.7: Revestimentos PVD sobre metal-duro: a)TiAlN monocamada; b) TiAlN multicamada (Prengel et al., 2001). .....	15
Figura 3.8: Revestimento por PVD de TiAlN e WC/C sobre substrato de metal-duro (Derflinger et al., 1999). .....	15
Figura 3.9: Grandezas de corte no processo de furação. .....	17
Figura 3.10: Medição de desgaste de desgastes de flanco (Bork, 1995). .....	18
Figura 3.11: Posição para medição do desgaste em guias (Bork, 1995). .....	18
Figura 3.12: Desgaste de cratera em brocas (Bork, 1995). .....	19
Figura 3.13: Lascamentos no gume principal da broca (Bork, 1995). .....	19
Figura 3.14: Seqüência esquemática de formação de cavacos em ferros fundidos (Cohen et al., 2000). .....	21
Figura 3.15: Forças presentes na furação (Bork, 1995). .....	22
Figura 3.16: Comparação entre usinabilidade do ferro fundido cinzento e vermicular para operações de usinagem em linha de alta velocidade (Reuter et al., 2000)...	25
Figura 3.17: Redução da vida da ferramenta com o aumento da quantidade de Fe <sub>3</sub> C na fase de perlita (Bates, 1996). .....	29
Figura 3.18: Vida da ferramenta em função da razão perlita / ferrita na usinagem de CGI: (a) ferramenta de metal-duro; (b) ferramenta de CBN (Dawson et al., 1999). .....	30

Figura 3.19: Efeito do aumento da proporção de perlita para: (a) e (b) 100%, devido à adição de Mn; (c) e (d) 99%, devido à adição de Sb, na presença de Cu e Sn (Dawson et al., 1999). .....	32
Figura 3.20: Efeito do teor de silício do CGI na vida da ferramenta de torneamento (Dawson et al., 1999). .....	33
Figura 3.21: Vida da ferramenta de torneamento em função do teor de titânio no CGI (Dawson et al., 1999). .....	36
Figura 3.22: Formação de $TiO_2$ por oxidação (Reuter et al., 2000). .....	38
Figura 3.23: (a) Formação de camada protetora de MnS sobre inserto de PCBN ao usinar ferro fundido cinzento; (b) ausência de camada protetora ao usinar CGI ( $v_c = 800$ m/min) (Reuter et al., 2000). .....	38
Figura 3.24: Resultados de testes de torneamento em CGI (com baixa e alta proporção de perlita) e cinzento (Reuter et al., 2000; Gastel et al., 2000). .....	40
Figura 3.25: Geometrias de brocas testadas pela Empresa Kennametal (Borrmann, 2000). .....	41
Figura 3.26: Geometria de brocas testadas em CGI (Upton, 1999). .....	42
Figura 3.27: Momento torçor em ensaios de furação de cinzento e vermicular (Upton, 1999). .....	42
Figura 3.28: Resultados de testes de fresamento em CGI (com baixa e alta proporção de perlita) e cinzento (Reuter et al., 2000). .....	43
Figura 3.29: Desgaste de flanco após 64 cilindros usinados por uma ferramenta com um único inserto (Kress, 2000). .....	44
Figura 3.30: Desgaste de flanco no mandrilamento com duas pastilhas de metal-duro (Kress, 2000). .....	45
Figura 3.31: Ferramentas de mandrilamento com múltiplos insertos, de diferentes empresas. ....	46
Figura 3.32: Ferramenta com insertos rotativos desenvolvida pela empresa Rotary Technologies (Reuter et al., 2000). .....	47

#### **4 METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS**

Figura 4.1: Geometria dos corpos de prova dos materiais usinados. ....	50
Figura 4.2: Micrografias do ferro fundido Vermicular 0 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x. ....	53



Figura 4.3: Micrografias do ferro fundido Cinzento 1 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x. ....	54
Figura 4.4: Micrografias do ferro fundido Cinzento 1 <sub>2</sub> (2º lote) sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x. ....	54
Figura 4.5: Micrografias do ferro fundido Vermicular 2 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x. ....	54
Figura 4.6: Micrografias do ferro fundido Vermicular 3 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x. ....	55
Figura 4.7: Micrografias do ferro fundido Vermicular 3 <sub>2</sub> (2º lote) sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x. ....	55
Figura 4.8: Micrografias do ferro fundido Vermicular 4 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x. ....	55
Figura 4.9: Micrografias do ferro fundido Vermicular 5 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x. ....	56
Figura 4.10: Micrografias do ferro fundido Vermicular 6 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x. ....	56
Figura 4.11: Perlita do Vermicular 3. MEV 5.000x. Nital 2%. ....	58
Figura 4.12: Perlita do Vermicular 4. MEV 5.000x. Nital 2%. ....	58
Figura 4.13: Perlita do Vermicular 5. MEV 5.000x. Nital 2%. ....	58
Figura 4.14: Perlita do Vermicular 6. MEV 5.000x. Nital 2%. ....	58
Figura 4.15: Foto de uma das brocas utilizadas nos ensaios. ....	60
Figura 4.16: Desgaste de flanco em broca utilizada na usinagem do Vermicular 2. ....	61
Figura 4.17: Desgaste de guia em broca utilizada na usinagem do Vermicular 2. ....	61
Figura 4.18: Desgaste de cratera em broca utilizada na usinagem do Vermicular 2. ....	62
Figura 4.19: Ensaios de furação realizados. ....	63
Figura 4.20: Foto do sistema de fixação dos corpos de prova. ....	65
Figura 4.21: Máquina-ferramenta utilizada nos ensaios de furação (a); mesa da máquina (b). ....	66
Figura 4.22: Foto da bancada utilizada na medição de forças. ....	67
Figura 4.23: Forma de medição do desgaste de flanco máximo ( $VB_{max} = A - B$ ). ....	68
Figura 4.24: Sistema utilizado na aquisição de fotos. ....	69

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 5.1: Redução da vida da ferramenta em função do aumento da velocidade de corte (o ponto correspondente a 80 m/min é a média de três ensaios). .....	72
Figura 5.2: Curvas referentes ao Vermicular 2: excelente repetibilidade. ....	73
Figura 5.3: Resultados dos ensaios de usinabilidade dos materiais Cinzento 1 e Vermicular 2. Os valores de vida médio são indicados próximos às curvas. O Cinzento 1 <sub>2</sub> é o segundo lote de ferro fundido cinzento.....	75
Figura 5.4: Quebra da parte posterior das guias da broca 9, na usinagem do Vermicular 3. Guias com 0,47 mm de largura. ....	76
Figura 5.5: Resultados dos ensaios de usinabilidade dos vermiculares 3, 4, 5 e 6... ..	76
Figura 5.6: Comparação da usinabilidade de todos os materiais testados, segundo o critério de fim de vida $VB_{max} = 0,4$ mm.....	78
Figura 5.7: Efeito do aumento do desgaste da broca na força de avanço. ....	80
Figura 5.8: Efeito do aumento do desgaste da broca no momento torçor.....	80
Figura 5.9: Evolução da força de avanço durante a execução dos furos. Cada curva representa a média de três medições. ....	81
Figura 5.10: Representação gráfica das medições de força de avanço nos ensaios de furação – média dos valores médios das curvas. ....	82
Figura 5.11: Evolução do momento torçor durante a execução dos furos. Cada curva representa a média de três medições. ....	83
Figura 5.12: Representação gráfica das medições de momento torçor nos ensaios de furação – média dos valores máximos das curvas.....	84
Figura 5.13: Materiais dispostos por ordem de crescente usinabilidade por ambos os critérios de desgaste e de força de avanço.....	85
Figura 5.14: Correlação entre as vidas das brocas e as forças de avanço medidas. ....	86
Figura 5.15: Equações de reta para determinação das constantes de Kienzle “ $k_{c1.1}$ ” e “ $1-m_c$ ”.....	88
Figura 5.16: Constantes de Kienzle, determinadas empiricamente, para cálculo da força de corte ( $F_c$ ) em furação.....	88
Figura 5.17: Equações de reta para determinação das constantes de Kienzle “ $k_{f1.1}$ ” e “ $1-m_f$ ”.....	89
Figura 5.18: Constantes de Kienzle, determinadas empiricamente, para cálculo da força de avanço ( $F_f$ ) em furação. ....	90

## LISTA DE TABELAS

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas médias do ferro fundido vermicular em relação ao cinzento e ao nodular (SinterCast, 2001).....	6
Tabela 3.2: Efeitos metalúrgicos de distintas proporções de titânio (Dawson et al., 1999).....	36

### 4 METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Tabela 4.1: Composição química dos materiais em estudo (ASM, 1996).....	51
Tabela 4.2: Caracterização dos materiais através de análises de imagens.....	53
Tabela 4.3: Dureza Brinell média das amostras usinadas [HB].....	59
Tabela 4.4: Resistência mecânica dos materiais usinados.....	59
Tabela 4.5: Ensaio preliminares para definição de parâmetros de corte.....	64

### 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 5.1: Síntese das propriedades dos materiais.....	70
Tabela 5.2: Resultado das medições de forças de avanço [N] nos ensaios de furação – valores médios das curvas.....	82
Tabela 5.3: Resultado das medições de momento torçor [N.m] nos ensaios de furação – valores máximos das curvas.....	84
Tabela 5.4: Dados para determinação de " $k_{c1.1}$ " e " $1-m_c$ ".....	87
Tabela 5.5: Dados para determinação de " $k_{f1.1}$ " e " $1-m_f$ ".....	89

## SIMBOLOGIA

$\alpha$	[graus]	ângulo de incidência da broca;
$\delta$	[graus]	ângulo de hélice da broca;
$\sigma$	[graus]	ângulo de ponta da broca;
$\psi$	[graus]	ângulo de direção do gume transversal;
$a_p$	[mm]	profundidade de corte;
$b$	[mm]	largura de usinagem;
$C$	[m/min]	constante da equação de Taylor;
$C_{u_{eq}}$	[%]	teor de elementos formadores de perlita;
$D$	[mm]	diâmetro da broca;
$d$	[mm]	diâmetro do pré-furo da peça;
$f$	[mm]	avanço;
$F$	[N]	força de usinagem resultante;
$F_c$	[N]	força principal de corte;
$F_f$	[N]	força de avanço;
$F_p$	[N]	força passiva;
$H$	[mm]	desgaste de flanco nas guias;
$h$	[mm]	espessura de usinagem;
$K$	[mm]	desgaste de cratera;
$K_b$	[mm]	largura do desgaste de cratera na direção perpendicular ao gume;
$k_{c1.1}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	força específica de corte;
$k_{f1.1}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	força específica de avanço;
$M_t$	[N.m]	momento torçor;
$n$	—	expoente da equação de Taylor;
$N/D$	—	dado não disponível
$P_m$	[mm]	comprimento do lascamento da broca na direção paralela ao gume;
$P_t$	[mm]	largura do lascamento da broca na direção perpendicular ao gume;
$r$	[mm]	distância de uma força de corte pontual resultante, ao centro da broca;

T	[m]	vida da broca;
VB	[mm]	desgaste de flanco;
VB <sub>max</sub>	[mm]	desgaste de flanco máximo;
VB <sub>med</sub>	[mm]	desgaste de flanco médio;
v <sub>c</sub>	[m/min]	velocidade de corte;
1-m <sub>c</sub>	—	expoente da equação de Kienzle.

## RESUMO

O ferro fundido vermicular, também conhecido como *Compacted Graphite Iron* – CGI, nos últimos anos tem se destacado na indústria automobilística mundial. Sua importância está relacionada principalmente à fabricação de blocos e cabeçotes de motores diesel, além de outras peças automotivas. Os motores diesel, que trabalham com elevadas taxas de compressão, necessitam de uma estrutura rígida para suportar os esforços. No entanto, seu rendimento e emissão de poluentes poderiam ser melhorados se picos de pressão de explosão ainda maiores pudessem ser alcançados. A resistência mecânica do ferro fundido cinzento, material atualmente utilizado na fabricação dos motores diesel, não permite atingir pressões maiores, no entanto, possui características particulares e indispensáveis, tais como boa condutividade térmica e amortecimento de vibrações. Paralelamente, o ferro fundido vermicular aparece como um bom substituto para tais aplicações, pois além de possuir propriedades de condutividade e de amortecimento semelhantes ao cinzento, tem propriedades mecânicas superiores, permitindo a fabricação de motores de melhor desempenho e menor peso. A utilização do ferro fundido vermicular apresenta como desvantagem a maior dificuldade para usiná-lo, isto é, pior usinabilidade em relação ao ferro fundido cinzento. Diante deste fato, o presente trabalho tem como objetivo pesquisar a influência dos parâmetros de fabricação deste ferro fundido vermicular em sua usinabilidade. Os parâmetros de fabricação em estudo são o teor de elementos formadores de perlita e o tempo de desmoldagem. Os materiais foram estudados através de ensaios de furação de longa duração, utilizando brocas helicoidais de metal-duro revestidas com TiAlN. A dissertação contempla ainda uma comparação com a usinabilidade do ferro fundido cinzento – FC-250, atualmente utilizado pela Tupy Fundições na fabricação de blocos e cabeçotes de motores diesel.

**Palavras-chave:** Ferro fundido vermicular; usinabilidade; furação.

## ABSTRACT

*Recent years have seen a trend toward the development of Compacted Graphite Iron – CGI – by the worldwide automotive industry. Its significance is closely related to crankcases and heads of diesel engines, beyond other parts. The diesel engine, that usually has the characteristic of a high compression ratio, needs a rigid structure to support the mechanical efforts. However, the engine peak firing pressure limits the objective of increasing engine efficiency at reduced pollutant emission levels. The gray cast iron, which is the material normally used to produce crankcases, has not enough mechanical resistance to allow higher firing pressures, but it has some essential properties such as high thermal conductivity and vibration damping. On the other hand, the incoming material, CGI, combines good properties of gray cast iron with higher tensile strength, fatigue strength and elongation. All these characteristics make the CGI a very strong substitute of the gray cast iron for the production of more efficient and lighter diesel engines. Considering the manufacturing of CGI parts, the main problem to overcome is its poor machinability, when compared to the gray cast iron. The objective of the present work is to investigate the machinability of some CGI alloys produced under different shakeout times and different pearlite former elements content. The drilling process, with TiAlN coated carbide drills, had been employed in the machining tests. The results are also compared to the gray cast iron (FC-250) machinability, which is currently used by Tupy Fundições to produce engine crankshafts and heads.*

**Keywords:** *Compacted graphite iron; machinability; drilling.*

# 1 INTRODUÇÃO

O ferro fundido vermicular, também conhecido como *Compacted Graphite Iron* – CGI, é o mais novo membro da família dos ferros fundidos. Foi inicialmente obtido por acaso durante a fabricação do ferro fundido nodular, devido a erros de composição química. Suas propriedades mecânicas diferenciadas foram reconhecidas em 1965, quando o CGI foi patenteado (ASM, 1996). No entanto, este fato não ampliou consideravelmente sua aplicação industrial. Pesquisas e desenvolvimentos se concentraram mais em materiais como o alumínio, cerâmicos e plásticos, enquanto o ferro fundido vermicular, com boas propriedades de resistência e robustez, não teve a mesma consideração (Dawson e Würtemberg, 1994).

Na década de 90, a Empresa *SinterCast* passou a comercializar a tecnologia e os equipamentos que permitiram o rompimento da principal barreira à difusão do vermicular na indústria: a falta de um processo confiável de controle aplicável a uma produção em larga escala.

Vencida a etapa de fabricação em escala e com qualidade, o vermicular passou a receber um crescente espaço na indústria automobilística, abrindo-se as possibilidades de seu emprego em diversas peças, atualmente fabricadas em cinzento, tais como discos de freio, coletores de escapamento, cabeçotes e, principalmente, blocos de motores diesel (Guesser e Guedes, 1997). Estes motores, que trabalham com elevadas taxas de compressão, necessitam de uma estrutura rígida para suportar os esforços. No entanto, seu rendimento e emissão de poluentes poderiam ser melhorados se picos de pressão de explosão ainda maiores pudessem ser utilizados. Por outro lado, tão desejável quanto melhorar o rendimento do motor é a redução de seu peso, que influencia diretamente no consumo de combustível do veículo. O aumento do rendimento poderia ser alcançado com alterações de projeto ou com a utilização de materiais mais resistentes. Como as alterações de projeto possuem a limitação do peso e do espaço físico, a alteração de material consiste em uma boa solução.

Atualmente, os materiais disponíveis para a fabricação de blocos são o ferro fundido cinzento, ferro fundido vermicular e ligas de alumínio, além de ligas de magnésio e alumínio-compósito, que são menos comuns. Para a escolha do material, são observadas características tais como: peso, resistência mecânica, custo do material, custo de usinagem, considerações ambientais. Nestes critérios, o ferro fundido vermicular é o material que preenche os requisitos de forma mais



satisfatória. Entretanto, mostra-se um dos piores candidatos no quesito custo de usinagem, o que pode limitar sua aplicação (Marquard et al., 1998).

Diante disto, a usinabilidade do ferro fundido vermicular passou a ser investigada intensamente desde 1995. O Instituto PTW<sup>1</sup>, na Alemanha, é o principal centro de pesquisas do assunto na atualidade. Empresas automobilísticas, fabricantes de ferramentas, fundições e outros, têm empreendido esforços, na maioria das vezes em conjunto, no sentido de tornar viável e competitiva a usinagem de blocos de vermicular.

As pesquisas estão divididas em três campos (Dawson et al., 1999): desenvolvimento dos materiais das ferramentas de usinagem; aprimoramento da tecnologia de usinagem; e melhoria da usinabilidade do próprio material, no qual está situada esta dissertação.

A presente pesquisa objetiva estudar a usinabilidade do ferro fundido vermicular, utilizando o processo de furação com brocas helicoidais. É fruto de uma parceria entre o Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC e a Empresa Tupy Fundições Ltda.<sup>2</sup>, a qual forneceu as ferramentas e o material a usinar, além de boa parte do material bibliográfico utilizado.

O trabalho consiste, fundamentalmente, na avaliação da usinabilidade de um material de referência, que é o ferro fundido cinzento atualmente utilizado na fabricação de blocos de motores diesel, e na avaliação da usinabilidade de cinco tipos de ferro fundido vermicular. São objetos do estudo os teores de elementos perlitizantes e o tempo de desmoldagem, isto é, a proporção de perlita no ferro fundido e sua velocidade de resfriamento, a qual pode gerar perlitas com diferentes propriedades.

Inicialmente, são retomados alguns conceitos fundamentais de ferros fundidos e também de usinagem. No capítulo seguinte, é feito um resumo dos fatores que influenciam e explicam o comportamento dos vermiculares na usinagem, bem como um apanhado geral das recentes pesquisas nos diversos processos de usinagem em vermicular. Juntamente com a metodologia, são mostrados os resultados das caracterizações dos materiais em estudo. Como resultados, são apresentadas as curvas de desgaste dos materiais e as medições de forças de usinagem.

---

1. PTW: Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen. Technische Universität Darmstadt.

2. Tupy Fundições Ltda, localizada em Joinville – SC.

## **2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA**

### **2.1 Objetivo**

#### ***2.1.1 Objetivo geral***

Pesquisar a usinabilidade de ferro fundido vermicular, a fim de desenvolver uma liga que possa ser usinada de forma mais econômica, permitindo a sua aplicação industrial em blocos de motores.

#### ***2.1.2 Objetivos específicos***

Avaliar as diferenças existentes entre a usinabilidade do ferro fundido cinzento e o ferro fundido vermicular, com proporções de perlita e tempos de resfriamento semelhantes;

Analisar a influência de parâmetros de fabricação, como o teor de elementos formadores de perlita e tempo de desmoldagem, dos ferros fundidos vermiculares em suas características microestruturais, relacionando-as com a sua usinabilidade.

### **2.2 Justificativa**

O maior impulsionador no desenvolvimento da tecnologia de fabricação de blocos de motor em vermicular é o fator ambiental (Hick e Langmayr, 2000). Este é um reflexo da consciência da sociedade e do crescente interesse pela preservação do meio ambiente, observado principalmente nas últimas duas décadas. Tendo em vista o fato de que os motores dos veículos são responsáveis por mais poluição atmosférica do que qualquer outra atividade humana, a pressão política sobre a indústria automobilística para desenvolver veículos menos poluentes tem se intensificado (Dawson e Würtemberg, 1994). O impacto ambiental dos veículos não se deve somente à emissão de poluentes e ruído, como também à geração de materiais não recicláveis e consumo dos recursos não renováveis. Novos conceitos de propulsão de veículos têm surgido, tais como a utilização de energia solar, elétrica, células de combustível, mas o fato é que praticamente todos os veículos em

operação ainda utilizam motores a combustão interna e o petróleo como fonte de energia.

Uma das soluções para redução do problema ambiental é a utilização de motores mais eficientes. Os motores diesel, submetidos a uma manutenção adequada, apresentam menores níveis de emissão de hidrocarbonetos e monóxido de carbono, além de uma maior eficiência térmica, em relação aos motores à gasolina, em aplicações similares (Würtemberg, 1994).

A utilização do ferro fundido vermicular na fabricação dos blocos de motores diesel, permite um aumento ainda maior da eficiência térmica, acompanhado de uma redução do peso do motor, o qual se reflete no peso estrutural do veículo que deve ser robusto o suficiente para suportá-lo. A utilização do vermicular, portanto, permite a fabricação de veículos que consomem menor quantidade de combustível e que emitem menos poluentes (ASM, 1996).

A Tupy Fundições, empresa brasileira essencialmente exportadora de componentes automotivos, seguindo à tendência mundial de utilização do ferro fundido vermicular, vem desenvolvendo a tecnologia de fabricação de peças com o referido material, uma vez que disso depende sua competitividade. Isso justifica sua parceria estabelecida com a Universidade para realização da presente Dissertação de Mestrado.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A presente revisão bibliográfica compreende, inicialmente, noções a respeito de características e de obtenção dos ferros fundidos vermiculares. Nos dois itens seguintes, 3.2 e 3.3, faz-se uma retomada de alguns conceitos fundamentais de usinagem. Nos demais itens, 3.4 a 3.8, é abordado o estado da arte na usinagem específica de ferros fundidos vermiculares.

#### **3.1 Ferro fundido vermicular (CGI)**

Em algumas aplicações do ferro fundido, como em blocos de motores diesel, coletores de escapamento e outras, é recomendável que o material possua características tais como: elevada resistência mecânica; boa condutividade térmica; tenacidade; ductilidade e capacidade de amortecimento de vibrações.

O ferro fundido cinzento, por possuir grafita na forma lamelar interconectada, garante ao material boa condutividade térmica, já que a grafita é um bom condutor térmico. Entretanto, a grafita disposta dessa forma reduz a resistência mecânica, a ductilidade e também a tenacidade do material, pois provoca descontinuidades na matriz assim como efeitos de entalhe (Marquard et al., 1998).

A grafita na forma de nódulos, preponderante no ferro fundido nodular, não gera descontinuidades acentuadas na matriz, além de gerar menor efeito de concentração de tensões. Isso confere ao material propriedades de resistência mecânica, ductilidade e tenacidade maiores do que no ferro fundido cinzento. No entanto, o ferro fundido nodular perde na característica de condutividade térmica, uma vez que os nódulos de grafita não estão interconectados, assim como perde na propriedade de amortecimento de vibrações, por ser menos descontínuo.

O ferro fundido vermicular (Figura 3.1) possui boas características de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistência a choques térmicos, amortecimento e condutividade térmica. A união de características desejáveis, tanto do ferro fundido cinzento, quanto do nodular, confere ao vermicular uma significativa e crescente importância na aplicação industrial (ASM, 1996; Marquard et al., 1998).

A Tabela 3.1 compara as características fundamentais dos ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular.

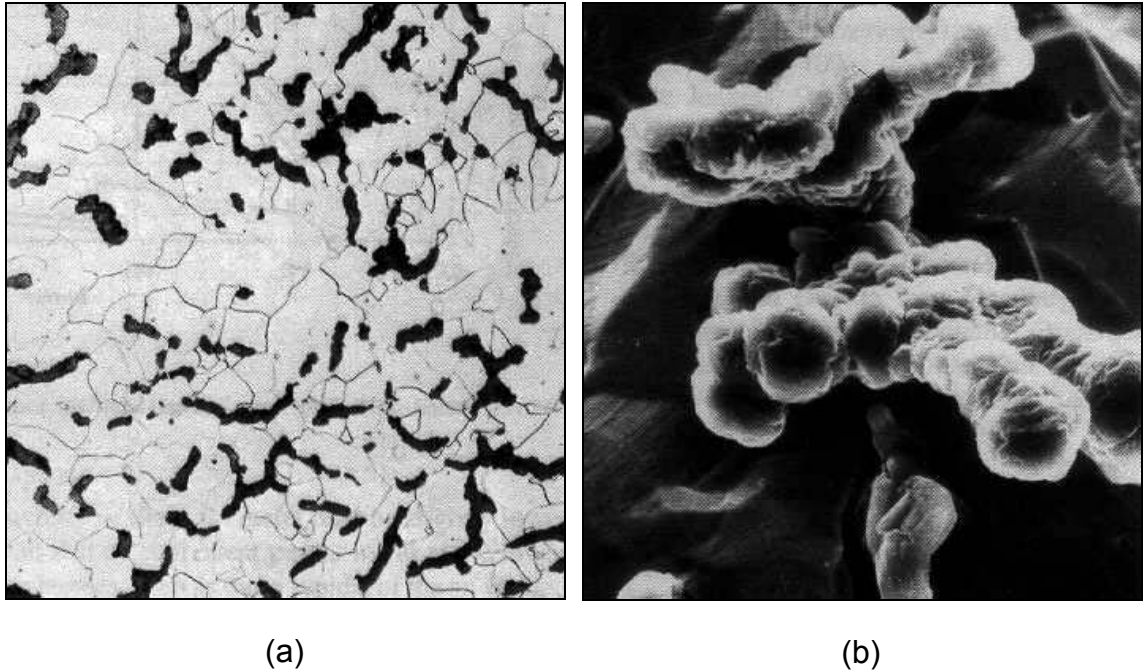


Figura 3.1: Micrografia do ferro fundido vermicular. (a) Micrografia óptica atacada com Nital. (b) Forma espacial da grafita compactada. MEV 395x. (ASM, 1996).

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas médias do ferro fundido vermicular em relação ao cinzento e ao nodular (SinterCast, 2001).

Propriedade	Cinzento (1)	Fator (2)/(1)	Vermicular (2)	Fator (3)/(2)	Nodular (3)
Resist. tração [MPa]	235	2,13	500	1,30	650
Módulo elasticidade [GPa]	110	1,27	140	1,18	165
Resistência fadiga [MPa]	100	2,05	205	1,29	265
Condutividade térmica [W/(mK)]	48	0,73	35	0,80	28
Dureza [HB]	200	1,13	225	1,20	270
Tensão 0,2% alongação	160	2,38	380	1,12	425

### 3.1.1 Obtenção do CGI

O ferro fundido vermicular é obtido por um processo intermediário entre o cinzento e o dúctil, de duas maneiras:

Uma, adicionando à liga elementos nodulizantes como Mg, porém em uma concentração insuficiente para formar ferro fundido nodular, resultando em um material intermediário. A outra, adicionando elementos nodulizantes suficientes para formar o ferro nodular e, ao mesmo tempo, elementos anti-nodulizantes como o Ti.

Pode-se dizer que a segunda alternativa é mais facilmente realizável, pois não exige um controle tão rigoroso da quantidade de magnésio na liga. Porém, implica em uma adição de titânio, o qual tenderá a formar carbonetos e carbonitretos duros, com dimensões da ordem de 5-10  $\mu\text{m}$ , os quais tem um efeito nocivo na usinagem.

A primeira alternativa, por não exigir a adição de titânio, não apresenta o mesmo problema. Porém, esse método exige um método mais criterioso de fabricação, utilizando equipamentos especiais que garantam a composição química adequada (Dawson, 1994; Dowson et al., 1994).

Além dos cuidados com as concentrações de elementos nodulizantes e anti-nodulizantes, são necessários cuidados com teores de elementos como C, S, Si, velocidade de resfriamento, espessura de parede e outros.

Detalhes a respeito da usinagem do ferro fundido vermicular são discutidos nos itens 3.4 a 3.7.

### **3.2 Processo de furação**

A furação é um processo de usinagem que utiliza ferramentas com geometria definida e é intensamente utilizado na produção industrial. Apesar de existirem semelhanças entre o processo de furação e o processo de torneamento, a furação possui algumas peculiaridades, tais como (Bork, 1995):

- A velocidade de corte varia de um máximo na periferia até zero no centro da ferramenta, variando esforços e mecanismos de formação do cavaco ao longo dos gumes;
- Difícil transporte de cavacos;
- As quinas da broca são susceptíveis ao desgaste;
- Atrito pronunciado entre as guias e a parede do furo.

### **3.2.1 Tipos de ferramentas de furar**

**Brocas helicoidais:** são as ferramentas mais utilizadas na execução de furos. Possuem geralmente dois gumes principais, que podem ser analisados de forma análoga a uma ferramenta simples de torneamento. Os dois gumes principais são ligados pelo gume transversal (Stemmer, 1992). Alguns tipos de brocas destinadas à usinagem de ligas de alumínio possuem três gumes cortantes, a fim de melhorar a autocentragem, melhorar o fluxo de cavacos e reduzir forças de corte e avanço (Titex, 2000). A terminologia e peculiaridades das brocas helicoidais serão comentadas no item 3.2.2.

**Brocas chatas:** são as ferramentas de furação mais antigas. Utilizáveis em furos de pequenas profundidades em materiais frágeis como ferro fundido cinzento, bronze e latão. Suportam pequenos momentos torçores (Stemmer, 1992).

**Brocas escalonadas:** Possuem dois ou mais diâmetros retificados. São utilizadas freqüentemente na produção em massa para a execução de furos com dois ou mais diâmetros ou para operações combinadas de furação, alargamento e chanframento (Stemmer, 1992).

**Brocas com canais de refrigeração:** Utilizadas em furos mais profundos. O fluido de corte chega até a extremidade da broca, lubrificando-a e refrigerando-a, e volta através dos canais, arrastando o cavaco. Para a utilização deste tipo de brocas, é necessário que a máquina-ferramenta possua um dispositivo especial para a adução do fluido através da broca (Stemmer, 1992).

**Brocas helicoidais com pastilhas de metal-duro:** Aplicáveis na usinagem de materiais muito abrasivos, tais como concreto. Permite velocidades duas a três vezes maiores do que as para aço rápido e avanço duas a três vezes menores, afim de evitar forças excessivas de corte (Stemmer, 1992).

**Brocas de centro:** Utilizadas para marcar o centro de furos, principalmente em peças a serem fixadas entre pontas (Stemmer, 1992).

**Brocas canhão:** São brocas utilizadas em furações profundas (10 a 100 diâmetros). Consistem de um corpo tenaz, com uma canaleta em V, e um inserto de metal-duro (Stemmer, 1992).

**Brocas de canais retos:** Assemelham-se a brocas helicoidais destorcidas. Possuem canais para refrigeração interna e podem ser utilizadas em profundidades

maiores do que as brocas helicoidais. Permitem altas velocidades de corte. Empregadas principalmente na usinagem de ferro fundido e alumínio (Titex, 2000).

### 3.2.2 Brocas helicoidais

#### a) Caracterização de uma broca helicoidal

A nomenclatura das partes constituintes de brocas helicoidais é definida pela norma NBR 6176 (DIN 1412). Podem existir algumas variações geométricas, tais como ausência de rebaixo, haste cilíndrica ao invés de cônica, existência de canais para refrigeração interna e algumas outras. A terminologia básica está mostrada na Figura 3.2.

Fazendo-se uma analogia entre uma broca e uma ferramenta simples de torneamento (Figura 3.3), observam-se elementos como flancos, faces e gumes principais (Figura 3.4).

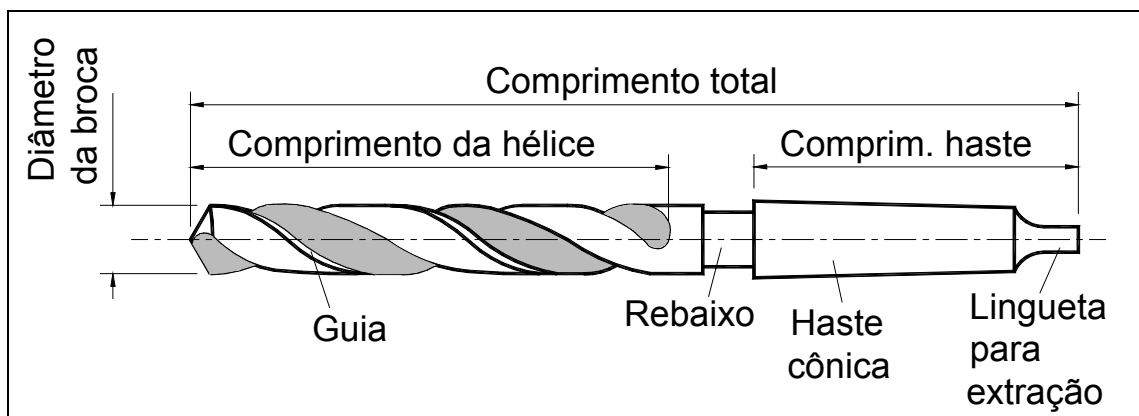


Figura 3.2: Partes de uma broca helicoidal (Stemmer, 1992).

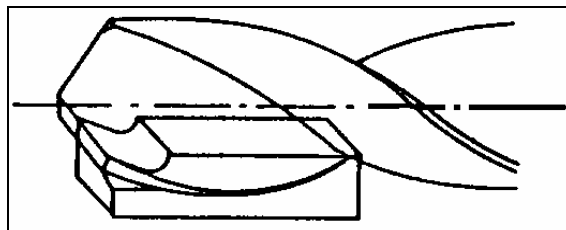


Figura 3.3: Comparação entre uma broca helicoidal e uma ferramenta de torneamento (Stemmer, 1992).



O gume transversal, que liga os dois gumes principais de corte, caracteriza-se por dificultar o processo de corte, pois além da velocidade muito baixa, possui um ângulo de saída negativo. Participa de cerca de 10% do momento torçor e de 30 a 65% da força de avanço.

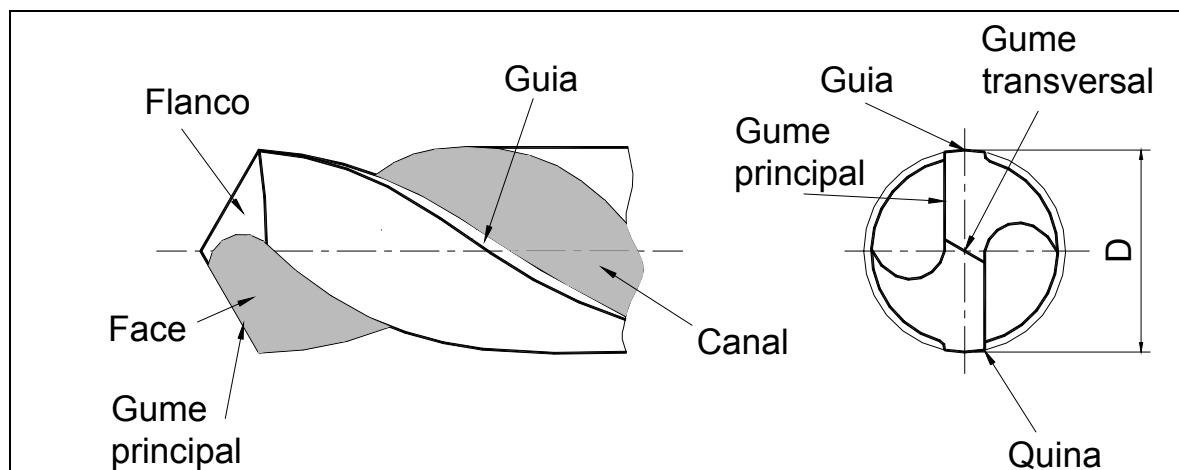


Figura 3.4: Gumes de uma broca helicoidal (Stemmer, 1992).

Visando minimizar esta indesejável influência do gume transversal, podem ser realizadas afiações especiais de ponta, as quais reduzem o seu comprimento e sua ação. Como exemplo, pode-se citar:

- Redução do gume transversal: consiste em uma sutil retificação em ambas as extremidades do gume transversal, reduzindo seu comprimento, conforme Figura 3.5(a).
- Afição cruzada: consiste na retificação de um plano inclinado nas superfícies de incidência (flancos), eliminando total ou parcialmente o gume transversal, ver Figura 3.5(b). Essa afiação forma dois novos gumes principais que têm um efeito centrante na broca. É, portanto, útil em furos de maiores profundidades. Ambas as afiações mostradas estão presentes nas brocas utilizadas no presente trabalho).

#### *b) Principais ângulos das brocas helicoidais*

As brocas helicoidais, assim como qualquer ferramenta de usinagem, têm seu desempenho fortemente afetado por sua geometria. Além de características como o

diâmetro e o comprimento, as brocas são definidas por vários ângulos. Os principais destes são comentados a seguir e podem ser observados na Figura 3.6.

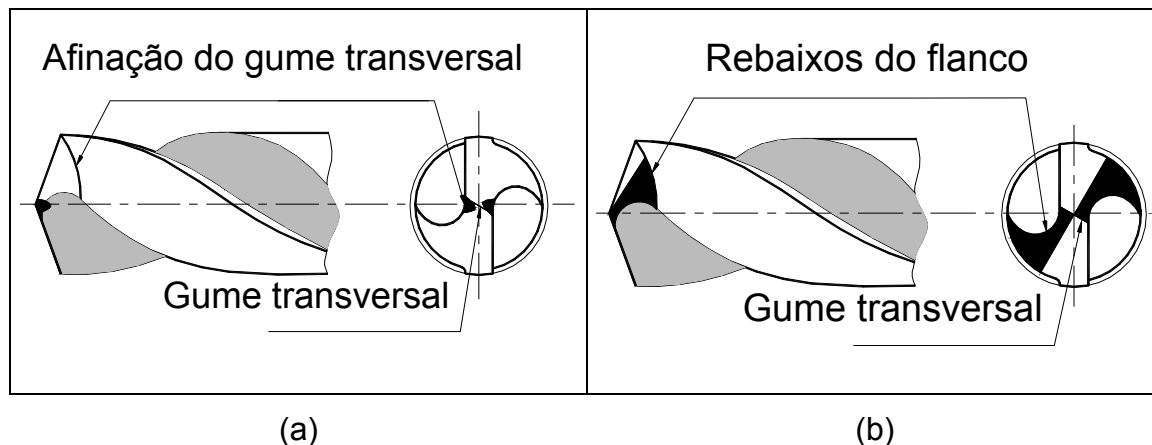


Figura 3.5: Afiações especiais de ponta para reduzir a influência do gume transversal: (a) afiação da ponta e (b) afiação cruzada (Stemmer, 1992).

Ângulo de ponta ( $\sigma$ ): é o ângulo formado pelos dois gumes principais, no plano que contém o eixo principal da broca. O aumento ou redução do ângulo de ponta pode gerar gumes côncavos ou convexos, respectivamente. Para ferramentas com canais e ângulos de hélice usuais, o ângulo de ponta de  $118^\circ$  gera gumes retos. Ângulos maiores do que  $118^\circ$  geram gumes côncavos, cujas pontas podem ter a tendência de quebrar. Ângulos menores do que  $118^\circ$  geram gumes convexos, o que pode gerar vibrações durante a usinagem (Stemmer, 1992).

Ângulo de incidência ( $\alpha$ ): é gerado pelo rebaixamento do flanco principal. Usualmente encontra-se entre 12 e 15 graus. O aumento do ângulo de incidência evita o esmagamento de material pelo flanco da broca, reduzindo a força de avanço. Por outro lado, reduz a resistência do gume (Teixeira, 1995).

Ângulo de hélice ( $\delta$ ): é o ângulo da helicóide dos canais da broca. Classificam-se três tipos de brocas quanto ao ângulo de hélice: Tipo N (materiais usuais como o aço); tipo H (para materiais duros e frágeis); e tipo W (para materiais moles) (Stemmer, 1992).

Ângulo do gume transversal ( $\psi$ ): é o menor ângulo formado entre os gumes principais e o gume transversal. Este ângulo é determinado pelo ângulo de incidência (Stemmer, 1992).

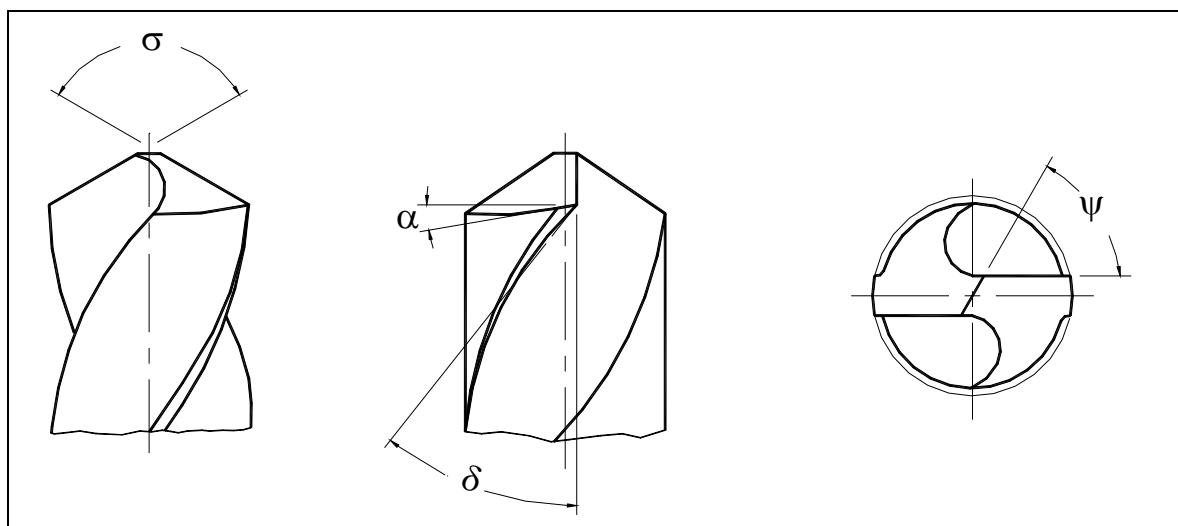


Figura 3.6: Principais ângulos em brocas helicoidais (Stemmer, 1992).

### c) Materiais para brocas helicoidais

Os materiais para brocas helicoidais, assim como a maioria dos materiais para ferramentas, devem atender a características como resistência mecânica, alta dureza, resistência a quente e tenacidade. No caso de brocas, por possuírem uma geometria relativamente complexa, exige-se do material uma facilidade de fabricação.

Atualmente, brocas helicoidais são produzidas principalmente a partir de dois materiais: o aço rápido e o metal-duro.

A adição de elementos de liga como cromo, tungstênio, cobalto e outros confere ao aço rápido boas propriedades a um custo relativamente baixo, o que o torna um material amplamente utilizado neste tipo de ferramentas.

O metal-duro permite alcançar maiores níveis de dureza, resistência ao desgaste e resistência a quente, mantendo a tenacidade em níveis perfeitamente aceitáveis. Esta superioridade das brocas de metal-duro em relação às de aço rápido implica em custos bem mais elevados. Para a utilização econômica de brocas de metal-duro faz-se necessária a utilização de máquinas-ferramenta que permitam alcançar os níveis de velocidade, potência e rigidez exigidos por estas ferramentas.

### **3.2.3 Revestimentos de brocas helicoidais**

A utilização de revestimentos normalmente mostra resultados expressivos de redução de desgaste e aumento de produtividade das ferramentas de usinagem. Inicialmente, os revestimentos, de elevada dureza, tendem a diminuir o desgaste abrasivo. Entretanto sua ação é mais ampla: a redução do coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta revestida tende a diminuir o calor gerado no flanco e na face da ferramenta, e também o fator de recalque do cavaco. Essa redução da geração de calor, aliada à baixa condutividade térmica do revestimento, diminui a solitação térmica da ferramenta, aumentando seu rendimento e produtividade (Bork, 1995).

#### *a) Processos de revestimento*

Os processos industriais mais comuns para revestimento de ferramentas de usinagem são os processos CVD (chemical vapour deposition) e PVD (physical vapour deposition).

O processo CVD é normalmente realizado em temperaturas que variam entre 900 e 1.100°C. A elevada temperatura do processo muitas vezes inibe o revestimento de materiais mais susceptíveis a altas temperaturas, como o aço rápido. Já para o metal-duro, o processo é perfeitamente adequado e permite uma boa difusão entre o revestimento e o substrato (Bork, 1995).

O processo PVD, que opera em temperaturas de aproximadamente 400 e 600°C, vem agregando novas tecnologias e conquistando mais espaço no mercado nos últimos anos. Além de ser mais adequado ao aço rápido, também é perfeitamente aplicável ao metal-duro (Prengel et al., 2001).

#### *b) Tipos de revestimento*

Existem vários tipos revestimentos de ferramentas atualmente empregados industrialmente. Como exemplo, podem-se citar: TiC, TiN, TiCN, TiAlN, TiAlN revestido por WC/C, TiAlN multicamadas. Esses revestimentos possuem características distintas de cor, dureza, espessura, aplicabilidade e desempenho.

As características principais dos revestimentos acima são:

- Carboneto de titânio (TiC): a característica mais marcante do TiC em relação ao TiN é a dureza mais elevada, o que lhe confere uma maior resistência à abrasão. Possui um baixo coeficiente de dilatação térmica, característica importante em processos como o fresamento (König, 1997).
- Nitreto de titânio (TiN): é quimicamente mais estável que o TiC, isto é, possui menor tendência de difusão em aços. Porém é mais susceptível ao desgaste abrasivo. Sua dureza é de 2.300 HV 0,05. É um dos revestimentos mais utilizados. Sua utilização é recomendada para materiais mais dúcteis, tais como aços de baixo carbono e alumínio, sob baixas forças de corte (Bork, 1995; Balzers, 2000).
- Carbonitreto de titânio (TiCN): é derivado do TiN, onde parte dos átomos de N são substituídos por C durante a deposição. Possui uma elevada dureza (3.000 HV 0,05). Aplicável em situações de forças de corte médias a baixas, em materiais como ferros fundidos, aços de médio C, ligas Al-Si (Balzers, 2001).
- Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN): este revestimento também é derivado do TiN. Durante o processo de deposição, parte dos átomos de Ti é substituída por átomos de Al. Os átomos de alumínio são retidos no material (revestimento) na forma de solução sólida, causando endurecimento. O aumento de dureza (3.500 HV 0,05) proporciona maior resistência ao desgaste. A substituição dos átomos pode significar, também, melhora de resistência à oxidação e estabilidade química, dependendo da aplicação. Uma proporção de átomos típica é de  $Ti_{0,6}Al_{0,4}N$  (Derflinger et al., 1999).
- Os revestimentos a base de TiAlN têm se sobressaído principalmente em usinagem a seco, mas também é aplicável com fluidos de corte. A Figura 3.7(a) ilustra este tipo de revestimento.
- Nitreto de Titânio-Alumínio multicamadas (TiAlN): dureza de 3.000 HV 0,05. As camadas são formadas por diferentes proporções alternadas de Ti e Al, conforme Figura 3.7(b). Em ensaios de fresamento de ferros fundidos cinzentos e nodulares, com e sem fluido de corte, foram realizados testes comparativos dos revestimentos TiAlN monocamada e multicamada. O revestimento monocamada mostrou-se mais vantajoso no processo com fluido de corte, enquanto o revestimento multicamada destacou-se nos

ensaios realizados a seco. Ambos os revestimentos tiveram uma vida maior na usinagem a seco do que com fluido de corte (Prengel et al., 2001).

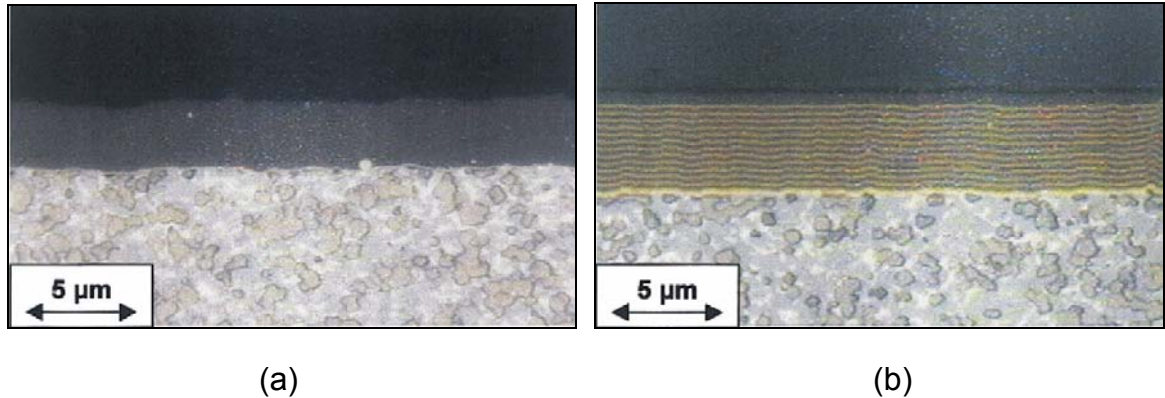


Figura 3.7: Revestimentos PVD sobre metal-duro: a) TiAlN monocamada; b) TiAlN multicamada (Prengel et al., 2001).

- Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN) revestido por WC/C: na tentativa de minimizar ou eliminar a utilização de fluidos de corte na usinagem surge a opção de aplicar uma camada lubrificante, WC/C, sobre o revestimento TiAlN, conforme Figura 3.8. Apesar de possuir uma dureza inferior (1.000 HV 0,05), a redução do coeficiente de atrito de 0,4 para 0,2 do revestimento garante sua aplicação principalmente em processos de furação e rosqueamento, especialmente em ligas de titânio (Derflinger e al., 1999; Balzers, 2000).

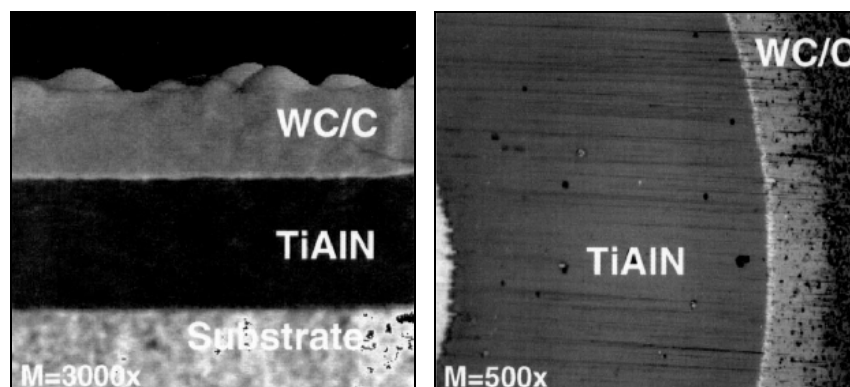


Figura 3.8: Revestimento por PVD de TiAlN e WC/C sobre substrato de metal-duro (Derflinger et al., 1999).

### 3.2.4 Parâmetros de corte em furação

Os parâmetros de corte são as grandezas que definem a maneira com que o processo se realiza:

*Velocidade de corte ( $v_c$ ):* é determinada em função dos materiais da peça e da broca e em função da produtividade desejada. Considera-se como velocidade de corte nominal aquela que ocorre no diâmetro externo da broca. É normalmente dada em m/min.

*Avanço ( $f$ ):* é a velocidade de translação da broca no sentido axial. O avanço é normalmente dado em mm ou em mm/min. É limitado pela resistência mecânica da broca, a qual pode flambar.

Existem, também, algumas outras grandezas relevantes, tais como:

- *Espessura de usinagem ( $h$ ):* é proporcional ao avanço e é medida perpendicularmente ao gume (Figura 3.9).

$$h = \frac{f}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{\sigma}{2}\right) \quad (3.1)$$

onde:

$\sigma$  = ângulo de ponta da broca.

- *Profundidade de corte ( $a_p$ ):* equivalente à metade do diâmetro da ferramenta (Figura 3.9).

- *Largura de usinagem ( $b$ ):* correspondente ao comprimento de cada gume principal para o caso de furação em cheio (Figura 3.9).

$$b = \frac{D}{2 \cdot \text{sen}\left(\frac{\sigma}{2}\right)} \quad (3.2)$$

onde:

$D$  = diâmetro da broca.

- *Profundidade do furo:* Profundidade de penetração da broca, desconsiderando-se a ponta, ou seja, profundidade de penetração das guias.

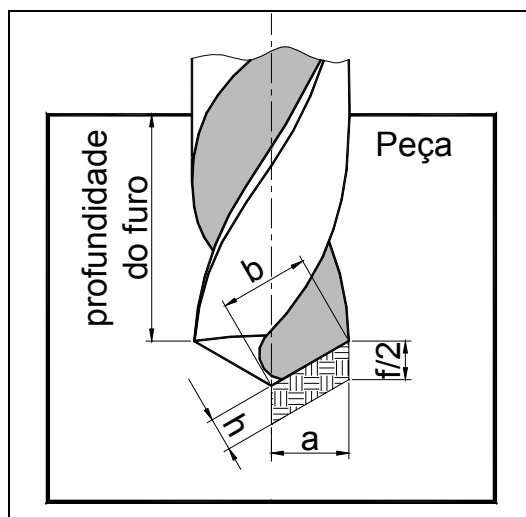


Figura 3.9: Grandezas de corte no processo de furação.

### 3.3 Critérios de usinabilidade

A usinabilidade pode ser entendida como a quantificação da dificuldade para usinar um certo material. Contudo, não é função do material, e sim de um conjunto de fatores mais abrangente. Além do material da peça, existe a influência do tipo de processo, parâmetros utilizados, critério de usinabilidade utilizado e outros. Definindo-se o critério de usinabilidade a ser utilizado e mantendo-se constantes as demais variáveis, a usinabilidade passa a ser função exclusiva do material, permitindo comparações entre materiais distintos (Schroeter, 1998).

#### 3.3.1 Desgaste em brocas

A vida da ferramenta é um dos principais critérios de usinabilidade. O fim de vida pode ser identificado por uma alteração da qualidade superficial, aumento de força de corte, aumento de ruído e outros.

No presente trabalho, optou-se por identificar o fim de vida da ferramenta através da medição do desgaste nas quinas da ferramenta. O desgaste em brocas também se manifesta nos flancos, nas guias, no gume transversal e na superfície de saída. No entanto, em função dos materiais, geometria e condições de corte, em alguns locais o desgaste é mais expressivo do que em outros.

A seguir são mostrados os principais tipos de desgastes e avarias que ocorrem em brocas.



a) *Desgaste de flanco (VB)*

O desgaste de flanco ocorre ao longo dos gumes da broca, de maneira semelhante às ferramentas de tornear. Na Figura 3.10 observa-se a medição da largura média de desgaste,  $VB_{med}$ , e da largura máxima,  $VB_{max}$ . A largura do desgaste da broca é o resultado da média entre os dois gumes. As medições de VB devem ter como referência o gume da broca enquanto nova. Porém, no decorrer da usinagem, o gume desgastado passa a não ser uma referência válida. Passam a ser utilizados outros artifícios, tais como marcas no segundo flanco secundário, ou o próprio final da guia. Também podem ser utilizados recursos gráficos de medição, nos casos em que o desgaste fique evidenciado em imagens.

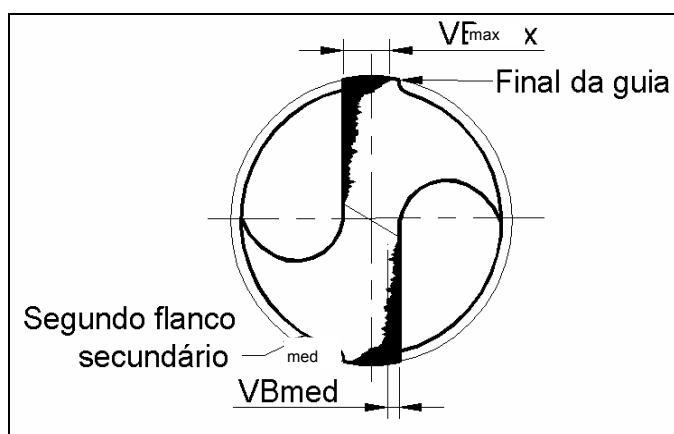


Figura 3.10: Medição de desgastes de desgastes de flanco (Bork, 1995).

b) *Desgaste das guias (H)*

O desgaste das guias é medido a partir da quina da broca, conforme Figura 3.11.

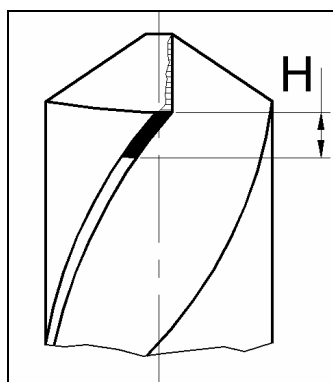


Figura 3.11: Posição para medição do desgaste em guias (Bork, 1995).

*c) Desgaste de cratera (K)*

O desgaste de cratera, localizado nas faces da broca, é caracterizado pela distância  $K_b$ , medida entre a posição original do gume e a borda da cratera mais distante, conforme Figura 3.12.

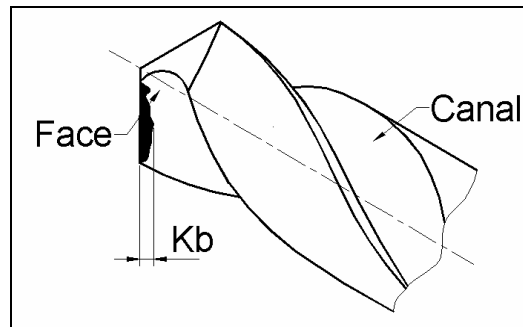


Figura 3.12: Desgaste de cratera em brocas (Bork, 1995).

*d) Lascamento dos gumes*

Pequenos lascamentos podem ocorrer nos gumes das brocas, durante a usinagem. Os lascamentos são caracterizados pelas dimensões  $P_t$  e  $P_m$ , conforme Figura 3.13 (Bork, 1995).

Além dos desgastes acima mencionados, a broca pode falhar por um colapso total, onde a ponta da broca é destruída. Neste caso, alterações devem ocasionar sensíveis diferenças de ruído (Bork, 1995).

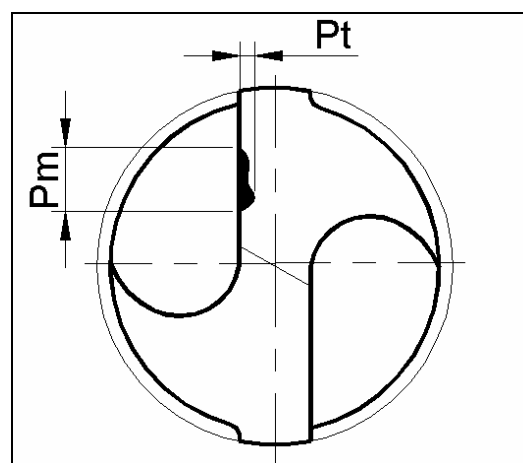


Figura 3.13: Lascamentos no gume principal da broca (Bork, 1995).

### **3.3.2 Tipos e formas de cavaco em furação**

Nos processos de usinagem, cavacos inadequados podem ser bastante prejudiciais. Particularmente no processo de furação, pode ocorrer obstrução dos canais da broca, por onde devem escoar os cavacos, gerando um calor excessivo, dificuldades de passar o fluido, podendo ocorrer a destruição ou cegamento da ferramenta. Cavacos longos, que se enrolam na ferramenta, também são indesejáveis. As características mecânicas do material usinado, tais como a ductilidade, são decisivas na formação do cavaco, assim como a geometria da ferramenta. A seguir são citados os tipos e formas de cavaco usuais em furação (Bork, 1995).

#### *a) Tipos de cavacos*

Nos processo de usinagem identificam-se os cavacos do tipo contínuo, cisalhado e arrancado:

- Cavaco contínuo: o cavaco escoar sobre a ferramenta, sem se romper no plano de cisalhamento. É formado na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, com pequenos e médios avanços e velocidades altas;
- Cavaco cisalhado: ao escoar sobre a ferramenta, ocorre a fissura do material no plano de cisalhamento, porém, as partes permanecem unidas. Ocorre preferencialmente com grandes avanços, e velocidades de corte e ângulos de saída pequenos;
- Cavaco arrancado: fragmentos da peça são arrancados. Ocorrem em materiais frágeis ou de estrutura heterogênea (Bork, 1995).

#### *b) Formas dos cavacos*

No processo de furação, o cavaco normalmente assume as seguintes formas:

- Cavaco helicoidal cônico (longo ou curto);
- Cavaco helicoidal (ou fita retorcida);
- Cavaco em vírgula;
- Cavaco em lascas e pedaços (Bork, 1995).

### c) Formação do cavaco em ferros fundidos

A formação de cavacos dos ferros fundidos é diretamente afetada pela grafita, que possui pouca resistência mecânica e gera descontinuidades na matriz, auxiliando o processo de remoção de material. A Figura 3.14 ilustra o mecanismo de formação de cavacos em ferros fundidos cinzentos e nodulares. Inicialmente a ferramenta comprime o material abaixo do flanco criando uma frente de fratura que se propaga à frente do gume (a). Com o movimento de corte da ferramenta o fragmento de material é removido completamente (b). Em alguns casos, especialmente em ferros cinzentos, uma porção de material é arrancada a frente da ferramenta, a qual segue por um certo tempo sem contato com a peça até encontrar o próximo cavaco (c). O arrancamento de material contribui no aumento da rugosidade (d). Nos ferros fundidos nodulares existe uma maior deformação plástica e menos arrancamento de material (Cohen et al., 2000). A formação de cavacos do CGI é intermediária entre o nodular e o cinzento (Reuter et al., 1999).

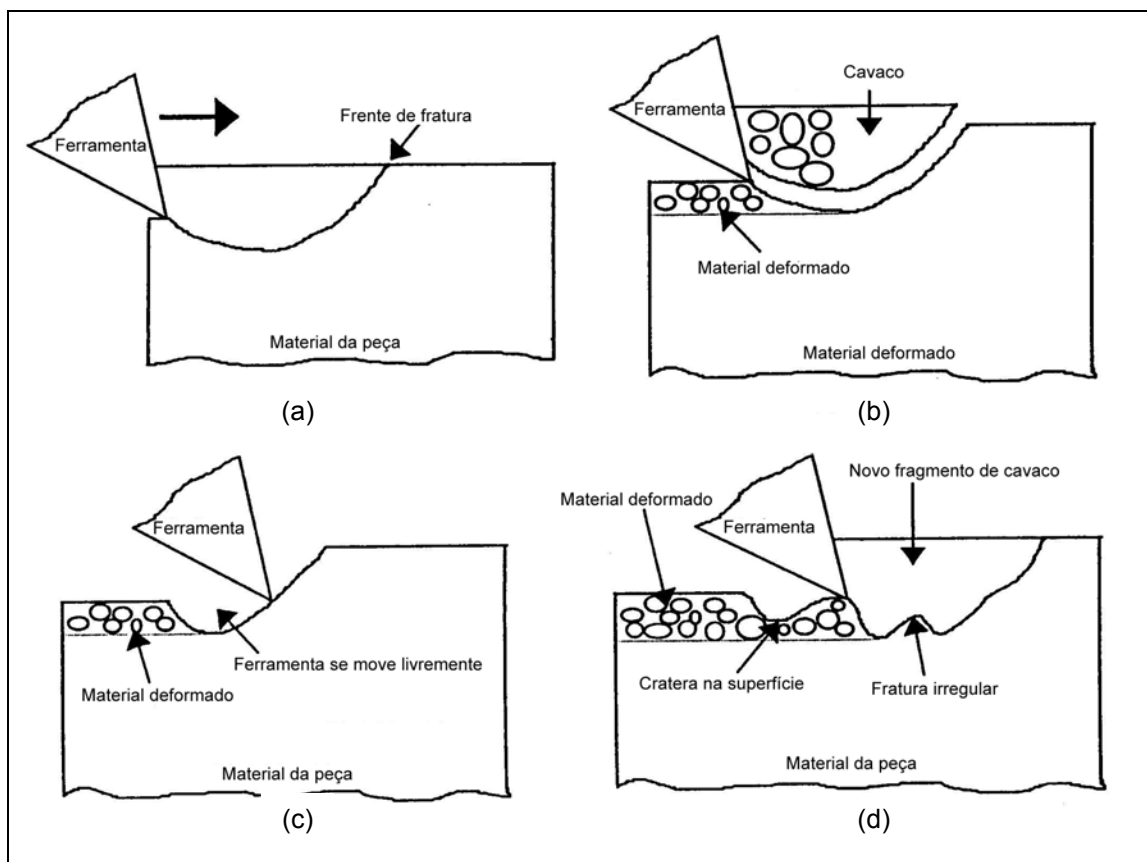


Figura 3.14: Seqüência esquemática de formação de cavacos em ferros fundidos (Cohen et al., 2000).

### 3.3.3 Forças de corte em furação

As forças de corte nos processos de furação são importantes para a determinação das condições ótimas de corte; na avaliação das solicitações sobre a máquina-ferramenta; na verificação de fenômenos que ocorrem na região de formação do cavaco; como critério de usinabilidade de um material, entre outros. Em furação, a força de usinagem resultante ( $F$ ), atuante em cada um dos gumes da ferramenta, pode ser decomposta em: força principal de corte ( $F_c$ ); força de avanço ( $F_f$ ); e força passiva ( $F_p$ ), conforme a Figura 3.15. Qualquer ponto selecionado dos gumes da broca possui uma trajetória circular, se a velocidade de avanço for considerada desprezível em relação à velocidade de corte. A força passiva é perpendicular a esta trajetória e a força principal de corte é tangencial. A força de avanço possui a mesma direção do eixo da broca.

As forças passivas  $F_{p1}$  e  $F_{p2}$  possuem mesma direção e sentidos opostos. Considerando que a broca seja simétrica, sem erros de afiação e que o material seja homogêneo, a resultante das forças passivas é nula. O somatório de  $F_{f1}$  e  $F_{f2}$  equivale à força de avanço, a qual pode ser medida durante o processo. Já as forças de corte  $F_{c1}$  e  $F_{c2}$  não são medidas diretamente. As forças principais de corte são calculadas a partir da medição do momento torçor ( $M_t$ ) da broca. Estima-se que a força principal de corte, distribuída ao longo do gume principal da broca, seja equivalente a uma força pontual resultante, aplicada a uma determinada distância ( $r$ ) do centro da broca, como segue (Bork, 1995):

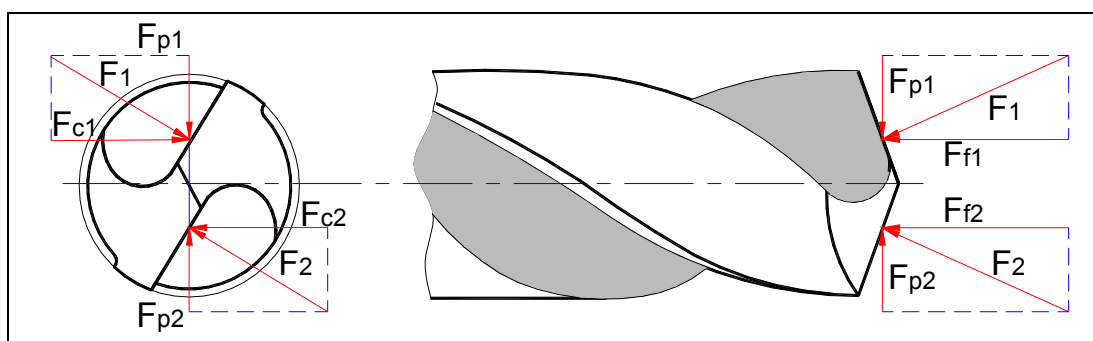


Figura 3.15: Forças presentes na furação (Bork, 1995).

$$\text{Furação em cheio: } r = \frac{0,38.D}{2} \quad (3.3)$$

$$\text{Furação com pré-furo: } r = \frac{D + d}{4} \quad (3.4)$$

Onde:

D = diâmetro da broca;

d = diâmetro do pré-furo.

A força principal de corte é calculada a partir do momento torçor medido, através das Equações (3.5) e (3.6) (Bork, 1995).

$$\text{Furação em cheio: } F_c = \frac{Mt}{0,38.D} \quad (3.5)$$

$$\text{Furação com pré-furo: } F_c = \frac{Mt}{D + d} \quad (3.6)$$

#### a) Equação de Kienzle

A Equação de Kienzle (3.7) permite que sejam feitas inferências a respeito da potência necessária para a usinagem, além dos esforços atuantes na máquina-ferramenta e na peça, a partir do cálculo das forças de usinagem. Para tanto, é necessário que sejam previamente determinadas a constante e o expoente da Equação de Kienzle: “ $k_{c1.1}$ ” e “ $1-m_c$ ”. Essas constantes são características de usinabilidade do próprio material e, portanto deveriam ser independentes do processo de usinagem, ou seja, valores de “ $k_{c1.1}$ ” e “ $1-m_c$ ” encontrados empiricamente por um processo de torneamento seriam os mesmos daqueles encontrados em uma furação. No entanto, na prática, a aplicação da Equação de Kienzle aos diversos processos só é possível com a utilização de fatores de correção, ou com a definição de constantes específicas, pois a equação é bastante simples e não considera variáveis como a geometria e material da ferramenta, tipo da ferramenta, tipo de processo. De posse da Equação de Kienzle e suas constantes, pode-se calcular as forças de corte e de avanço para diferentes larguras de cavaco (b) e espessuras de cavaco (h) no proceso de furação, através das Equações (3.7) e (3.9).

$$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_c} \quad (3.7)$$

onde:

$F_c$  = Força de corte [N];

$k_{c1.1}$  = Pressão específica de corte para um cavaco de  $b \cdot h = 1 \text{ mm}^2$  [N/mm<sup>2</sup>];

$b$  = largura do cavaco [mm];

$h$  = espessura do cavaco [mm];

$1-m_c$  = expoente que quantifica a influência de  $h$  na força de corte.

A equação e as grandezas acima são válidas na determinação do momento torçor em ensaios de furação. Para o caso da furação em cheio, procede-se o cálculo através da Equação (3.8):

$$M_t = 0,38 \cdot F_c \cdot D \quad (3.8)$$

onde:

$M_t$  = momento torçor na broca [N.m];

$F_c$  = força de corte [N];

$D$  = diâmetro da broca [mm].

Para o cálculo das forças de avanço no processo de furação é utilizada a Equação de Kienzle com diferentes constantes, conforme Equação (5.3):

$$F_f = k_{f1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_f} \quad (3.9)$$

onde:

$F_c$  = Força de corte [N];

$k_{f1.1}$  = Pressão específica de corte para um cavaco de  $b \cdot h = 1 \text{ mm}^2$  [N/mm<sup>2</sup>];

$b$  = largura do cavaco [mm];

$h$  = espessura do cavaco [mm];

$1-m_f$  = expoente que quantifica a influência de  $h$  na força de avanço.

### 3.4 Estado da arte em usinagem de ferros fundidos vermiculares

Tendo em vista as vantagens a serem obtidas com a utilização do ferro fundido vermicular – CGI – em blocos de motores, em 1996 começaram as primeiras tentativas de introduzir este material em *Linhas Transfer* de usinagem de ferros fundidos cinzentos. Imediatamente apareceram problemas, pois as altas velocidades de corte usuais não puderam ser utilizadas, principalmente em algumas operações de usinagem mais críticas, tais como o mandrilamento de cilindros, devido ao acentuado desgaste dos insertos de PCBN, quando aplicados ao vermicular. Os resultados da introdução das peças de vermicular em *Linhas Transfer* são apresentados na Figura 3.16, onde o ferro fundido cinzento é comparado com o CGI, para algumas operações de usinagem presentes em blocos de motores.

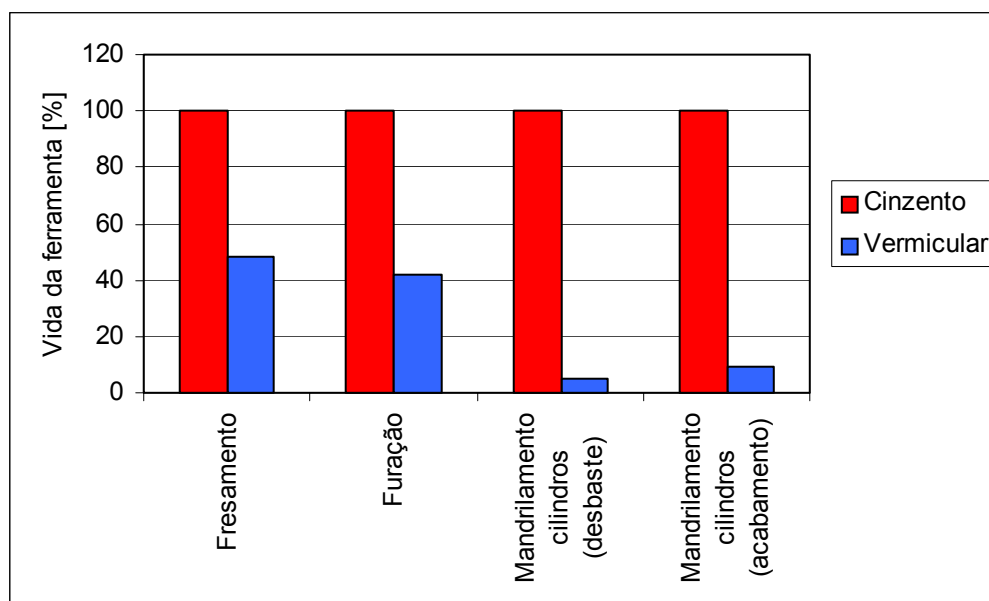


Figura 3.16: Comparação entre usinabilidade do ferro fundido cinzento e vermicular para operações de usinagem em linha de alta velocidade (Reuter et al., 2000).

As operações de fresamento e furação, com ferramentas de metal-duro, mostraram uma redução de aproximadamente 50% na vida das ferramentas, o que foi atribuído ao efeito da maior resistência mecânica do CGI. Entretanto, para as operações de mandrilamento dos cilindros, realizadas a altas velocidades com ferramentas de PCBN, observou-se uma redução para até 5% em relação ao cinzento.



Uma diferença tão significativa acabou por atrasar a utilização em série do CGI em blocos de motores. O instituto de pesquisa PTW possui, desde 1997, um grupo de pesquisa dedicado quase exclusivamente ao estudo da usinagem de CGI. Para tanto, o instituto conta com uma parceria com empresas de fundição, diversas indústrias automobilísticas, tais como AUDI, BMW, FORD, DaimlerChrysler, empresas fabricantes de ferramentas, tais como Kennametal, Iscar, Mapal, e com a empresa SinterCast, a qual comercializa a tecnologia e os equipamentos para a fabricação de CGI sem adição de titânio (Reuter et al., 2000).

As diferenças de usinabilidade entre o cinzento e o vermicular, principalmente com a utilização de ferramentas de PCBN, foram surpreendentes, pois os dois materiais são relativamente semelhantes. Nos itens seguintes deste capítulo, serão abordados os principais fatores que podem explicar esta diferença.

### **3.5 Fatores influentes na usinabilidade de vermiculares**

Dawson et al. (1999) classificaram as principais variáveis envolvidas na usinabilidade do ferro fundido vermicular da seguinte maneira:

- Forma da grafita;
- Tipo e proporção de perlita;
- Efeito de elementos químicos (Sb, Mn, Si, S, Ti, Cr);
- Efeito das inclusões.

#### **3.5.1 Efeito da forma da grafita**

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

A variação da forma da grafita de lamelar para vermicular faz com que se altere o modo de ruptura do cavaco, passando de frágil para dúctil. Durante a usinagem, o cavaco do vermicular tende a ficar mais em contato com a face da ferramenta do que o cavaco do cinzento. Este fato aliado ao maior coeficiente de

atrimento do CGI e à sua menor condutividade térmica, tendem a elevar a temperatura da ferramenta durante o corte. No entanto, as medições revelam que as temperaturas da ferramenta durante o corte do CGI são apenas alguns graus acima do cinzento (Reuter et al., 1999).

Visando avaliar a influência da forma da grafita, isoladamente, foram produzidos dois materiais com idêntica composição química e com perlita acima de 95%. Variando o tempo entre a inoculação e o vazamento, obteve-se:

- Material 1: Ferro fundido vermicular;
- Material 2: Ferro fundido 50% vermicular / 50% cinzento.

Em ensaios de torneamento com metal-duro a 200 m/min, o material 2 propiciou um ganho na vida da ferramenta de 30% em relação ao material 1. Isto comprova que a forma de grafita é um fator crítico na usinabilidade do CGI (Dawson et al., 1999).

### **3.5.2 Influência da perlita**

Os ferros fundidos podem ser entendidos como materiais compósitos, formados por partículas de grafita em uma matriz de ferrita e/ou perlita.

Durante a solidificação, o material passa por uma faixa de temperatura na qual encontra-se sob a forma de austenita. Abaixo de 725 °C, o material transforma-se em ferrita ou perlita. Se a velocidade de resfriamento é lenta o suficiente e se as condições químicas são 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 a formação de perlita. A perlita é constituída por uma estrutura lamelar alternada entre ferrita e cementita ( $Fe_3C$ ). Estas lamelas de  $Fe_3C$  reforçam a matriz, tornando-a mais dura e resistente (Dawson et al., 1999).

O efeito da perlita na usinabilidade deve ser considerado de duas maneiras distintas: a quantidade de  $Fe_3C$  nos grãos de perlita; e a proporção de grãos de perlita vs. ferrita.

### *a) Tipo de perlita*

De acordo com o diagrama ferro-carbono, a fração em volume de ferrita e  $\text{Fe}_3\text{C}$  na perlita é de 88% e 12%, respectivamente. Contudo, na prática, o comportamento da liga é um pouco diferente daquela situação de solidificação em equilíbrio termodinâmico de uma liga formada apenas por ferro e carbono. A adição de silício (2 a 2,5%) e a presença de núcleos da inoculação promovem o crescimento das partículas de grafita, durante a solidificação. Por outro lado, elementos como o manganês, cobre e estanho atuam como barreiras de difusão, evitando que o carbono se deposite sobre as partículas de grafita em crescimento; por isso recebem a denominação de elementos perlitizantes. A velocidade de resfriamento do material no momento em que deixa a fase de austenita, na temperatura de aproximadamente  $725^\circ\text{C}$ , também contribui para determinar o maior ou menor crescimento das partículas de grafita. Como um resultado do balanço desses fatores, a proporção de  $\text{Fe}_3\text{C}$  na perlita situa-se na faixa de 8-15% (Dawson et al., 1999).

Um estudo realizado por Bates (1996) apresenta a relação entre o teor de  $\text{Fe}_3\text{C}$  da perlita e a usinabilidade de ferros fundidos cinzentos e nodulares. Os resultados obtidos são válidos para os processos de torneamento, fresamento e furação, tanto para ferramentas de CBN como de metal-duro. Na Figura 3.17, um exemplo da avaliação da influência do teor de  $\text{Fe}_3\text{C}$  na furação de placas de ferro fundido cinzento com brocas de aço rápido. Observa-se que o número de furos produzidos por cada ferramenta cai bruscamente com o aumento do teor de  $\text{Fe}_3\text{C}$  na perlita.

O teor de  $\text{Fe}_3\text{C}$  na perlita deve-se principalmente ao comportamento da solidificação e à velocidade de resfriamento da liga, durante a transformação da austenita em ferrita e cementita, aproximadamente aos  $725^\circ\text{C}$ . Entretanto, a velocidade do resfriamento acima da transformação dos  $725^\circ\text{C}$  também é importante. Com o aumento do tempo de resfriamento<sup>3</sup>, a perlita pode se decompor resultando em lamelas de cementita mais finas ou até perfuradas. Essa redução efetiva do teor de cementita na perlita pode influenciar na usinabilidade, apesar de não ser facilmente observável em inspeções metalográficas normais.

---

3. Na prática, a velocidade de resfriamento é tanto menor quanto maior o tempo para desmoldar a peça.

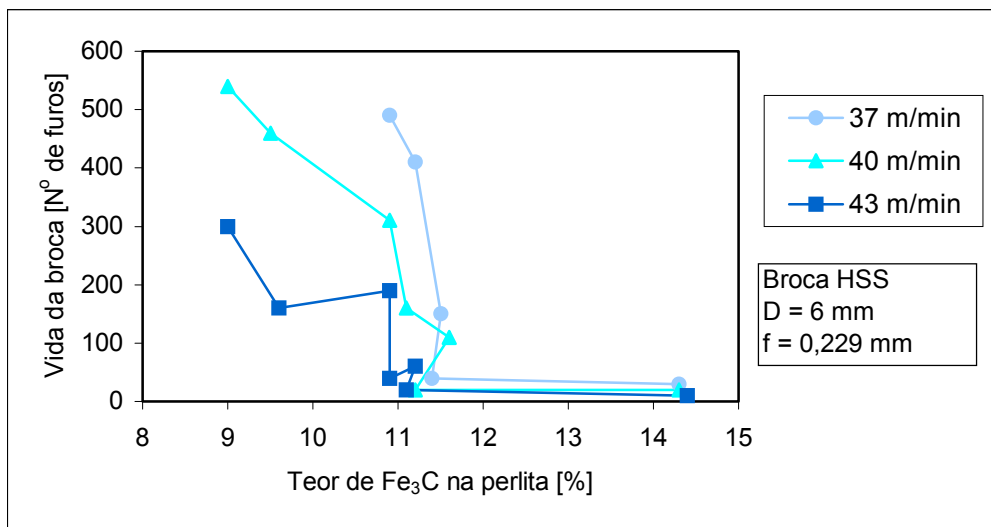


Figura 3.17: Redução da vida da ferramenta com o aumento da quantidade de Fe<sub>3</sub>C na fase de perlita (Bates, 1996).

#### b) Proporção perlita / ferrita

A proporção de perlita ou razão perlita / ferrita é um fator determinante na resistência mecânica do material. Um aumento de 15% para 95% de perlita no CGI, mantendo-se as demais variáveis inalteradas, induz a um aumento de tensão limite de resistência de 300 MPa para 480 MPa, aproximadamente (Dawson et al., 1998). Esta variação reflete-se na usinagem, porém, o aumento da razão perlita / ferrita não implica necessariamente na redução da vida da ferramenta, a qual também depende fortemente do teor de Fe<sub>3</sub>C da perlita.

Ensaio de torneamento e fresamento foram conduzidos em ferros fundidos vermiculares com diferentes quantidades de perlita. Como elementos estabilizadores da perlita, foram utilizados cobre e estanho. Foram testados dois materiais de ferramenta, metal-duro e CBN. Para cada um deles, uma velocidade de corte alta e uma baixa: 150 e 200 m/min para o metal-duro; 400 e 800 m/min para o CBN. As Figuras 3.18(a) e (b) mostram os resultados.

Como se pode observar, os efeitos da proporção de perlita não são os mesmos para os processos de torneamento e fresamento. Considerando a faixa acima de 70% de perlita (quantidade usual), enquanto a vida da ferramenta de torneamento diminui com o aumento da perlita, no fresamento a vida aumenta substancialmente, principalmente no caso do CBN.

No processo de torneamento a altas velocidades, tanto com metal-duro quanto com CBN, as vidas das ferramentas não são afetadas pela variação da proporção de perlita, na faixa entre 50 e 97,5% de perlita (Dawson et al., 1999).

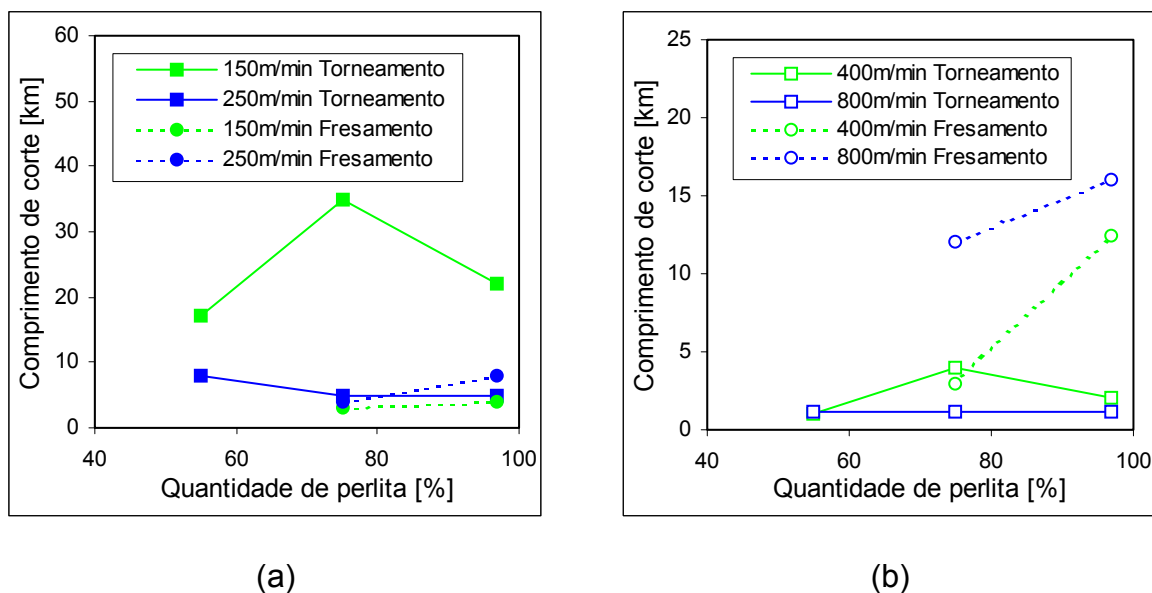


Figura 3.18: Vida da ferramenta em função da razão perlita / ferrita na usinagem de CGI: (a) ferramenta de metal-duro; (b) ferramenta de CBN (Dawson et al., 1999).

*c) Efeito dos estabilizadores de perlita: manganês, cobre, estanho e antimônio*

O ferro fundido vermicular possui uma tendência ferritizante. Isso se deve ao fato de possuir menores teores de oxigênio e de enxofre, em relação ao cinzento, o que facilita a deposição de átomos de carbono sobre as partículas de grafita em formação, tanto na solidificação quanto na transformação da austenita aos 725 °C. Para aumentar a formação de perlita, os elementos cobre (Cu) e estanho (Sn) são normalmente empregados. Além desses, os elementos antimônio (Sb) e manganês (Mn) também são utilizados como perlitizantes.

A estabilização da perlita pode se dar por dois mecanismos:

- Os elementos Cu, Sn e Sb formam uma barreira de difusão em torno das partículas de grafita, obstruindo a precipitação de novos átomos;
- O elemento Mn aumenta a solubilidade do carbono na austenita. O alto teor de carbono auxilia na formação de  $Fe_3C$ .

O manganês é adicionado ao cinzento com a finalidade de unir-se ao enxofre (MnS) para evitar perdas de propriedades mecânicas causadas pelo enxofre livre. É tipicamente adicionado na proporção de 0,35 a 0,45%. Na presença de cobre e estanho, a adição de manganês em níveis maiores (0,90%) é suficiente para atingir 100% de perlita (Dawson et al., 1999).

Como visto no item anterior, materiais com até 97,5% de perlita foram analisados. A fim de avaliar materiais com 100% de perlita, Dawson et al. (1999) produziram duas novas ligas: com adição de manganês (0,89% Mn; 0,012% Sb; 0,83% Cu; 0,081% Sn) e com adição de antimônio (0,41% Mn; 0,099% Sb; 0,29% Cu; 0,003% Sn), ambos em presença de cobre e estanho.

Nesses materiais foram realizados testes de torneamento, assim como os descritos no item anterior, ou seja, variando o material da ferramenta (metal-duro e CBN) e as velocidades de corte (baixa e alta).

Os resultados, mostrados na Figura 3.19 podem ser resumidos da seguinte maneira:

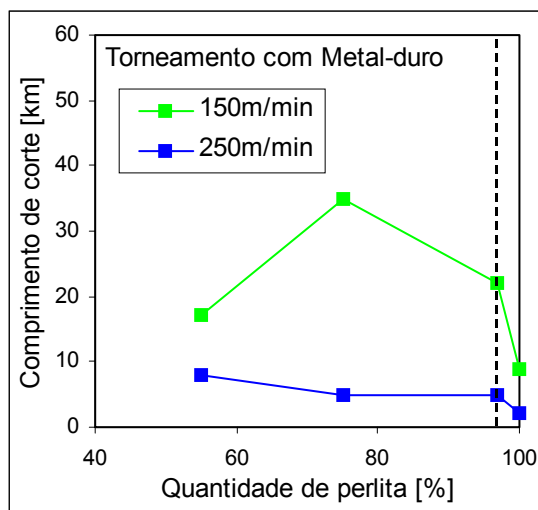
O material com manganês (100% perlita) reduziu a vida do metal-duro em aproximadamente 50%, comparando-se com o material com 97,5% de perlita. A redução da vida é proporcionalmente maior para a velocidade mais baixa. Essa diferença de usinabilidade não foi atribuída ao aumento de 2% de perlita, e sim ao efeito dos elementos perlitizantes na composição da cementita, na microdureza da ferrita e outras variações microestruturais;

Os materiais 100% perlíticos foram testados com o intuito de aumentar a vida do CBN através da eliminação das regiões de ferrita. Porém, a durabilidade do CBN não sofreu alterações com a elevação do teor de manganês;

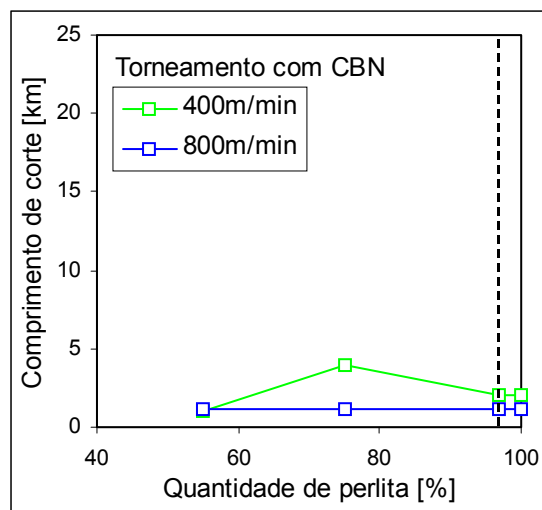
Com a adição de antimônio os resultados foram melhores. Os testes com metal-duro na velocidade alta revelaram um pequeno aumento na vida. Os ensaios na velocidade baixa não foram concluídos até o momento da publicação;

A aplicação do CBN no material com antimônio mostrou um aumento de vida na velocidade baixa, mas não sofreu alteração na velocidade de 800 m/min (Dawson et al., 1999).

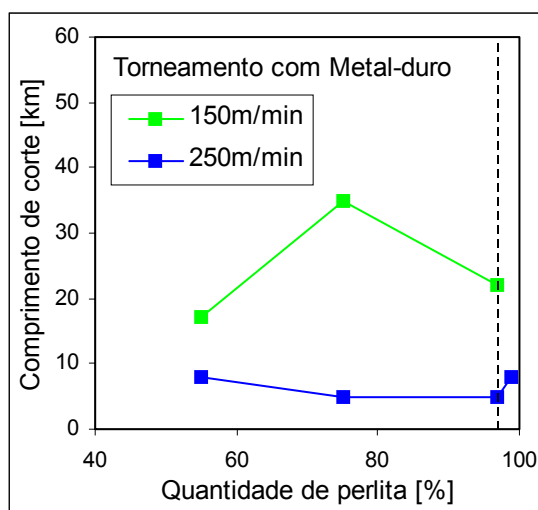
Em todos os ensaios realizados observa-se que o comprimento de corte alcançado com metal-duro é superior ao CBN. A superioridade do metal-duro não é comentada pelos autores.



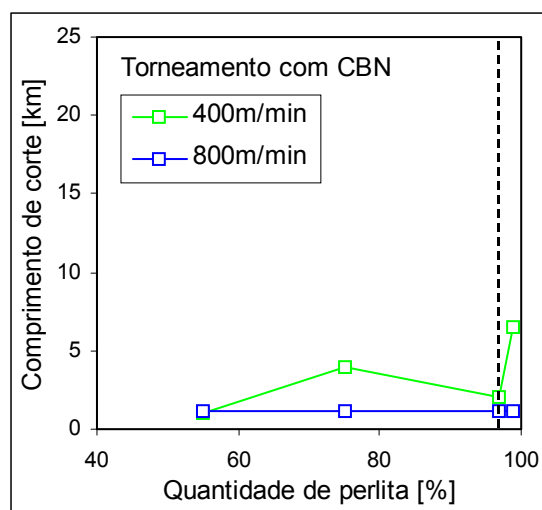
(a) (Cu+Sn) + Mn Perlita %



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



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



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

Figura 3.19: Efeito do aumento da proporção de perlita para: (a) e (b) 100%, devido à adição de Mn; (c) e (d) 99%, devido à adição de Sb, na presença de Cu e Sn (Dawson et al., 1999).

### 3.5.3 Efeito do silício

O silício é um elemento formador de ferrita. O ferro fundido vermicular tipicamente contém 2,0 a 2,4% de silício, que, juntamente com elementos perlizantes, permite atingir a proporção de perlita desejada. Caso os teores dos elementos formadores de perlita sejam reduzidos e o teor de silício aumentado para

3,0%, o CGI formado terá uma matriz totalmente ferrítica. Entretanto, a elevada concentração de silício tende a endurecer a ferrita por solução-sólida, fazendo com que um material ferrítico atinja valores de dureza e resistência do ferro fundido cinzento perlítico ou até mesmo do CGI perlítico.

Para avaliar estes efeitos quanto à usinabilidade do material, foram elaborados corpos de prova de CGI com 3,0% e 4,0% de silício. Em ensaios de torneamento, foram comparados com um CGI padrão, estabilizado com cobre e estanho. Na Figura 3.20 encontram-se resultados dos experimentos.

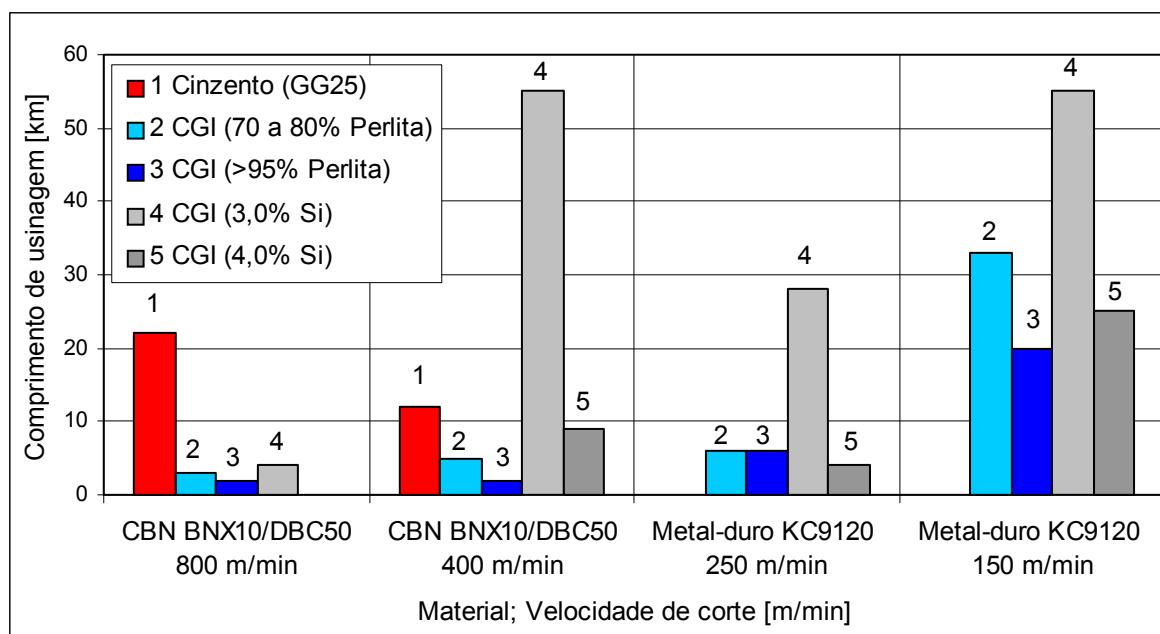


Figura 3.20: Efeito do teor de silício do CGI na vida da ferramenta de torneamento (Dawson et al., 1999).

A estabilização da ferrita com 3,0% Si aumentou muito a usinabilidade do material, com exceção do ensaio com CBN a 800 m/min. Entretanto a resistência mecânica foi muito baixa (386 MPa). Já o material com 4,0% de Si atingiu uma boa resistência mecânica (500 MPa), e ao mesmo tempo perdeu em usinabilidade. Além disso, perdeu cerca de 15% da condutividade térmica em relação ao CGI normal (Dawson et al., 1999).



### **3.5.4 Efeito do enxofre**

O enxofre, juntamente com o manganês forma o sulfeto de manganês (MnS). Boehs (1979) verificou que a presença do MnS no ferro fundido maleável preto ferrítico melhora sua usinabilidade principalmente por facilitar a quebra dos cavacos.

Inclusões de MnS tendem a melhorar a usinabilidade de ferros fundidos cinzentos e dos chamados aços de corte fácil, agindo como lubrificante e aderindo sobre a face da ferramenta, formando uma camada protetora contra oxidação e difusão (Reuter et al., 2000).

Nos vermiculares, não se observa a formação da referida camada. O teor de enxofre normalmente presente em ferros fundidos cinzentos é da ordem de 0,1%, enquanto que no vermicular é de 0,01%, dez vezes menor. Além disso, este enxofre residual do vermicular combina-se preferencialmente com o magnésio, elemento nodulizante, não ficando quantidades remanescentes para se combinar com o manganês e formar a camada de MnS, protetora da ferramenta (Reuter et al., 2000).

### **3.5.5 Efeito das inclusões**

Metais fundidos normalmente possuem inclusões não-metálicas, as quais podem ser de óxidos, sulfetos ou complexos intermetálicos. As inclusões, dependendo de sua composição, podem ser macias como MnS, ou duras como TiC.

A fim de melhorar a usinabilidade do CGI, Dawson et al. (1999) fizeram tentativas para resolver o problema das inclusões de duas maneiras distintas: transformando as inclusões de alta dureza em inclusões de menor dureza; e gerando inclusões que pudessem se acumular na superfície da ferramenta, protegendo-a.

Na primeira opção, a seqüência de adição de elementos à liga foi modificada, para evitar a formação de silicato de magnésio, o qual é relativamente duro. Alumínio e cálcio foram inoculados inicialmente e após, o magnésio, em menores quantidades. Por esse procedimento, inclusões de menor dureza, foram geradas, porém os efeitos com relação à vida da ferramenta foram insignificantes, frente a maior dificuldade de fabricação do material.

Como segunda opção, Dawson et al. (1999) procuraram gerar filmes protetores sobre a ferramenta, a partir de inclusões no material. Para se entender

melhor este procedimento, deve-se levar em consideração que a formação do filme protetor depende tanto da presença de inclusões no material (tais como MnS), assim como do mecanismo de corte. O comportamento frágil do ferro fundido cinzento faz com que o contato do material com o flanco e a face da ferramenta seja intermitente. Existem, portanto, intervalos de tempo em que não existe contato abrasivo sobre a ferramenta. Durante esse período, inclusões que entraram em contato com o inserto têm a oportunidade de aderir fortemente a ele, antes do próximo contato abrasivo. Já o comportamento mais dúctil do CGI reduz o tempo sem contato da ferramenta, não permitindo a aderência das inclusões, devido ao constante contato abrasivo. Enquanto isso poderia explicar diferenças na tendência de deposição entre o cinzento e o CGI, deve-se considerar que MnS também se acumula sobre a ferramenta durante a usinagem a baixas velocidades de aços e aços inoxidáveis, os quais são materiais dúcteis. Isso poderia ser atribuído a uma maior quantidade de inclusões nesses aços. Porém, o aumento da velocidade de corte nos aços diminui a formação do filme protetor, o que reforça a hipótese de que a abrasão tende a impedir sua formação (Dawson et al., 1999).

### **3.5.6 Efeito do titânio e do cromo**

Alguns elementos podem ser indesejavelmente introduzidos na liga através da matéria-prima, tal como a sucata. Esses elementos podem causar degeneração da forma da grafita, endurecimento da fase ferrítica, aumento do teor de  $Fe_3C$  e formação de inclusões abrasivas.

#### **a) Titânio**

O titânio presente na liga pode ser adicionado intencionalmente assim como pode ser oriundo da matéria-prima. A adição intencional no CGI pode ser tanto para controlar a forma da grafita<sup>4</sup>, como para melhorar a resistência ao desgaste. O titânio reage com o carbono e/ou nitrogênio presentes na liga para formar inclusões de carbonitreto de titânio.

O titânio no CGI usualmente se encontra nas proporções indicadas na Tabela 3.2.

---

4. Ver item 3.1.1.

Tabela 3.2: Efeitos metalúrgicos de distintas proporções de titânio (Dawson et al., 1999).

<i>%Ti:</i>	<i>Função metalúrgica</i>
0,05 a 0,02	Típico teor residual
0,04 a 0,07	Adição intencional para melhorar resistência ao desgaste
0,10 a 0,25	Adição intencional para estabilizar a grafita vermicular

A relação entre o teor de titânio e o desgaste da ferramenta de metal-duro em um processo de torneamento foi avaliada para velocidades de 150 e 250 m/min (Figura 3.21). A vida da ferramenta diminui drasticamente com o aumento do teor de titânio (Dawson et al., 1999).

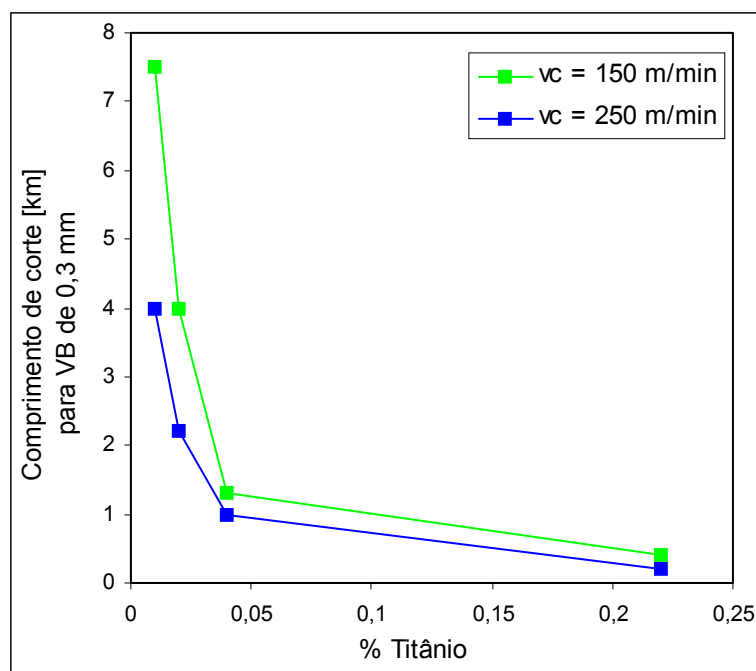


Figura 3.21: Vida da ferramenta de torneamento em função do teor de titânio no CGI (Dawson et al., 1999).

### *b) Cromo*

O cromo é um elemento perlitizante, por aumentar a solubilidade do carbono no ferro. Desta forma, a liga contendo carbono possui uma maior probabilidade de coquilhamento e de possuir carbonetos, tais como  $(Fe, Cr)_3C$ .

No CGI, é importante que o teor de cromo esteja abaixo de 0,08% (Dawson et al., 1999).

### **3.6 Mecanismos de desgaste de ferramentas em ferros fundidos vermiculares**

Diferenças significativas entre os ferros fundidos vermicular e cinzento podem ser explicadas pelos mecanismos de desgaste, os quais foram avaliados por pesquisadores da Universidade de Darmstadt (Gastel et al., 2000; Reuter et al., 2000).

Com relação à abrasão, constatou-se que o CGI é aproximadamente 15% mais abrasivo que o cinzento, para mesmos níveis de dureza. Este fato pode explicar a redução de vida das ferramentas ao usinar a baixas velocidades, porém não explica a drástica diferença em altas velocidades de corte.

Os mecanismos de difusão e oxidação tendem a ser predominantes a altas velocidades. Os testes de difusão do CGI e cinzento não apresentaram diferenças significativas, o que pode ser explicado pela composição química muito semelhante. Outra constatação importante é de que a temperatura nas proximidades do gume da ferramenta, para uma mesma velocidade de corte, é similar para os dois materiais, sendo sutilmente superior para o CGI.

Nos testes de oxidação, realizados em insertos de PCBN usinando CGI, foi observada a oxidação da fase ligante da ferramenta para óxido de titânio, e microtrincas próximas aos pontos de óxidos, conforme Figura 3.22 (Reuter et al., 2000; Gastel et al., 2000).

No entanto, a razão mais provável para a diferença de usinabilidade entre os dois materiais a altas velocidades é a formação da camada protetora de sulfetos de manganês (MnS) sobre a ferramenta, ao usinar o ferro fundido cinzento (Figura 3.23).

Estudos realizados com ferros fundidos maleáveis também ressaltam a melhora da usinabilidade do material com o aumento de MnS. Para velocidades entre 140 m/min e 250 m/min, aumentos na quantidade de MnS melhoram a quebra de cavacos e diminuem as forças de corte em até 30% (Boehs, 1979; König, 1997).

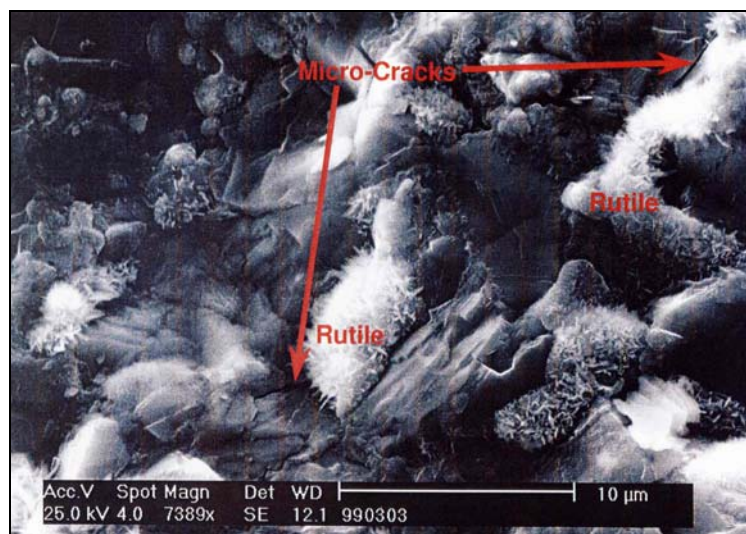
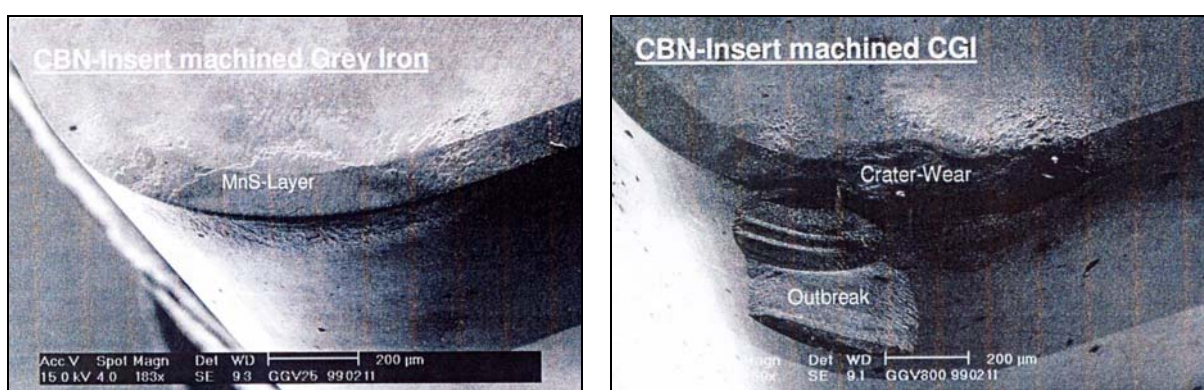


Figura 3.22: Formação de  $\text{TiO}_2$  por oxidação (Reuter et al., 2000).



(a)

(b)

Figura 3.23: (a) Formação de camada protetora de MnS sobre inserto de PCBN ao usinar ferro fundido cinzento; (b) ausência de camada protetora ao usinar CGI ( $v_c = 800$  m/min) (Reuter et al., 2000).

Estudos foram feitos para avaliar a presença de S e Mn no cinzento e no CGI, variando as velocidades de corte entre 100 e 800 m/min, com ferramenta de PCBN. Observou-se, para o cinzento, uma deposição crescente de S e de Mn na face da ferramenta, com o aumento da velocidade de corte. Já na usinagem de CGI, esta deposição não ocorreu em nenhuma das velocidades testadas. Para o CGI, apenas uma deposição de Mn foi observada, na face da ferramenta, porém em uma região mais afastada do gume (Reuter et al., 2000).

A camada de MnS formada em altas velocidades propicia uma significativa redução do coeficiente de atrito, facilitando o corte. Funciona, também, como uma

barreira para os fenômenos de oxidação e difusão que ocorrem principalmente em altas temperaturas.

O tipo de corte, contínuo ou intermitente, é outro fator de influência significativa nos desgastes por oxidação e difusão. No corte contínuo (torneamento, mandrilamento) a ferramenta permanece mais tempo em contato com o material que está sendo usinado, facilitando esses tipos de desgaste. No corte intermitente (fresamento), a difusão e oxidação são menos intensas (Dawson et al., 1999).

### **3.7 Ferramentas para usinagem de vermiculares**

Paralelamente a pesquisas de melhoria de usinabilidade do vermicular, tal como o presente trabalho, muitas têm sido as pesquisas no campo do aprimoramento de ferramentas. Como as soluções de ferramentas são diferenciadas para cada tipo de processo, procurou-se fazer uma abordagem particular para alguns dos processos utilizados em blocos de motores: furação, fresamento, mandrilamento. Destes, o processo mais crítico é o mandrilamento de cilindros e neste estão concentradas a maioria das pesquisas. Outros processos, tais como rosqueamento, alargamento e brunimento, não serão abordados.

#### **3.7.1 Torneamento**

Apesar do processo de torneamento não estar presente na fabricação de blocos, sua relativa simplicidade estimula sua utilização na simulação de outros processos, tais como o mandrilamento, pois ambos apresentam corte contínuo. No instituto PTW foram feitos diversos ensaios de torneamento, a fim de testar o desempenho de diferentes materiais de ferramenta em ferros fundidos cinzentos e vermiculares, estes com teores de perlita baixos (LP  $\approx$  50% perlita) e altos (HP = 95% perlita). Os resultados são mostrados na Figura 3.24.

Observou-se que a diferença entre o cinzento e o vermicular é mais marcante em altas velocidades. Na usinagem de CGI em velocidades mais baixas, as ferramentas de metal-duro apresentaram vida acima de 50% daquela apresentada na usinagem de cinzento. As ferramentas de metal-duro apresentaram bom desempenho, porém, podem não atingir a produtividade necessária a uma linha de

produção devido à baixa velocidade de corte. Uma solução possível é a utilização de avanços maiores, mantendo-se a velocidade mais baixa (Reuter et al., 2000).

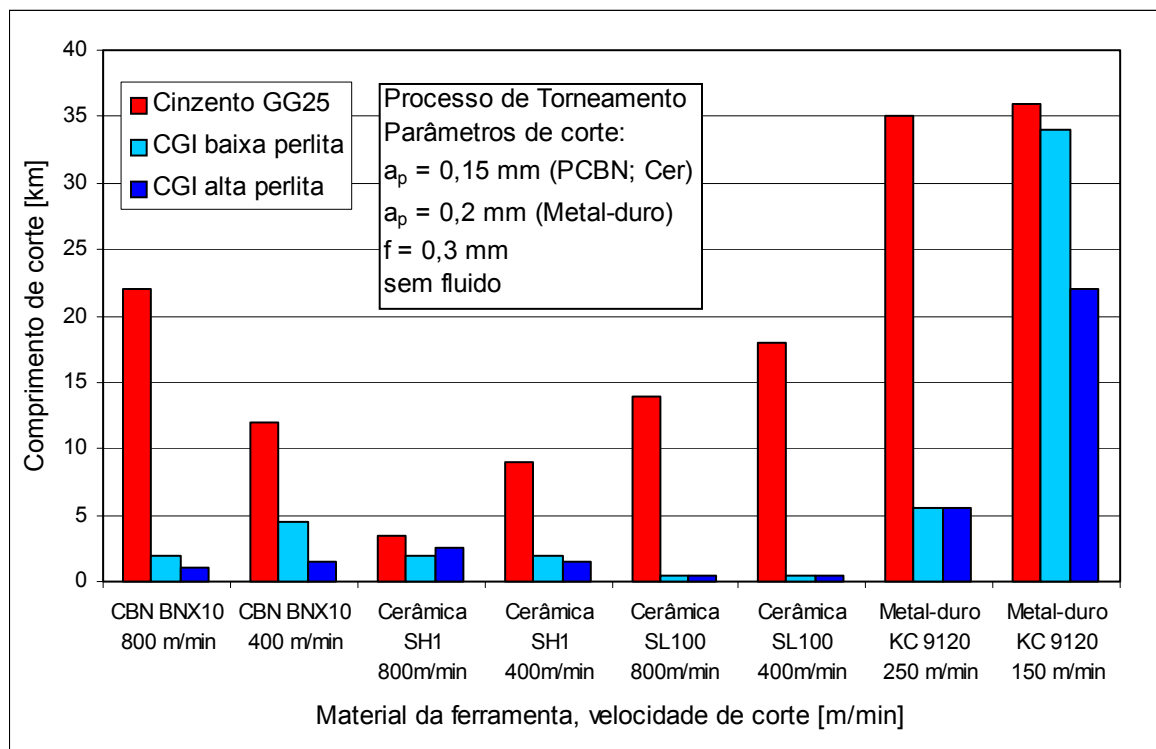


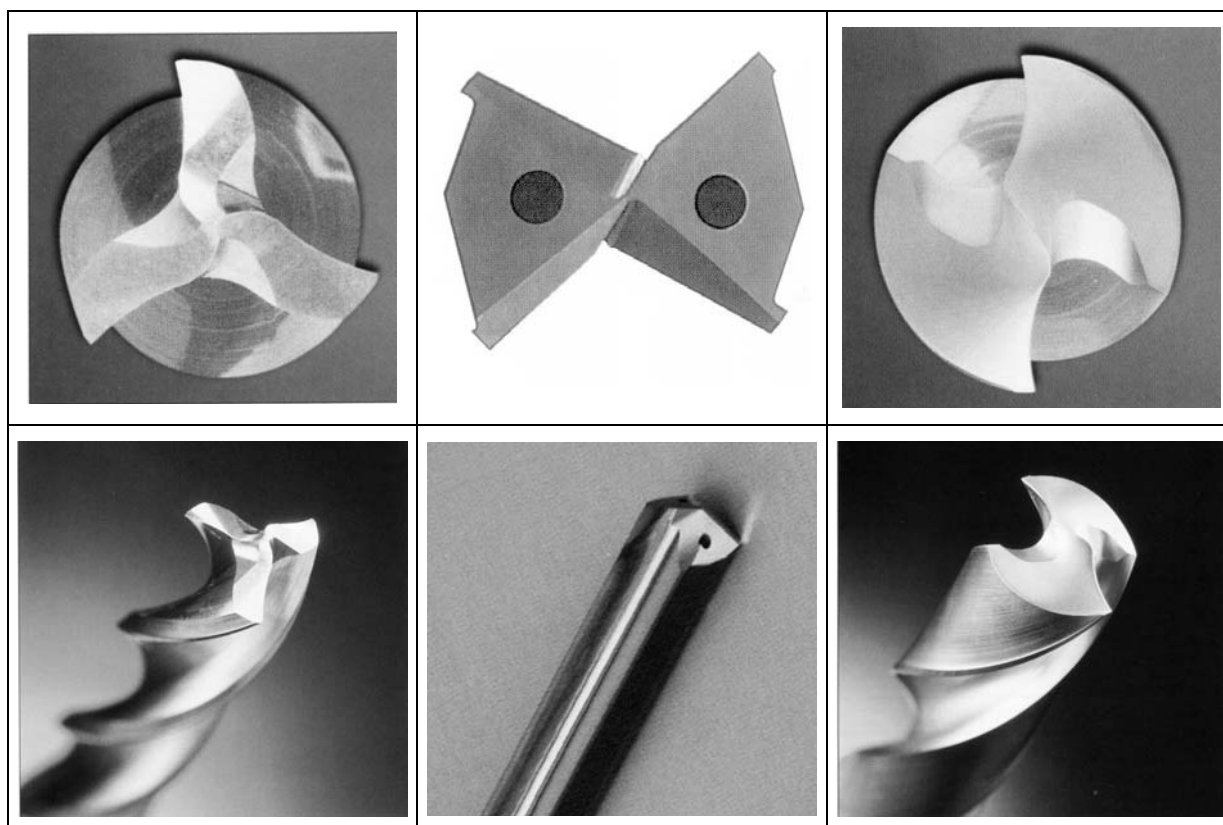
Figura 3.24: Resultados de testes de torneamento em CGI (com baixa e alta proporção de perlita) e cinzento (Reuter et al., 2000; Gastel et al., 2000).

### 3.7.2 Furação

O processo de furação com brocas de metal-duro é realizado a velocidades de corte mais baixas do que os processos que utilizam ferramentas de CBN ou cerâmica. Na furação, portanto, ocorrem menores diferenças de usinabilidade, uma vez que a camada protetora de MnS que não se forma na usinagem de CGI, também possui menor tendência a se formar na furação de cinzento. Dessa forma, observa-se normalmente uma redução de usinabilidade do CGI de 50% em relação ao cinzento, o que é um resultado relativamente bom, considerando-se que a resistência mecânica do CGI é aproximadamente o dobro do cinzento.

Borrmann (2000) realizou testes com três diferentes geometrias de brocas (Figura 3.25), com e sem fluido de corte. Nos testes realizados com CGI foram alcançadas vidas de brocas entre 50 e 75%, em relação ao cinzento, com

velocidade de corte de 70 a 80 m/min e avanço de 0,20 mm. As três geometrias testadas mostraram bons resultados, porém, a sugestão do fabricante é a broca de geometria TF (Borrmann, 2000).



Broca TF

Broca TX

Broca SE

Figura 3.25: Geometrias de brocas testadas pela Empresa Kennametal (Borrmann, 2000).

Upton (1999) realizou ensaios de furação em ferros fundidos vermiculares, com brocas helicoidais de metal-duro de 6,7 mm de diâmetro, sem recobrimento e a seco, com profundidade de  $2,2 \times d$ . Três geometrias de broca foram testadas (Figura 3.26), e todas apresentaram resultados de desgaste satisfatórios. Uma das curvas de momento torçor obtidas é mostrada na Figura 3.27. Com o aumento da profundidade do furo, observa-se no CGI um aumento no momento de 30 a 50% em relação ao cinzento, o que não é explicado pelo autor. As medições de momento durante a utilização das três brocas até 3.000 furos não revelam uma tendência crescente. A broca de ponta cônica foi levada até 11.676 furos e apresentou um pequeno aumento no momento medido devido a um lascamento ocorrido em um dos gumes.



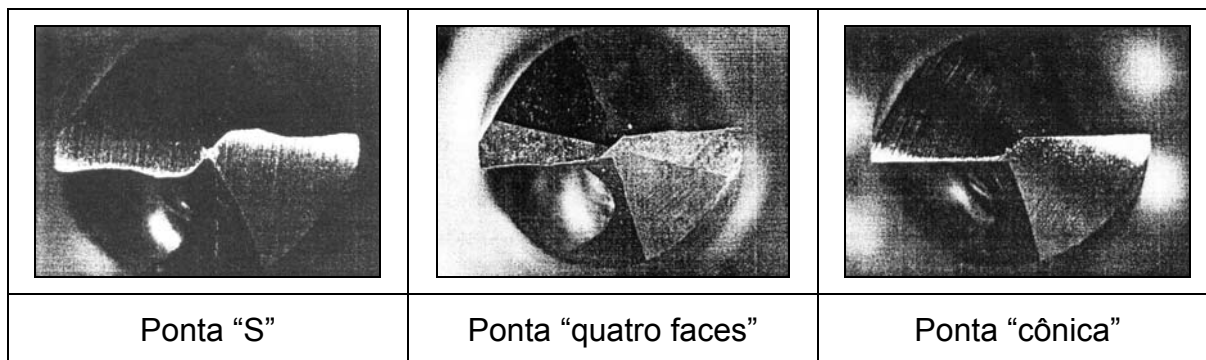


Figura 3.26: Geometria de brocas testadas em CGI (Upton, 1999).

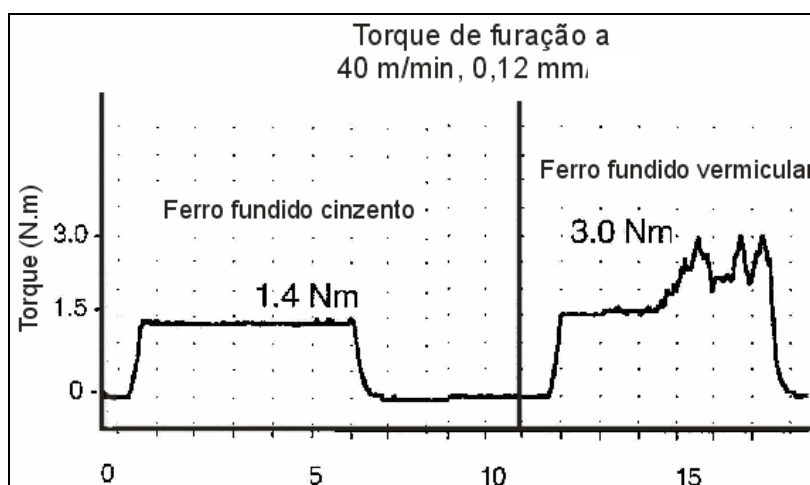


Figura 3.27: Momento torçor em ensaios de furação de cinzento e vermicular (Upton, 1999).

### 3.7.3 Fresamento

Observa-se, no vermicular, que os processos de usinagem mais críticos são aqueles realizados em altas velocidades e em corte contínuo, tais como o torneamento e o mandrilamento de cilindros. O processo de furação é menos crítico, pois apesar de ser contínuo, é executado a baixas velocidades. O processo de fresamento em blocos de motores é realizado a altas velocidades, mas o corte intermitente diminui as tendências de oxidação e difusão.

No instituto PTW<sup>5</sup> foram realizados ensaios de fresamento em CGI, com baixa e alta proporção de perlita, e em ferro fundido cinzento. Na Figura 3.28 são mostrados os resultados dos testes com diversas ferramentas. Observa-se que a

5. PTW: Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen. Technische Universität Darmstadt.

diferença de usinabilidade entre o CGI e o cinzento é relativamente pequena. No fresamento com CBN a 800 m/min, ocorreu uma redução na vida da ferramenta no CGI para aproximadamente 50% em relação ao cinzento. Para as mesmas condições de usinagem, porém no processo de torneamento, a vida da ferramenta é reduzida para 5% em relação ao torneamento em cinzento. Isso evidencia a diferença entre o corte contínuo e o intermitente.

Deve-se notar, também, que o aumento na quantidade de perlita de baixa ( $\approx 50\%$ ) para alta ( $>95\%$ ) implica em um aumento da vida da ferramenta, ao contrário do processo de torneamento.

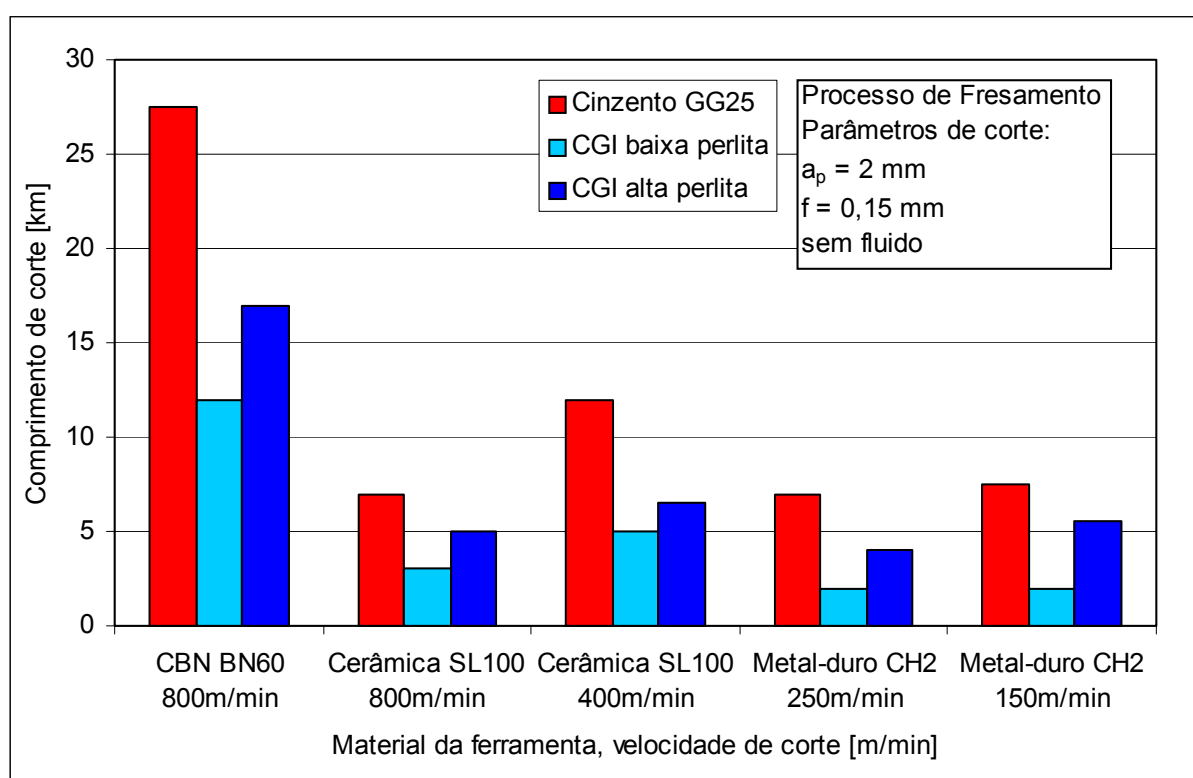


Figura 3.28: Resultados de testes de fresamento em CGI (com baixa e alta proporção de perlita) e cinzento (Reuter et al., 2000).

### 3.7.4 Mandrilamento de cilindros

Os primeiros testes de usinagem de blocos em CGI, realizados em *Linhas Transfer*, evidenciaram a operação de mandrilamento dos cilindros como “gargalo” de produção. As ferramentas de PBCN, normalmente utilizadas em cinzento, tiveram a vida reduzida drasticamente. Outros materiais de ferramentas foram testados,

como mostra a Figura 3.24. O metal-duro mostrou um desempenho relativamente bom, no entanto, a utilização de velocidades de corte da ordem de 250 m/min comprometeria o tempo de fabricação. Optou-se por utilizar o metal-duro como material de ferramenta, porém utilizando novos conceitos, a fim de reduzir o tempo de fabricação:

- a) Insertos múltiplos;
- b) Insertos rotativos;
- c) “Freso-mandrillamento”.

Diversas empresas fabricantes de ferramentas têm se empenhado no desenvolvimento do processo, cada qual seguindo uma das três estratégias acima.

#### a) *Insertos múltiplos*

Pesquisas realizadas por Kress (2000), da empresa Mapal, mostraram as possíveis vantagens da utilização de metal-duro como ferramentas para mandrilar, conforme Figura 3.29. Em uma ferramenta de mandrilar com apenas um inserto, foram testados três materiais de ferramenta. Observou-se o pequeno desgaste de flanco do metal-duro em relação às ferramentas de cerâmica e CBN.

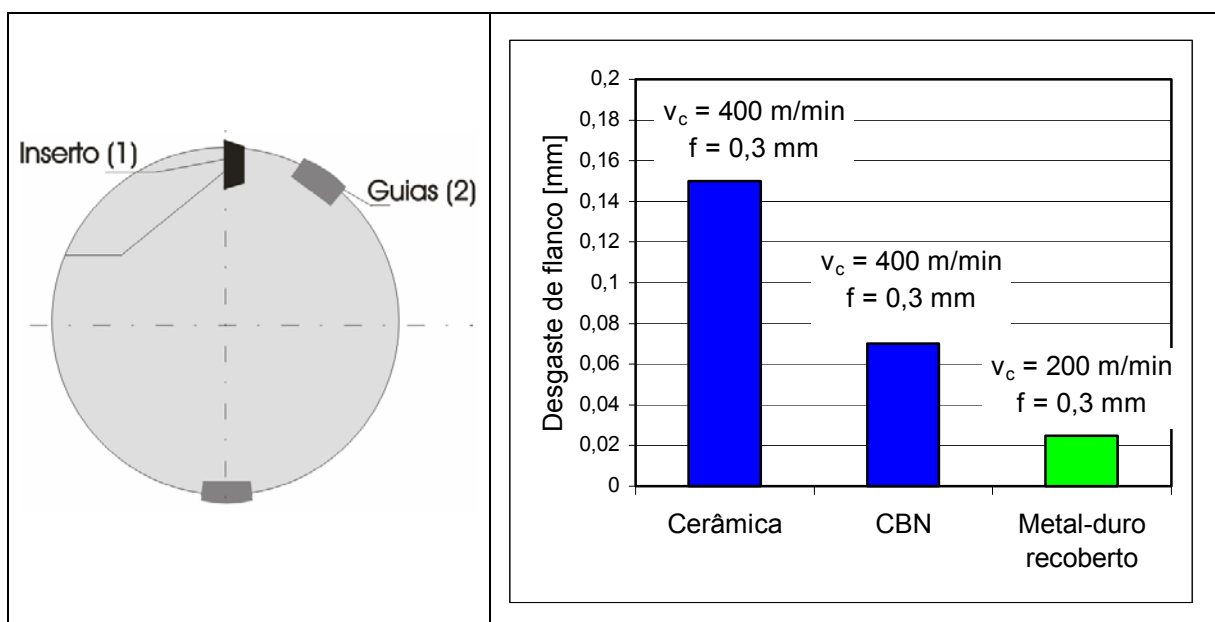


Figura 3.29: Desgaste de flanco após 64 cilindros usinados por uma ferramenta com um único inserto (Kress, 2000).

Porém, o metal-duro foi testado com 50% da velocidade de corte das outras ferramentas, aumentando o tempo de usinagem. A utilização de um maior número de insertos de metal-duro, aplicando uma maior velocidade de avanço, permitiu aumentar a produtividade. Com o maior número de insertos, pôde-se utilizar velocidades de avanço maiores, sem exceder a espessura de corte. A Figura 3.30 ilustra o resultado alcançado com uma ferramenta de duas pastilhas de metal-duro.

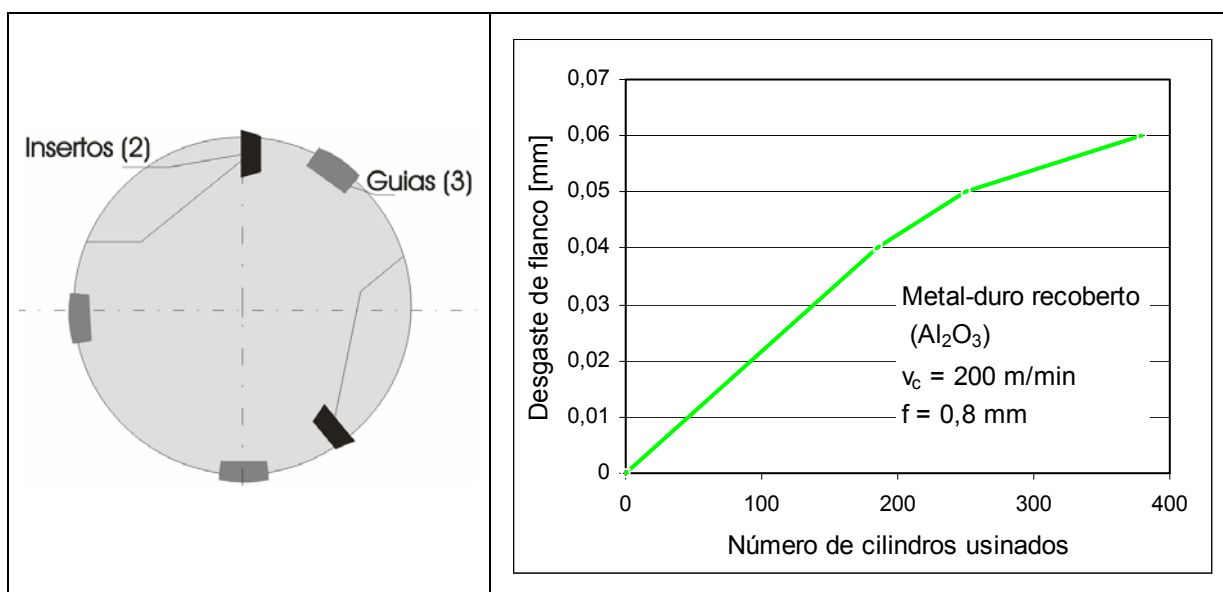


Figura 3.30: Desgaste de flanco no mandrilamento com duas pastilhas de metal-duro (Kress, 2000).

As empresas Ingersoll, Kennametal e Komet-Dihart também desenvolveram ferramentas com o conceito de insertos múltiplos, mostradas na Figura 3.31. As ferramentas de múltiplos insertos trabalham com velocidades entre 80 e 160 m/min, e avanço da ordem de 700 mm/min. Bons resultados de tolerância e vida de ferramenta foram alcançados, no entanto alguns aprimoramentos ainda são necessários na maioria das ferramentas (Reuter et al., 1999).

#### *b) Insertos rotativos*

O conceito de insertos rotativos tem sido desenvolvido pela empresa Rotary Technologies. Nessa ferramenta, mostrada na Figura 3.32 existem duas características fundamentais: os insertos de cerâmica ( $\text{SiN}$ ) são redondos, ou seja, com o gume circular e contínuo; e os insertos possuem liberdade para rotacionar. Durante o processo de corte, as forças de usinagem, com uma componente

tangencial ao inserto, provocam sua rotação. Dessa forma, o processo de corte aparentemente contínuo, passa a ser interrompido, reduzindo o desgaste da ferramenta (Reuter e Schulz, 1999b).

Na operação de mandrilamento de cilindros com essa ferramenta são utilizadas velocidades de corte de 600 e 800 m/min e velocidades de avanço de 2500 e 1700 mm/min, para desbaste e acabamento, respectivamente. A ferramenta é resfriada com ar comprimido, para evitar altas temperaturas. A movimentação dos insertos mostrou-se muito eficaz na redução de desgaste, e bons resultados foram atingidos. Contudo, existe a necessidade de algum aprimoramento a fim evitar a redução no diâmetro do cilindro, ao longo da vida da ferramenta.



Figura 3.31: Ferramentas de mandrilamento com múltiplos insertos, de diferentes empresas.

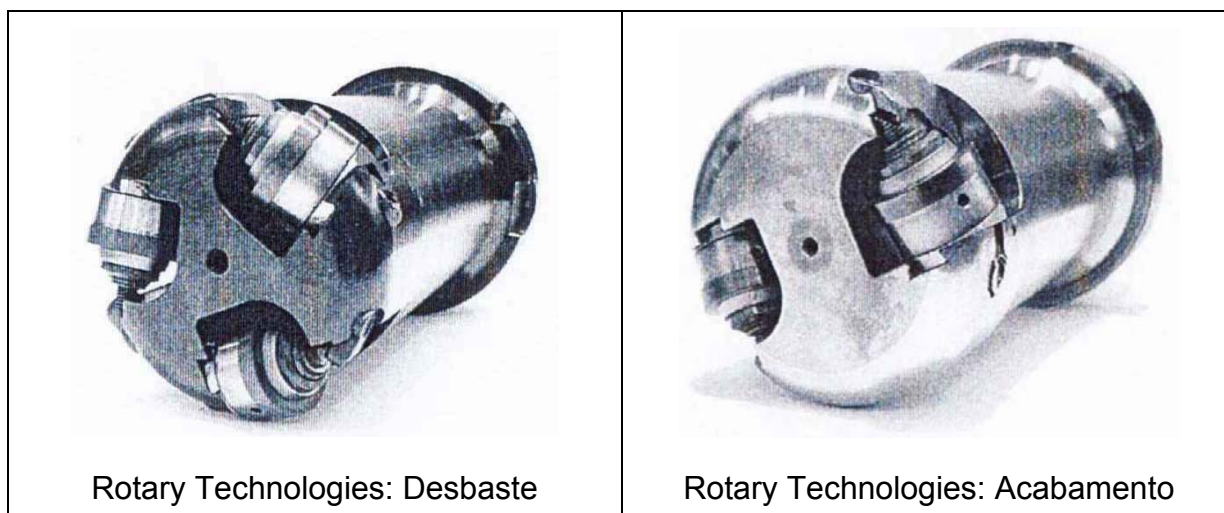


Figura 3.32: Ferramenta com insertos rotativos desenvolvida pela empresa Rotary Technologies (Reuter et al., 2000).

### c) “Freso-mandrillamento”

A terceira abordagem do processo de mandrilamento de cilindros tem sido desenvolvida pela empresa Sandvik-Coromant (2000). Está baseada na substituição do processo de corte contínuo por corte interrompido, executando a usinagem do cilindro através de um fresamento helicoidal, com uma ferramenta de diâmetro menor do que o cilindro.

A ferramenta, constituída de seis insertos de metal-duro recobertos, tem sido testada em velocidades de corte entre 150 e 200 m/min e velocidades de avanço entre 1.500 e 3.000 mm/min.

Todas as ferramentas de mandrilamento citadas acima mostraram a produtividade mínima de 800 cilindros, necessária nas linhas de produção atuais. Entretanto, os valores de tolerância alcançados ainda são um pouco piores dos obtidos com ferramenta com um único inserto de PCBN. No entanto, essas diferenças geométricas podem ser compensadas no brunimento.

## 3.8 Considerações finais

Nos itens 3.4 a 3.7 deste capítulo procurou-se reunir, de forma sintética, estudos e desenvolvimentos recentes relacionados à usinagem de ferros fundidos vermiculares disponíveis na literatura. Dentre todas as informações constantes,

destacam-se, à presente pesquisa, aquelas pertencentes ao item 3.5 – Fatores influentes na usinabilidade de vermiculares. Diversos efeitos mencionados nesse item, tais como da proporção de perlita, do teor de Mn, da quantidade de  $Fe_3C$  na perlita, do controle dos níveis de Ti, são confirmados pelos resultados obtidos dos testes de usinagem e pelas caracterizações das ligas em estudo.

## **4 METODOLOGIA, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS**

### **4.1 Metodologia**

No presente trabalho objetiva-se avaliar a usinabilidade do ferro fundido vermicular em relação ao ferro fundido cinzento. Pretende-se verificar a influência, na usinabilidade, de alguns parâmetros de fabricação do CGI, tais como quantidade de elementos perlitizantes e tempo de desmoldagem.

Antes de iniciar a usinagem, os materiais foram avaliados quanto a diversas características, tanto microestruturais, quanto a propriedades mecânicas e químicas, conforme mostrado no item 4.2.

A fim de aproximar os ensaios realizados com as operações normais de fabricação de blocos e cabeçotes de motores, optou-se pelo processo de furação, o qual é amplamente utilizado neste tipo de componente.

Os parâmetros de corte empregados, assim como os critérios de usinabilidade, foram definidos a partir de alguns ensaios preliminares, realizados em CGI.

Cada um dos corpos de prova, detalhados a seguir, permitiu a realização de 0,86 m de furação, que compreende o intervalo entre sucessivas medições de desgaste.

### **4.2 Caracterização dos materiais usinados**

#### **4.2.1 Geometria dos corpos de prova**

A geometria dos corpos de prova produzidos foi definida em função dos seguintes critérios:

- Semelhança microestrutural e de propriedades mecânicas com o material utilizado na fabricação de blocos e cabeçotes;
- Facilidade e qualidade de fixação dos corpos de prova durante a usinagem;
- Maximização do comprimento de furação em relação à quantidade de material fundido.



Com relação ao primeiro dos critérios citados acima, definiu-se uma espessura máxima de 30 mm, uma vez que esta é uma das maiores espessuras de parede encontrada nos blocos de motor. Espessuras maiores poderiam ter sido utilizadas, permitindo maiores comprimentos de furação por corpo de prova, no entanto, o material estaria sujeito a uma velocidade de resfriamento menor, alterando suas características.

Optou-se pela geometria cilíndrica por permitir uma fixação fácil e rápida à mesa da máquina-ferramenta, assim como ao dispositivo para medição de forças de corte, conforme mostrado no item 4.5.2.

A distribuição dos furos no corpo de prova determina o seu aproveitamento em termos de comprimento de furação. Há que se respeitar um certo distanciamento entre os furos, a fim de minimizar as influências de deformações e aquecimentos entre os furos. A geometria dos corpos de prova é mostrada na Figura 4.1.

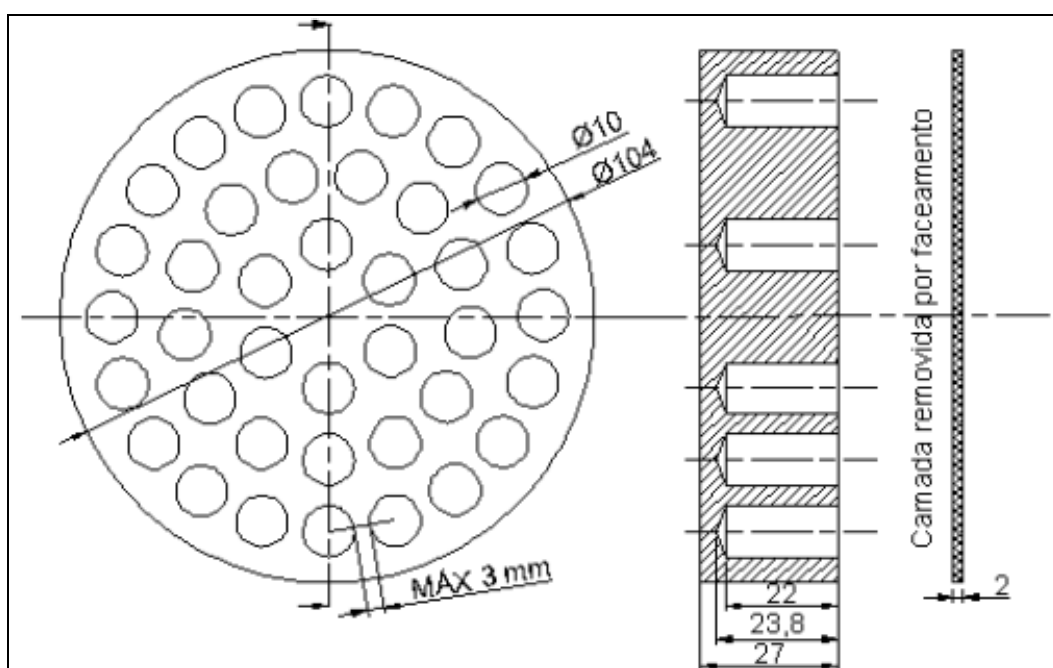


Figura 4.1: Geometria dos corpos de prova dos materiais usinados.

#### **4.2.2 Composição química e tempo de desmoldagem**

Os materiais utilizados no presente trabalho são o ferro fundido cinzento, FC-250, e 5 ligas experimentais de ferro fundido vermicular. Para se obter as

características microestruturais e de usinabilidade adequadas foram feitas variações tanto da composição química quanto do tempo de desmoldagem.

As composições base do cinzento e do vermicular produzidos encontram-se dentro das faixas recomendadas na literatura (ASM, 1996), mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição química dos materiais em estudo (ASM, 1996).

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Mg [%]	Cu <sub>eq</sub> <sup>6</sup> [%]
Cinzento	3,4 a 3,6	2,3 a 2,5	0,50 a 0,60	máx 0,065	0,05 a 0,12	–	0,70 a 0,90
Vermicular	3,1 a 4,0	1,7 a 3,0	0,1 a 0,6	máx 0,060	0,007 a 0,012	0,08 a 0,14	0,6 a 1,5

Inicialmente, antes da produção das seis ligas em estudo, foram produzidos alguns corpos de prova de vermicular, porém, na forma de barras de seção quadrada de 25 mm e 400 mm de comprimento. Devido a variáveis de fabricação e de geometria, este material não foi caracterizado e usinado da mesma maneira que os demais, mas apenas utilizado em ensaios preliminares, com o objetivo de definir os parâmetros de corte e verificar os tipos de desgaste predominantes nas brocas. Este material na forma de barras foi denominado de Vermicular 0.

Os demais materiais utilizados, foram designados pelos números de um a seis. Possuem uma ou mais características que os diferem entre si:

- **Vermicular 0:** Ferro fundido vermicular – na forma de barras (pré-ensaios);
- **Cinzento 1:** Ferro fundido cinzento – FC-250; 8 h desmoldagem;
- **Vermicular 2:** Ferro fundido vermicular – 1,4% Cueq (alto Mn); 8 h desmoldagem;
- **Vermicular 3:** Ferro fundido vermicular – 0,6% Cueq; 20 min desmoldagem;

6. O cobre equivalente representa a quantidade de elementos formadores de perlita. Para o ferro fundido cinzento, Cu<sub>eq</sub> = Cu + 10.Sn [%]; para o ferro fundido vermicular, Cu<sub>eq</sub> = Cu + 10.Sn + 0,5.Mn + 1,2.Cr [%].

- **Vermicular 4:** Ferro fundido vermicular – 1,2% Cueq; 20 min desmoldagem;
- **Vermicular 5:** Ferro fundido vermicular – 1,2% Cueq; 2 h desmoldagem;
- **Vermicular 6:** Ferro fundido vermicular – 1,4 a 1,5% Cueq; 2 h desmoldagem.

As denominações **Cinzento 1<sub>2</sub>** e **Vermicular 3<sub>2</sub>** referem-se ao segundo lote dos materiais Cinzento 1 e Vermicular 3, respectivamente.

As variações nos teores de Mn e Cu<sub>eq</sub> foram feitas no intuito de obter materiais com diferentes proporções de perlita. O Vermicular 2 possui cobre equivalente semelhante ao Vermicular 6, porém, difere por possuir um maior teor de manganês (0,42%), o que lhe garante uma maior proporção de perlita. O tempo de desmoldagem, isto é, o tempo compreendido entre o vazamento e remoção do molde, dos materiais 1 e 2 é de 8 horas. Já os demais, tiveram seus tempos de desmoldagem variando entre 20 min e 2 horas, para a obtenção de materiais com diferentes tipos de perlita, ou seja, perlitas com maior ou menor quantidade de Fe<sub>3</sub>C.

#### **4.2.3 Análise microestrutural**

Todos os materiais usinados foram caracterizados através de análises microestruturais. De cada lote de corpos de prova foi retirada uma peça, a qual foi seccionada em duas partes semicirculares. As análises ao microscópio foram feitas em uma das partes semicirculares, na superfície cortada. Através de fotos das amostras polidas foram avaliados os tipos de grafita, a percentagem de grafita nodular e vermicular. A mesma amostra, após ataque com nital 2%, foi utilizada na quantificação das percentagens de perlita e grafita.

As fotos foram obtidas com uma câmera digital acoplada a um microscópio óptico modelo *Optiphot*, marca *Nikon*, com aumento máximo de 1.000x. As imagens geradas foram tratadas com o software *Image-pro Plus versão 5.1*, produzido pela Empresa *Media Cybernetics*.

Os resultados das análises de imagem estão mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Caracterização dos materiais através de análises de imagens.

		Propriedades					
		% vermicular	% nodular	Forma da grafita	% perlita	% ferrita	Largura região de grafita lamelar (mm)
Materiais	Verm. 0 (barras)	57	43	Forma III e VI	58	42	—
	Cinzeno 1 (1º lote)	Lamelar	Lamelar	Forma I, tipo A,	97	3	—
	Cinzeno 1 <sub>2</sub> (2º lote)	Lamelar	Lamelar	Forma I, tipo A,	100	0	—
	Verm. 2	64	36	Forma III e VI	99	1	N/D
	Verm. 3 (1º lote)	89	11	Forma III e VI	39	61	0,26
	Verm. 3 <sub>2</sub> (2º lote)	71	29	Forma III e VI	28	72	0,23
	Verm. 4	92	8	Forma III e VI	84	16	0,29
	Verm. 5	91	9	Forma III e VI	89	11	0,5
	Verm. 6	86	14	Forma III e VI	90	10	0,58

As Figuras 4.2 a 4.10 mostram algumas micrografias dos materiais usados, obtidas ao microscópio óptico, com aumento de 100x. Algumas das imagens aqui apresentadas podem, aparentemente, divergir das análises quantitativas da Tabela 4.2, uma vez que as medições representam uma média de várias regiões da amostra.

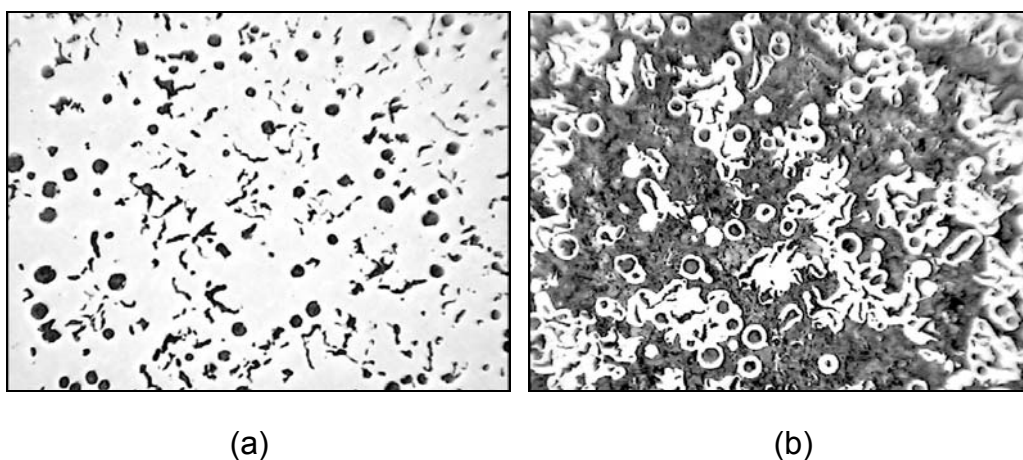
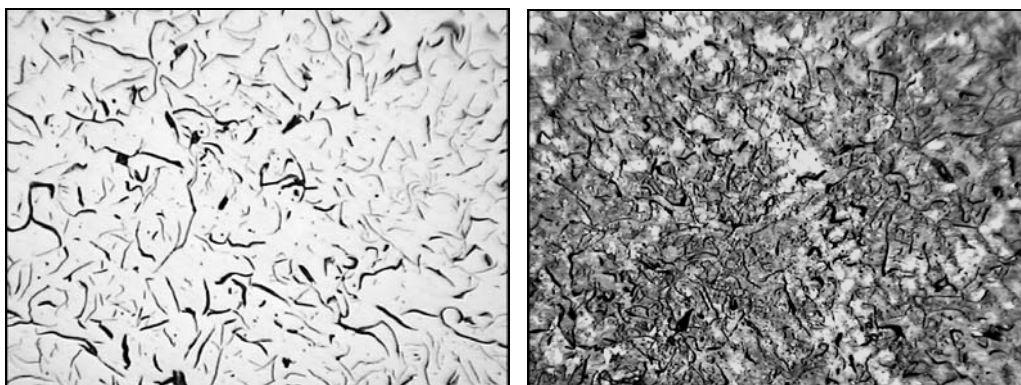


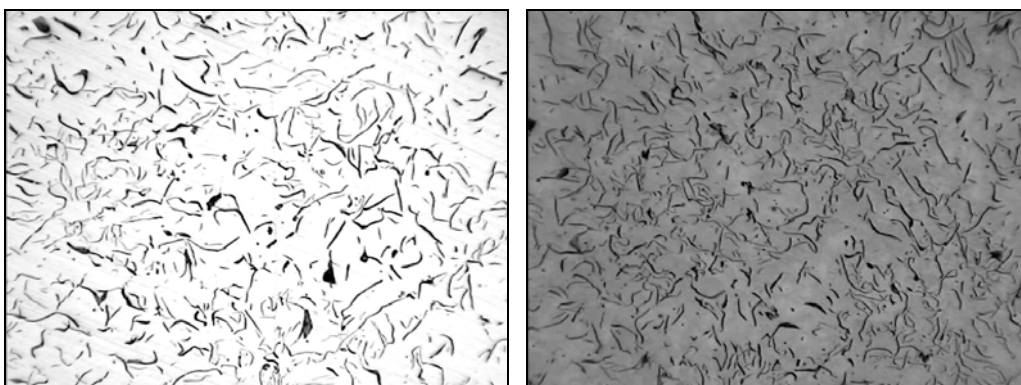
Figura 4.2: Micrografias do ferro fundido Vermicular 0 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x.



(a)

(b)

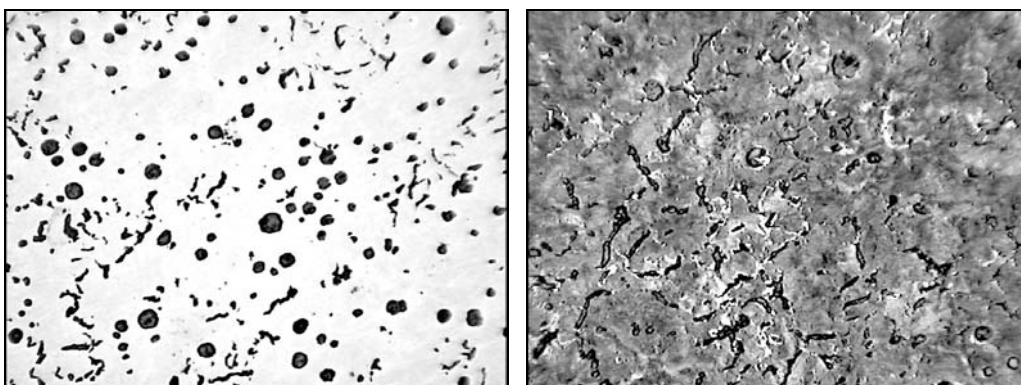
Figura 4.3: Micrografias do ferro fundido Cinzento 1 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x.



(a)

(b)

Figura 4.4: Micrografias do ferro fundido Cinzento 1<sub>2</sub> (2º lote) sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x.



(a)

(b)

Figura 4.5: Micrografias do ferro fundido Vermicular 2 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x.

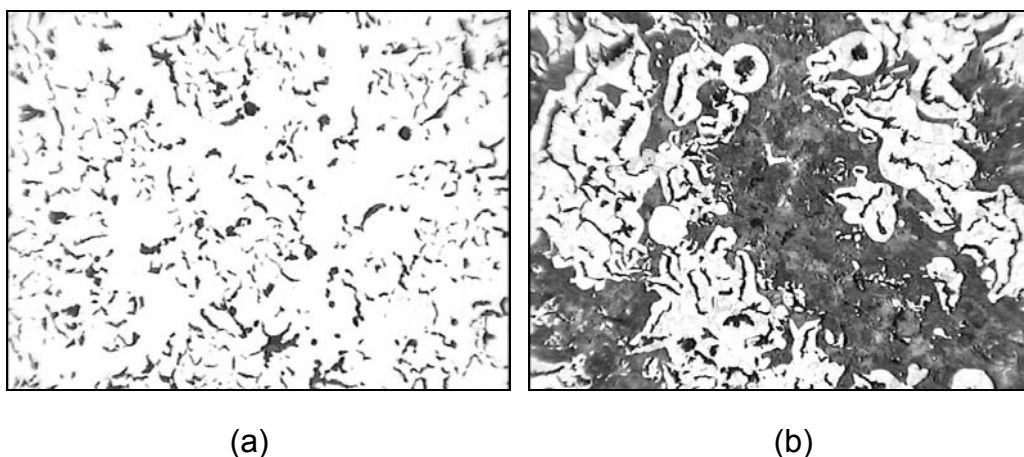


Figura 4.6: Micrografias do ferro fundido Vermicular 3 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x.

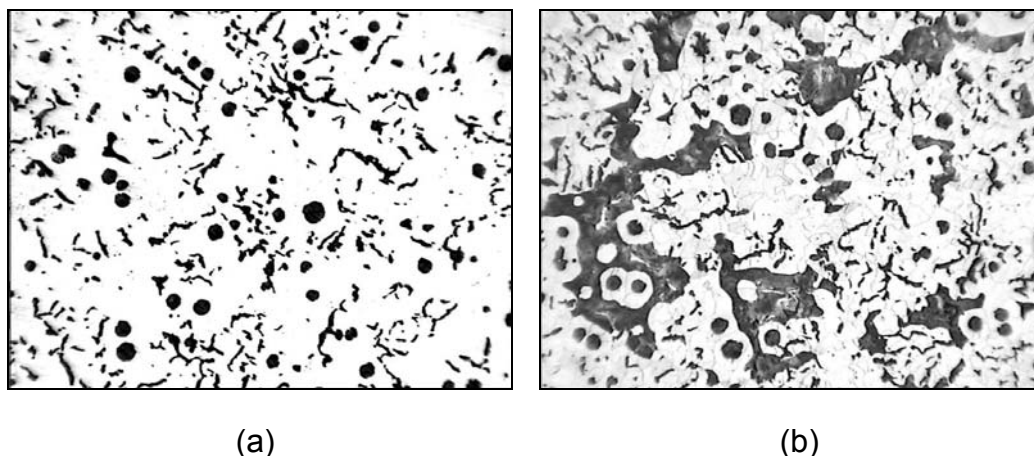


Figura 4.7: Micrografias do ferro fundido Vermicular 3<sub>2</sub> (2<sup>o</sup> lote) sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x.

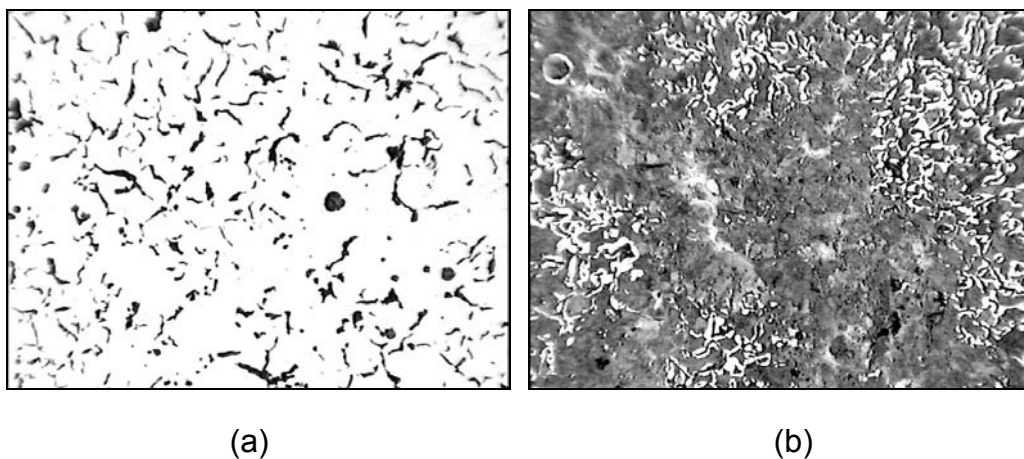


Figura 4.8: Micrografias do ferro fundido Vermicular 4 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x.

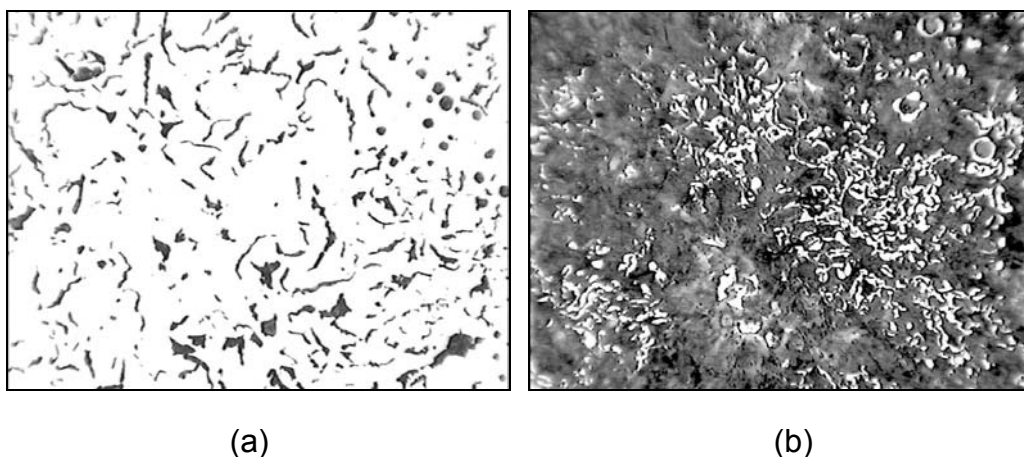


Figura 4.9: Micrografias do ferro fundido Vermicular 5 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x.

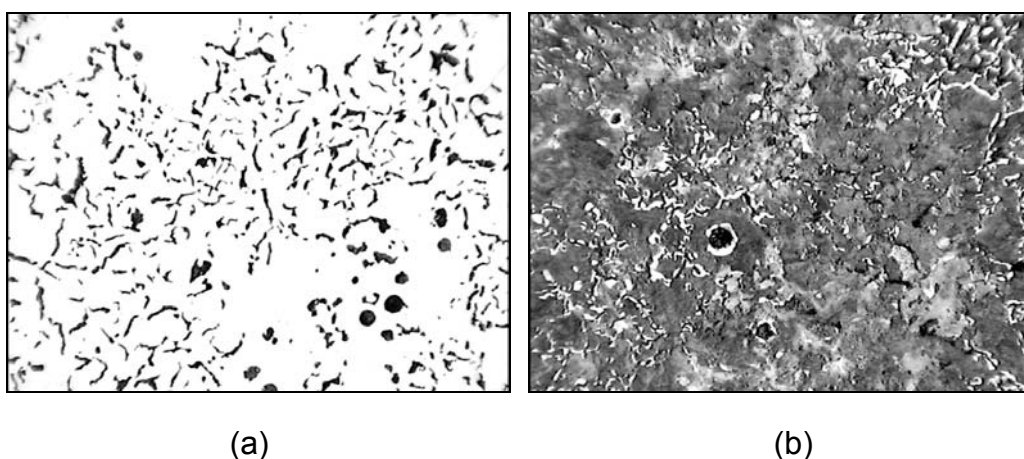


Figura 4.10: Micrografias do ferro fundido Vermicular 6 sem ataque (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x.

As imagens de microscopia óptica permitiram a determinação da proporção de perlita nas amostras. Entretanto, não puderam suprir a necessidade de caracterização dos tipos de perlita, devido ao seu refinamento.

A caracterização da perlita no presente trabalho se faz necessária, pois se sabe que esta pode influenciar significativamente na usinabilidade do material. De acordo com Dawson et al. (1999), variações nos tempos de desmoldagem das peças e alterações nos teores de elementos perlitizantes podem gerar perlitas com características diferentes entre si. Os tempos de desmoldagem maiores tendem a

gerar perlitas com menor quantidade de cementita, ou seja, lamelas mais distanciadas e finas, talvez segmentadas, conforme discutido no item 4.2.2.a).

As caracterizações dos tipos de perlita foram feitas através de imagens de microscopia eletrônica de varredura, com aumentos de 5.000x, nos materiais 3, 4, 5 e 6. Foram fotografadas 10 regiões perlíticas de cada amostra, tomadas aleatoriamente. O objetivo inicial de quantificar a proporção de cementita não foi atingido, pois as imagens não são claras o suficiente. Variáveis como a profundidade de ataque químico, inclinação das lamelas em relação ao corte, diferenças de ajuste de contraste entre as fotos, dificultam a caracterização através de análise de imagem. As fotos, entretanto, são úteis como um referencial qualitativo. Algumas imagens obtidas são mostradas nas Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14.

A partir destas e de outras micrografias, observa-se que o Vermicular 4 possui a perlita com maior quantidade de cementita dentre todos, com lamelas de cementita espessas e próximas umas das outras. O Vermicular 5, que se diferencia do Vermicular 4 apenas no tempo de desmoldagem, possui um espaçamento maior entre as lamelas de cementita, as quais apresentam menor espessura e muitas descontinuidades. É o material com menor proporção de  $Fe_3C$  na perlita.

Os materiais 3 e 6, apesar de possuírem diferenças tanto na composição, quanto no tempo de desmoldagem, são constituídos por perlitas aparentemente semelhantes, intermediárias entre os materiais 4 e 5.

#### **4.2.4 Determinação da dureza**

Os materiais foram caracterizados através de ensaios de dureza Brinell. Utilizou-se um durômetro da marca Wolpert, modelo LVPA / BK 300, carga máxima de 4.000 kgf. As indentações foram feitas com esfera de 5 mm de diâmetro, carga de 7.355 N e medidas através de lupa, com a menor divisão de escala de 0,05 mm. Os valores de dureza da Tabela 4.3 são a média de 3 medições.



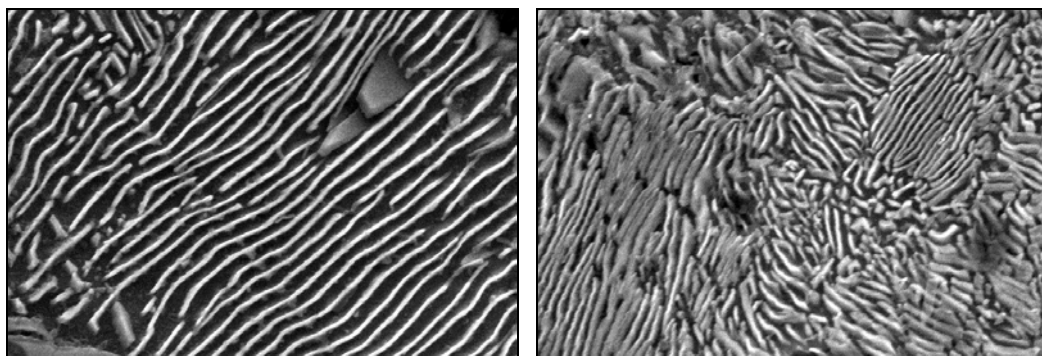


Figura 4.11: Perlita do Vermicular 3. MEV 5.000x. Nital 2%.

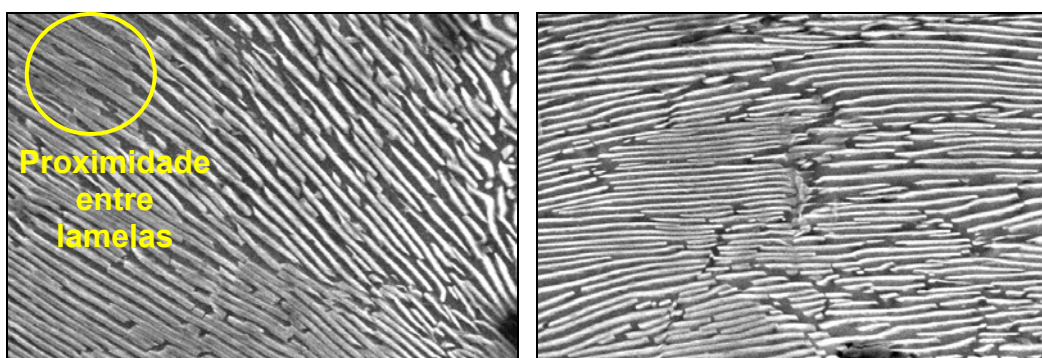


Figura 4.12: Perlita do Vermicular 4. MEV 5.000x. Nital 2%.

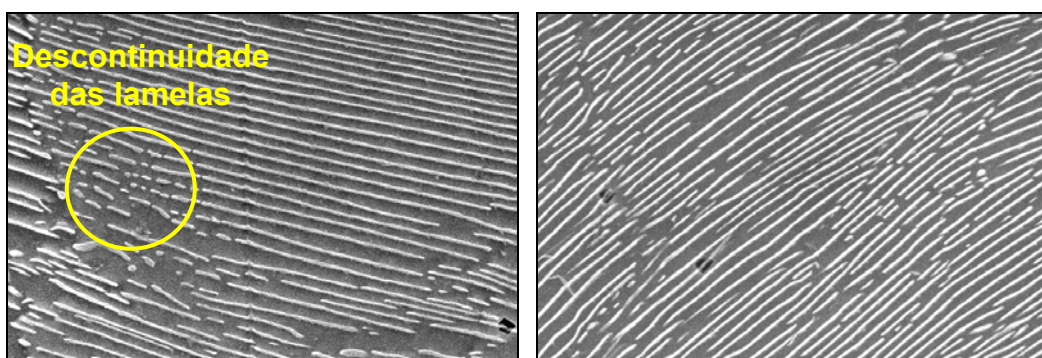


Figura 4.13: Perlita do Vermicular 5. MEV 5.000x. Nital 2%.

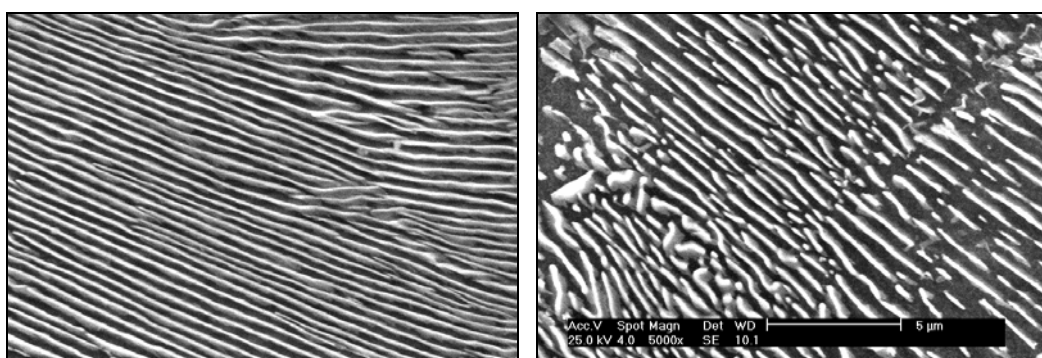


Figura 4.14: Perlita do Vermicular 6. MEV 5.000x. Nital 2%.

Tabela 4.3: Dureza Brinell média das amostras usinadas [HB].

Materiais:	Verm. 0	Cinz. 1	Cinz. 1 <sub>2</sub>	Verm. 2	Verm. 3	Verm.3 <sub>2</sub>	Verm. 4	Verm. 5	Verm. 6
Dureza média:	250	214	223	229	173	163	237	229	229
Desvio padrão amostra:	8,08	5,77	6,57	0,00	5,20	0,00	6,93	0,00	0,00

#### 4.2.5 Resistência mecânica

Uma peça de cada lote foi retirada e devidamente preparada para o ensaio de tração. O corpo de prova de ferro fundido cinzento foi preparado de acordo com a norma DIN EN 1561; já os vermiculares, de acordo com a norma NBR 6916. Utilizou-se uma máquina de tração universal, com capacidade para até 500 kN, fabricada pela empresa KRATOS. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resistência mecânica dos materiais usinados.

Propriedade	Cinzento 1	Cinzento 1 <sub>2</sub>	Verm. 2	Verm. 3	Verm. 3 <sub>2</sub>	Verm. 4	Verm. 5	Verm. 6
$\sigma_e$	---	—	401	270	278	347	N/D	351
$\sigma_r$	267	223	551	362	354	487	N/D	470

#### 4.3 Caracterização das brocas

As brocas de metal-duro utilizadas nos ensaios são da marca WALTER. Esta empresa foi selecionada por ser um dos atuais fornecedores da Tupy Fundições, a responsável pela aquisição das ferramentas. Foram adquiridas, inicialmente, 14 brocas de 10 mm de diâmetro e 103 mm de comprimento, todas pertencentes a um mesmo lote de fabricação, com as quais foram usinados todos os tipos de material, a fim de evitar diferenças de performance. Porém, existiu a necessidade de aquisição de uma broca adicional, pertencente, portanto, a um outro lote de fabricação, a qual foi utilizada na usinagem do segundo lote de Vermicular 3. Devido à indisponibilidade de uma broca de 10,0 mm, adquiriu-se a última broca com diâmetro

de 9,9 mm, o que foi compensado por um pequeno ajuste de rotação e avanço da máquina-ferramenta.

As ferramentas, de código B1422.Z.10,0.Z2.49 (Walter, 2000), exemplificadas na Figura 4.15, são inteiriças de metal-duro classe K35, possuem recobrimento de TiAlN monocamada (3.000 HV) e geometria de acordo com a DIN 6537, corte à direita, série longa. Os principais ângulos da broca são:

- Ângulo de ponta:  $\sigma = 140^\circ$ ;
- Ângulo de incidência:  $\alpha = 8^\circ$ ;
- Ângulo de hélice:  $\delta = 30^\circ$ ;
- Ângulo do gume transversal:  $\psi = 34^\circ$ .

Apesar de possuírem furos para refrigeração interna, as brocas foram utilizadas sem o uso de fluido, uma vez que a máquina-ferramenta não era equipada com os dispositivos especiais necessários para tal. Ressalta-se que o fabricante não possui um modelo de broca semelhante, com o mesmo recobrimento e sem furos para refrigeração. No entanto, o mesmo afirma que a presença dos furos não compromete o desempenho da ferramenta quando utilizada sem fluido de corte. Independente disso, as ferramentas foram utilizadas em ensaios comparativos, e possíveis perdas de desempenho devido à presença dos canais de refrigeração estariam presentes em todos os ensaios.

A broca possui duas afiações especiais de ponta: “redução do gume transversal” e “afiação cruzada”, ambas com o objetivo de reduzir a influência negativa do gume transversal, conforme mostrado no item 3.2.2.a), permitindo a utilização de maiores avanços.



Figura 4.15: Foto de uma das brocas utilizadas nos ensaios.

#### 4.4 Critério de fim de vida utilizado

Para a definição do critério de fim de vida, inicialmente foram medidos os desgastes de flanco, das guias e a largura do desgaste de cratera, conforme mostrado nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18, respectivamente. Verificou-se que o melhor critério de acompanhamento era o desgaste de flanco ( $VB_{max}$ ), descrito no item 3.3.1.a), pois ao longo da furação, apresenta um crescimento continuado, diferente do desgaste de cratera, que se estabilizou nos primeiros metros de furação. O fim de vida das brocas é dado por um desgaste de flanco máximo igual a 0,40 mm, equivalente à largura da guia da broca.



Figura 4.16: Desgaste de flanco em broca utilizada na usinagem do Vermicular 2.

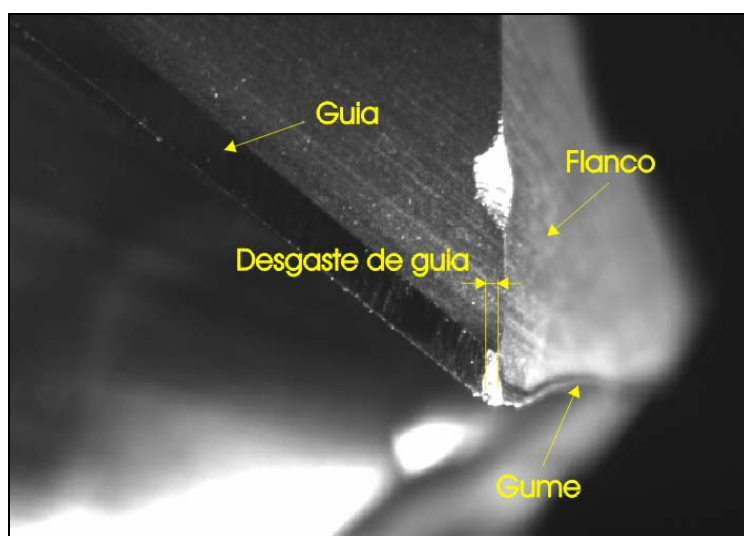


Figura 4.17: Desgaste de guia em broca utilizada na usinagem do Vermicular 2.

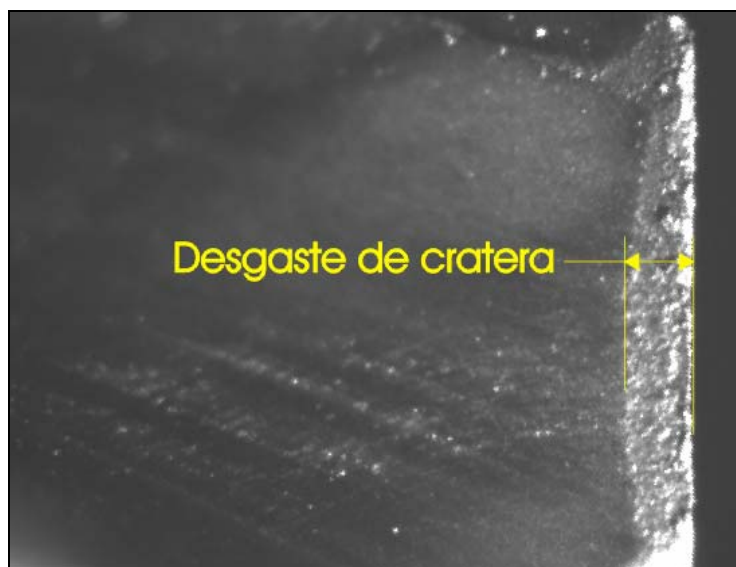


Figura 4.18: Desgaste de cratera em broca utilizada na usinagem do Vermicular 2.

#### 4.5 Ensaios de usinagem

Nos experimentos realizados, o objetivo principal não foi o de verificar a influência da velocidade de corte e avanço na usinagem, mas fazer uma avaliação comparativa da usinabilidade de algumas ligas. Para tanto foram realizados alguns ensaios iniciais no ferro fundido vermicular a fim de selecionar uma velocidade de corte e um avanço adequados para a realização dos demais ensaios. Estes parâmetros foram escolhidos com o objetivo de manter a vida das brocas entre, aproximadamente, 10 e 20 metros de furação, a fim de construir curvas comparativas, sem tornar o ensaio excessivamente longo, porém, dentro de uma faixa de aplicação industrial. Nessa fase de ensaios preliminares procurou-se definir os tipos de desgaste predominantes nas brocas, e quais seriam utilizados para quantificar a vida da ferramenta. Como resultado, obteve-se que os parâmetros adequados seriam  $v_c = 80$  m/min e  $f = 0,25$  mm e que a vida seria quantificada através do desgaste de flanco  $VB_{max}$ . A Figura 4.19 mostra um esquema de todos os ensaios de furação realizados.

Em uma segunda etapa foram feitos os ensaios de desgaste. Na Figura 4.19 pode-se observar que foram feitos três ensaios com o Vermicular 2, enquanto outros materiais foram avaliados com apenas um experimento ou dois. Isto deve-se ao fato de que, inicialmente, havia a intenção de estudar apenas 3 ou 4 materiais distintos, empregando-se dois ou três experimentos para cada material. Procedendo-se os

três ensaios com o Vermicular 2, verificou-se uma repetibilidade excelente. Desse modo, decidiu-se ampliar o campo de estudo para seis materiais, reduzindo-se o número de repetições. Apenas em outros dois materiais houve a necessidade de repetir os experimentos: no Vermicular 3, devido a uma quebra nas quinas da ferramenta durante o ensaio; e no Cinzento 1, para garantir a qualidade do resultado, uma vez que não haviam sido feitos outros experimentos em cinzento.

Na terceira etapa mostrada na Figura 4.19, os ensaios de forças de corte. O procedimento é detalhado no item 4.6.

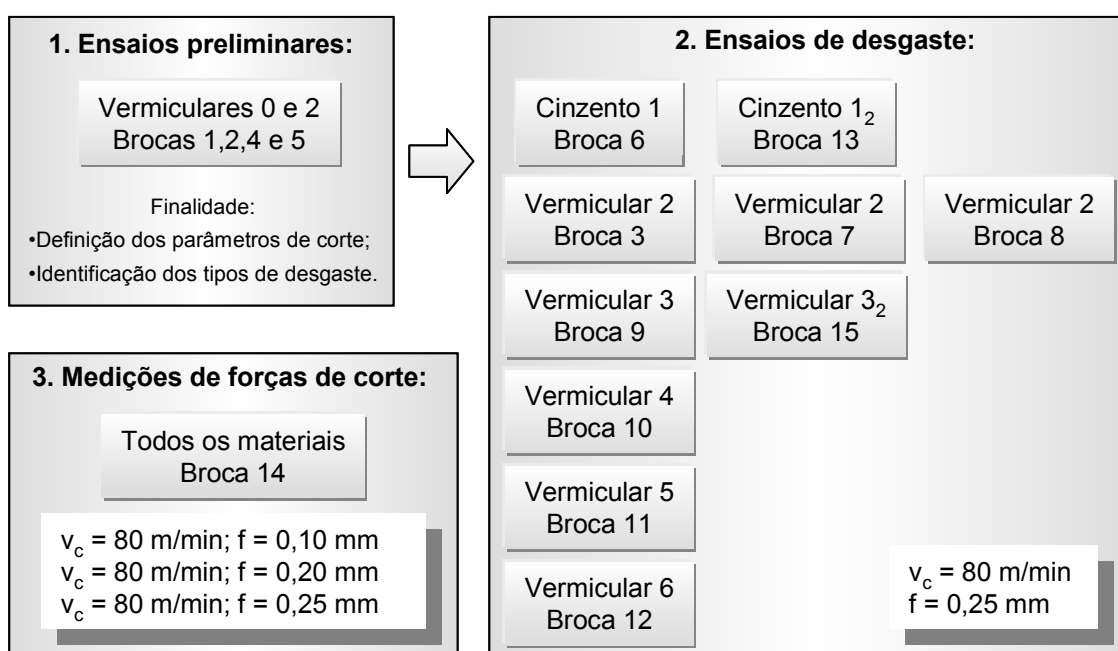


Figura 4.19: Ensaios de furação realizados.

Onde:

- Vermicular 0: Ferro fundido vermicular na forma de barras;
- Cinzento 1: Ferro fundido cinzento FC-25 (referência);
- Vermicular 2: Ferro fundido vermicular com alto Mn;
- Vermicular 3: Ferro fundido vermicular ( $Cu_{eq} = 0,6\%$ ; 20 min para desmoldagem);
- Vermicular 4: Ferro fundido vermicular ( $Cu_{eq} = 1,2\%$ ; 20 min para desmoldagem);

- Vermicular 5: Ferro fundido vermicular ( $Cu_{eq} = 1,2\%$ ; 2 h para desmoldagem);
- Vermicular 6: Ferro fundido vermicular ( $Cu_{eq} = 1,4$  a  $1,5\%$ ; 2 h para desmoldagem).

#### 4.5.1 Parâmetros de corte utilizados

A velocidade de corte e avanço iniciais foram definidos a partir do catálogo da ferramenta, para ferro fundido nodular perlítico, uma vez que não haviam sugestões de condições de corte para CGI. Contudo, na usinagem do Vermicular 0, nestas condições, a ferramenta apresentou um desgaste prematuro. Outras velocidades de corte e avanço foram testados nos vermiculares 0 e 2, conforme os dados apresentados de forma sintetizada na Tabela 4.5. A seqüência temporal de experimentos segue a numeração das brocas. A velocidade de 80 m/min foi selecionada, pois velocidades menores ocasionariam vidas de ferramenta excessivas, principalmente no ferro fundido cinzento.

Tabela 4.5: Ensaio preliminares para definição de parâmetros de corte.

<i>Material</i>	<i>Número da broca</i>	$v_c$ [m/min]	$f$ [mm]	<i>Vida</i> [m]
Vermicular 0	Broca 1	100	0,315	0,8
	Broca 2	60	0,315	4,0
	Broca 5	<b>80</b>	<b>0,25</b>	2,6
Vermicular 2	Broca 3	<b>80</b>	<b>0,25</b>	10,3
	Broca 4	100	0,25	5,1

A profundidade de furação, de 2,2 vezes o diâmetro, foi definida em função da geometria dos corpos de prova. Optou-se pela realização de furos cegos com o objetivo de evitar a instabilidade à qual a broca estaria sujeita na saída do furo, além de evitar necessidade da remoção da camada externa na parte posterior do corpo de prova.

#### 4.5.2 Fixações de peça e ferramenta

##### a) Fixação da ferramenta

Na fixação das brocas à máquina-ferramenta, procurou-se minimizar sua oscilação (batimento). Nos ensaios com as brocas 1 e 2, utilizou-se um mandril porta-pinça, no qual a ferramenta apresentou tendência a girar em relação ao mandril. Optou-se por utilizar um mandril hidráulico, da marca Mapal, código Ø10 sc 0799, fornecido pela Tupy Fundições. Este tipo de mandril, além de permitir a aplicação de um torque mais elevado à ferramenta, gera uma oscilação menor, melhorando as condições de trabalho da broca, reduzindo o desgaste. A oscilação da broca montada na fresadora em que foram conduzidos os ensaios, com mandril hidráulico, foi medida e se manteve entre 16 e 20  $\mu\text{m}$ .

##### b) Fixação dos corpos de prova

Os corpos de prova do Vermicular 0, na forma de barras, foram fixados por uma morsa. Já os corpos de prova cilíndricos, foram fixados à mesa da máquina através de uma placa de três castanhas, garantindo melhor rigidez e agilidade na troca de peças, conforme Figura 4.20.

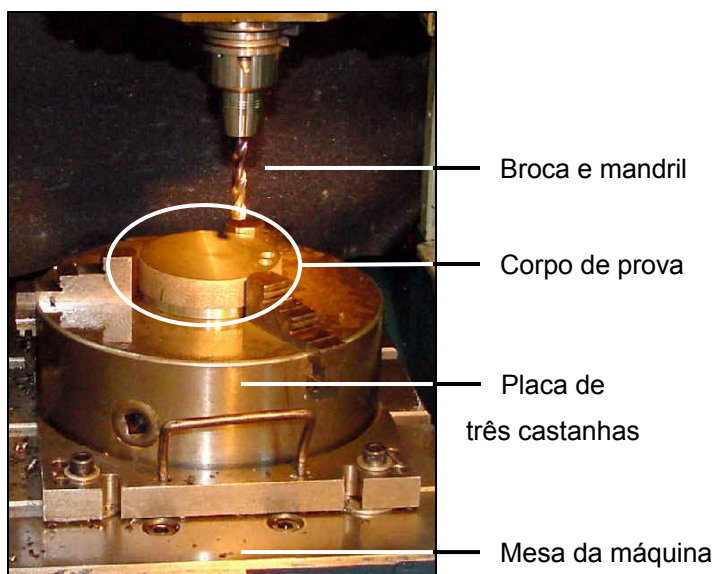


Figura 4.20: Foto do sistema de fixação dos corpos de prova.



### 4.5.3 Máquina-ferramenta

Os ensaios de furação foram realizados em uma fresadora vertical CNC, 3 eixos, da marca *ROMI* modelo Polaris F400, mostrada na Figura 4.21, instalada nas dependências do Laboratório de Mecânica de Precisão – UFSC.



Figura 4.21: Máquina-ferramenta utilizada nos ensaios de furação (a); mesa da máquina (b).

### 4.6 Medição de forças

As medições das forças de corte foram realizadas a partir de um sistema, mostrado na Figura 4.22, constituído basicamente por:

- Uma plataforma piezelétrica da *Kistler Instrumente*, modelo 9273, que permite aquisição de sinais nas direções X, Y,Z e de momento torçor;
- Dois amplificadores de sinal da *Kistler Instrumente*, modelo 5011;
- Uma placa de aquisição de dados da *National Instruments*, modelo SCB-68;
- Um microcomputador, dotado de um software dedicado à aquisição de dados denominado *Diadem*.

Sobre a mesa da máquina foi montada a plataforma piezelétrica e sobre esta uma placa de três castanhas na qual os corpos de prova foram fixados. Foram

medidos o momento torçor e a força na direção vertical, ou seja, a força de avanço da broca. A plataforma foi calibrada para medir forças de avanço entre 0 e 5.000 N, e momentos torçores entre 0 e 10 N.m, com erros menores do que 1% na faixa de medição utilizada.

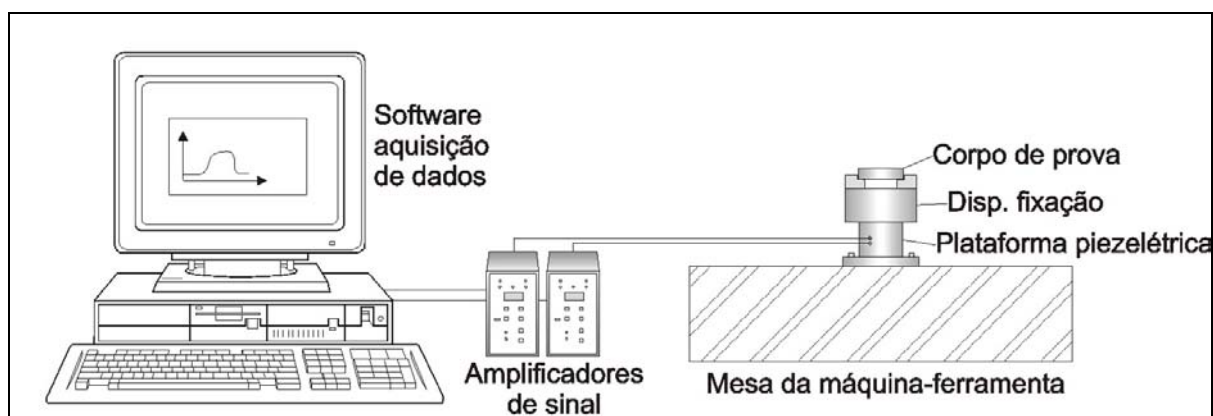


Figura 4.22: Foto da bancada utilizada na medição de forças.

Para viabilizar a leitura do sinal gerado na plataforma piezelétrica, que é da ordem de 10 pC/N, foram empregados os dois amplificadores de sinal, um para cada sinal de força. Depois de amplificados, os sinais passaram pela placa de aquisição e foram gravados no computador, com o auxílio do software, através do qual definiu-se a frequência de aquisição de dados de 100 Hz e o tempo de aquisição de 5 s.

Em um dos ensaios realizados no Vermicular 2, foram feitas diversas medições de forças no decorrer do experimento, a fim de verificar a correlação das forças com o desgaste da ferramenta.

Para a análise comparativa entre os materiais adotou-se uma estratégia diferente, que consistiu em medir as forças de corte em todos os materiais utilizando-se apenas uma broca. Em cada material foram realizados 3 furos para medição da força de avanço e outros 3 furos para avaliar os momentos torçores. Os corpos de prova foram alternados a cada medição, minimizando a influência do desgaste da broca nos resultados. Verificou-se que a adesão nos gumes das ferramentas gera diferenças significativas nos valores de momento, o que levou à necessidade de remover manualmente a adesão antes de cada medição. Essas medições foram feitas com  $v_c = 80$  m/min e  $f = 0,20$  mm.

Para a definição das pressões específicas de corte e avanço,  $k_{c1.1}$  e  $k_{f1.1}$ , foram realizadas medições de forças com avanços de 0,10 mm e 0,25 mm.

#### 4.7 Medição do desgaste

As medições de desgaste foram realizadas em um microscópio de ferramentaria Nikon, com aumento de 30x, dotado de uma mesa com escala micrométrica. O parâmetro de desgaste acompanhado foi o  $VB_{max}$ . Uma vez que o gume se desgasta, deve-se tomar um ponto de referência para avaliar o desgaste de flanco. O ponto de referência foi definido como a parte posterior da guia, pertencente ao plano do flanco principal, conforme a Figura 4.23. O desgaste  $VB_{max}$  da broca é dado pela média de desgaste dos dois gumes.

As medições, realizadas ao microscópio, poderiam ter sido feitas através das fotos das brocas que retratam o desgaste. No entanto, para o tipo de desgaste observado, os resultados obtidos com o microscópio se mostraram mais confiáveis.

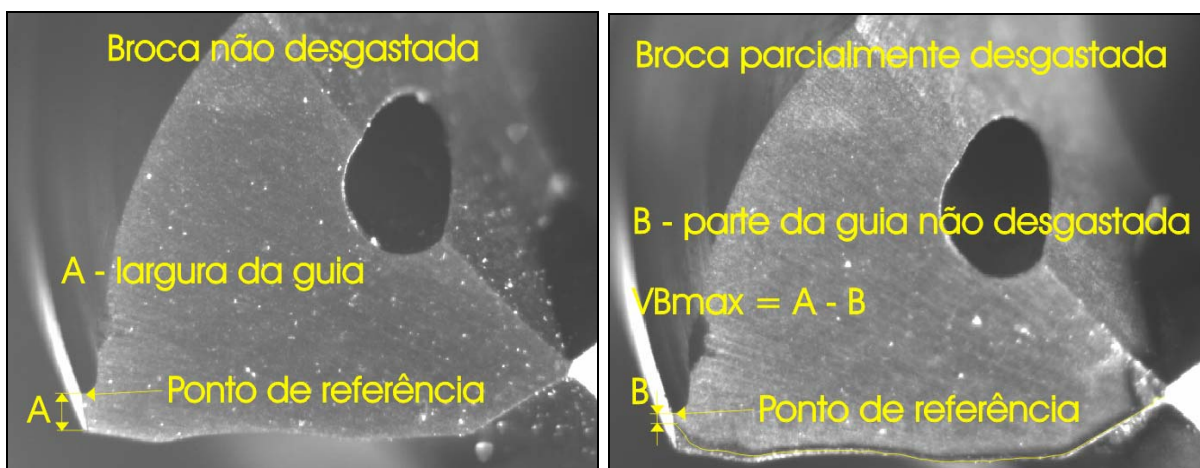


Figura 4.23: Forma de medição do desgaste de flanco máximo ( $VB_{max} = A - B$ ).

#### 4.8 Aquisição de fotos

Foram registradas fotos dos gumes e das faces das brocas a cada troca de corpo de prova, ou seja, a cada 39 furos ou 0,86 m de furação. Inicialmente, as fotos foram utilizadas para monitorar os possíveis desgastes que poderiam ocorrer na ferramenta, sendo registradas fotos de flancos, faces, guias e gume transversal. Posteriormente, passaram a ser monitorados apenas os flancos das ferramentas. O comprimento do desgaste de cratera,  $K_b$ , foi avaliado através das fotos das faces. Já

as fotos dos flancos foram utilizadas apenas para um acompanhamento qualitativo do desgaste e de lascamentos dos gumes, uma vez que o  $VB_{\max}$  foi medido através do microscópio.

A Figura 4.24 ilustra o sistema utilizado na aquisição de fotos com câmera digital marca *Pulnix*, modelo *TM-7CM* auxiliada pelo software *Matrox Intellicam Interactive versão 2.0*.

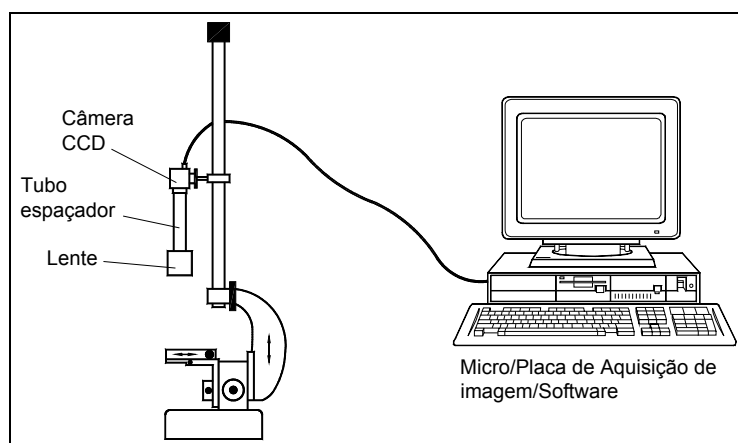


Figura 4.24: Sistema utilizado na aquisição de fotos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Resumo das características dos materiais em estudo

A caracterização dos ferros fundidos em estudo, que compreende análises de imagem de microestruturas, ensaios de tração e medições de dureza, foi detalhada no item 4.2, no qual foram inseridos os resultados das caracterizações. A Tabela 5.1 apresenta uma síntese desses resultados para que os materiais possam ser comparados com maior facilidade.

Tabela 5.1: Síntese das propriedades dos materiais.

Materiais	Parâmetros de fabricação	Forma da grafita	Teor perlita [%]	Espessura Lamelas Fe <sub>3</sub> C	Dureza [HB]	Classe
Cinzeno 1 (1º lote)	Padrão FC-25; 8 h	100% lamelar	97	N/D	214	250
Cinzeno 1 <sub>2</sub> (2º lote)	Padrão FC-25; 8 h	100% lamelar	100	N/D	223	250
Vermicular 2	1,4%Cu <sub>eq</sub> (alto Mn); 8h	36% nodular	99	N/D	229	550
Vermicular 3 (1º lote)	0,6% Cu <sub>eq</sub> ; 20 min	11% nodular	39	Média	173	350
Vermicular 3 <sub>2</sub> (2º lote)	0,6% Cu <sub>eq</sub> ; 20 min	29% nodular	28	N/D	163	350
Vermicular 4	1,2% Cu <sub>eq</sub> ; 20 min	08% nodular	84	Espessa	237	450
Vermicular 5	1,2% Cu <sub>eq</sub> ; 2 h	09% nodular	89	Fina	229	450
Vermicular 6	1,4 a 1,5% Cu <sub>eq</sub> ; 2 h	14% nodular	90	Média	229	450

Os materiais 1 e 2 possuem o tempo de desmoldagem mais elevado dentre todos, sendo de 8 h. O Vermicular 2 possui 36% de grafita nodular, o que caracteriza uma proporção relativamente elevada em relação aos demais e em relação aos vermiculares normalmente produzidos, que possuem menos de 30% de nódulos. Ambos possuem as maiores proporções de perlita, sendo quase totalmente

perlíticos. A resistência mecânica revela a grande vantagem na utilização de vermicular que, além da maior resistência mecânica, apresenta um comportamento mais dúctil.

A proporção de grafita nodular, e conseqüentemente de vermicular, dos demais materiais é bastante semelhante, uma vez que todos possuem a mesma quantidade de elementos nodulizantes.

A alteração do teor de elementos perlitizantes de 0,6 para 1,2% dos vermiculares 3 e 4 ocasionou um incremento de 45% na proporção de perlita, o que pode explicar o aumento de dureza de 173 para 237 HB.

Os vermiculares 4 e 5 possuem as mesmas composições químicas e praticamente a mesma percentagem de nódulos de grafita. O Vermicular 5 possui 5% a mais de perlita, porém apresenta uma dureza um pouco inferior. Vale lembrar que nas fotos de microscopia eletrônica o Vermicular 4 apresentou a perlita com maior proporção de  $Fe_3C$  e o Vermicular 5, a menor, o que pode ter se refletido na diferença de dureza. Devido à indisponibilidade de corpos de prova de Vermicular 5 com as dimensões especificadas pela norma para o ensaio de tração, a resistência mecânica do material não foi medida.

O Vermicular 6 difere do 5 por conter 0,3% a mais de perlitizantes, no entanto ambos possuem praticamente a mesma quantidade de perlita. Com a precisão do equipamento de medição de dureza utilizado, todas as indentações em ambos os materiais resultaram em 229 HB.

## **5.2 Resultados dos ensaios de usinabilidade: critério desgaste da ferramenta**

Os resultados obtidos nos ensaios de usinagem serão divididos em duas partes:

- Resultados dos ensaios de desgaste (item 5.2), que consideram como critério de final de vida o desgaste de flanco  $VB_{max}$  igual a 0,40 mm;
- Resultados dos ensaios de forças (item 5.3), que compreendem as medições de forças de avanço ( $F_f$ ) e momento torçor ( $M_t$ ).

### 5.2.1 Efeito da variação da velocidade de corte

O escopo do presente trabalho não compreende a otimização das condições de furação de vermiculares, no entanto, alguns testes foram conduzidos com o intuito de definir condições de corte adequadas. Dados gerados em testes com o Vermicular 2 nas velocidades de corte de 80 m/min e 100 m/min são apresentados na Figura 5.1. Tais informações são muito raras e importantes para os ferros fundidos vermiculares, apesar de serem insuficientes para a obtenção da Equação de Taylor.

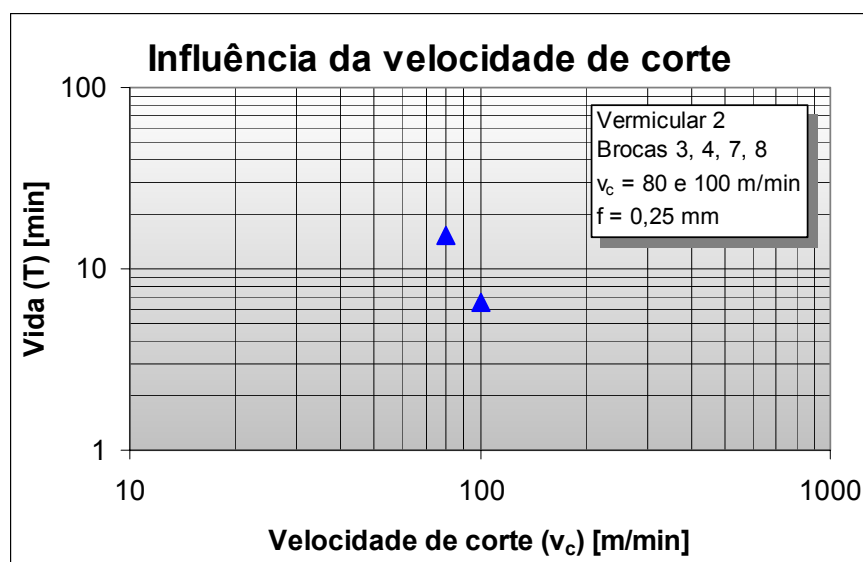


Figura 5.1: Redução da vida da ferramenta em função do aumento da velocidade de corte (o ponto correspondente a 80 m/min é a média de três ensaios).

Observa-se que a vida da ferramenta é bastante sensível a variações de velocidade de corte. Na situação em estudo, o aumento da velocidade de corte de 80 para 100 m/min ocasionou uma redução na vida da broca de 15 para 6,5 min, ou 9,7 para 5,1 m de furação.

### 5.2.2 Repetibilidade dos ensaios de usinagem

Conforme discutido no item 5.5, somente alguns, dentre todos os materiais, foram ensaiados com repetições. A usinagem do Vermicular 3 foi repetida devido a uma quebra na broca. Além deste, os testes com o Cinzento 1 e o Vermicular 3

foram realizados novamente, e ambos apresentaram uma excelente repetibilidade. Como exemplo, na Figura 5.2 são mostradas as três curvas de desgaste do Vermicular 2.

Os resultados das medições de desgaste utilizados para traçar o gráfico foram divididos em três subconjuntos, cada qual pertencente a um dos experimentos. Aos subconjuntos, organizados dois a dois, aplicou-se o teste estatístico de análise de variância para um nível de confiabilidade de 95%. O teste revelou não existirem diferenças estatisticamente significativas entre os subconjuntos e, portanto não se pode afirmar que os resultados diferem entre si. A proximidade das curvas desses experimentos abriu a possibilidade para que fosse estudado um maior número de materiais, porém com um menor número de repetições. Este resultado comprova a confiabilidade do processo e da metodologia dos ensaios de furação realizados e do processo de medição de desgaste da ferramenta.

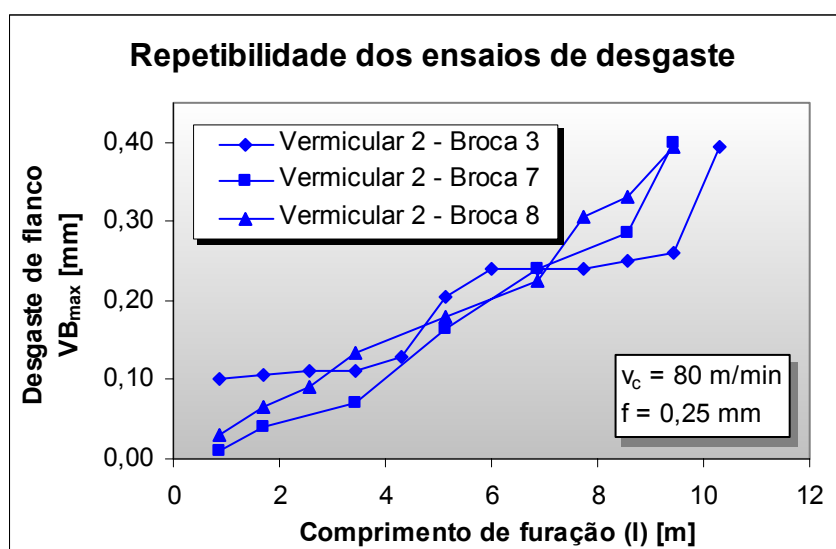


Figura 5.2: Curvas referentes ao Vermicular 2: excelente repetibilidade.

### 5.2.3 Comparação da usinabilidade dos materiais: critério $VB_{max}$

Os materiais em estudo foram produzidos com cinco diferentes composições químicas, em três tempos de desmoldagem. Alternando-se estas duas variáveis poderiam ter sido produzidos quinze materiais distintos. No entanto, foram feitos apenas seis, pois os esforços foram concentrados nas combinações de parâmetros



de maior relevância. As comparações a seguir são realizadas por partes, em função dos parâmetros de fabricação dos materiais.

*a) Usinabilidade do Cinzento 1 vs. Vermicular 2*

Os primeiros materiais produzidos e testados foram o Cinzento 1 e o Vermicular 2. Estes testes foram conduzidos essencialmente com o intuito de comparar o material atualmente utilizado na fabricação de blocos de motores, com o vermicular. Ambos foram produzidos com o tempo de desmoldagem de 8 h, e são quase totalmente perlíticos. O Cinzento 1 foi produzido com 97,5% de perlita, o segundo lote, Cinzento 1<sub>2</sub>, com 100% de perlita e o Vermicular 2, com 99%. Para a obtenção de uma matriz totalmente perlítica no Vermicular 2, adicionou-se uma maior quantidade de manganês, elemento perlitizante. A adição de Mn ao Vermicular 2 deve-se ao fato de sua maior tendência ferritizante, conforme item 4.2.2.c).

O ensaio de usinagem desses dois materiais mostrou uma diferença muito expressiva na vida da ferramenta (Figura 5.3). As curvas referentes ao Cinzento 1 mostram menores desgastes de ferramenta logo no início do experimento, o que torna-se cada vez mais claro com o aumento do comprimento usinado. A ferramenta utilizada no Vermicular 2 teve a vida equivalente a 44% daquela empregada no Cinzento 1. Esse resultado é muito semelhante ao obtido por Reuter (2000), em 1995/96, conforme item 4.1, o qual atribuiu esta diferença à maior resistência mecânica do vermicular, que é aproximadamente o dobro. Além disso, Dawson, (1999) afirma que a adição de manganês, para formar grande quantidade de perlita, pode causar alterações de composição e dureza, tanto na ferrita quanto na cementita, interferindo negativamente na usinabilidade.

A presença de enxofre no material é tanto mais importante quanto maior a velocidade de corte. Nos ensaios de furação realizados, sua ausência no vermicular, e conseqüente inexistência da camada proterora de MnS sobre a face da ferramenta, pode não ter sido um dos fatores relevantes na redução da vida da ferramenta, uma vez que, de acordo com Reuter et al. (2000), a referida camada também não se forma na usinagem do cinzento nas velocidades utilizadas.

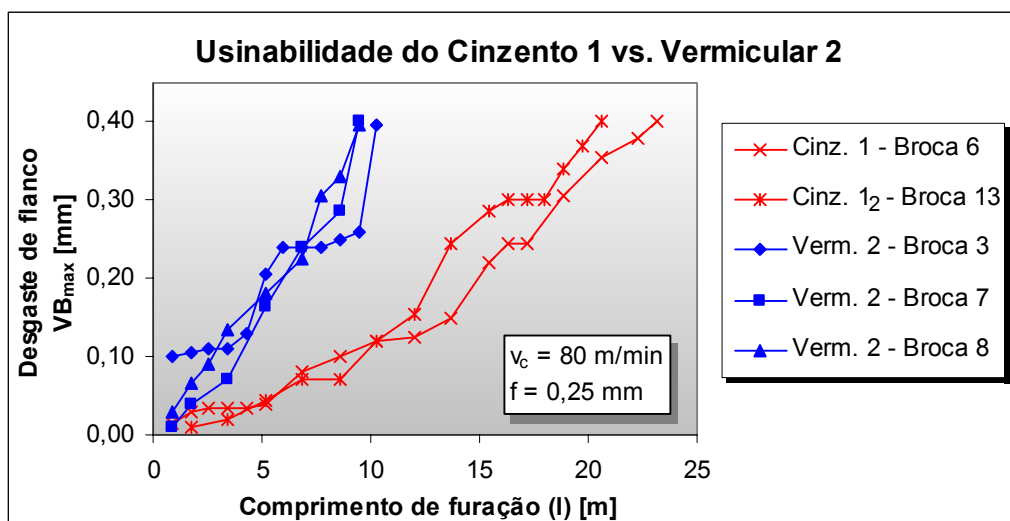


Figura 5.3: Resultados dos ensaios de usinabilidade dos materiais Cinzento 1 e Vermicular 2. Os valores de vida médio são indicados próximos às curvas. O Cinzento 1<sub>2</sub> é o segundo lote de ferro fundido cinzento.

#### b) Usinabilidade dos vermiculares 3, 4, 5 e 6

A variação do teor de cobre equivalente entre os **materiais 3 e 4** gerou grandes diferenças microestruturais e de propriedades mecânicas, conforme item 5.1. O primeiro lote de Vermicular 3 foi usinado com a broca 9, a qual possuía a largura das guias de 0,47 mm, isto é, 0,07 mm maior do que as demais brocas. Logo no início do experimento, a broca 9 apresentou um lascamento da parte posterior de ambas as guias (Figura 5.4). O ensaio não foi interrompido e a referida broca não se desgastou até 16,3 m de vida. No segundo lote, Vermicular 3<sub>2</sub>, utilizou-se a broca 15, com 9,9 mm de diâmetro e largura das guias 0,05 mm menor em relação as demais. Com esta ferramenta foram usinados 33,9 m de furo, sem atingir o final de vida, conforme gráfico da Figura 5.5. Já a ferramenta que usinou o Vermicular 4, com maior proporção de perlita, atingiu o final de vida aos 14,3 m de furação, menos do que 50% da vida da ferramenta do Vermicular 3<sub>2</sub>.

Esse resultado evidencia a influência dos elementos formadores de perlita e, conseqüentemente, a influência da própria razão perlita/ferrita. A condição de 39% de perlita propiciou uma vida de ferramenta maior do que a de 84% de perlita, para um mesmo tempo de desmoldagem. No entanto, não se pode afirmar que a vida da ferramenta diminui com o aumento da perlita em toda a faixa entre estes dois valores, tampouco entre 0 e 100%, pois resultados obtidos por outros pesquisadores

mostram que esta relação não é válida em qualquer situação, conforme item 4.2.2.b) (Dawson et al., 1999).

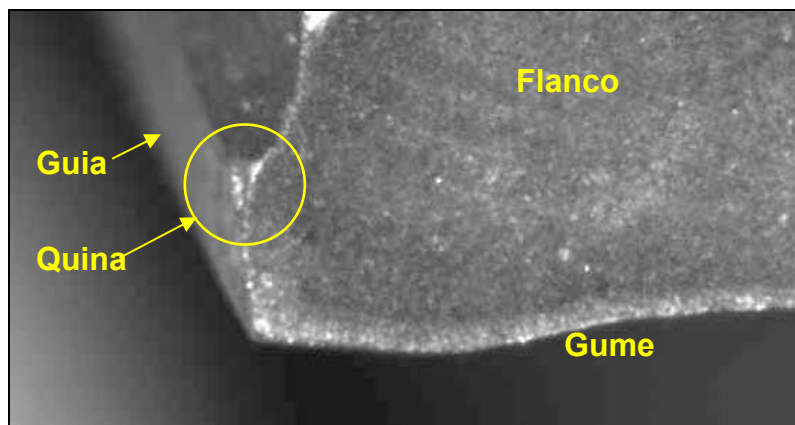


Figura 5.4: Quebra da parte posterior das guias da broca 9, na usinagem do Vermicular 3. Guias com 0,47 mm de largura.

Destaca-se que o Vermicular 3, apesar de possuir excelente usinabilidade, possui baixos valores de dureza, resistência mecânica e proporção de perlita, limitando sua aplicação em blocos de motor. Todavia, pode perfeitamente ser utilizado em outras peças, tais como cabeçotes de motor. O Vermicular 3 possui uma resistência mecânica maior do que o cinzento e ao mesmo tempo uma melhor usinabilidade, nas condições ensaiadas.

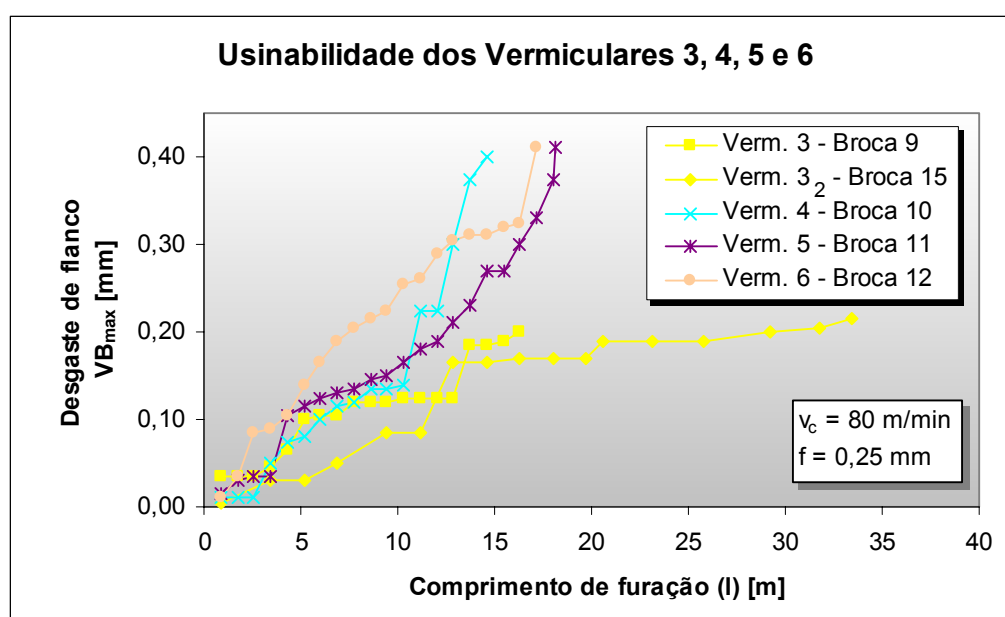


Figura 5.5: Resultados dos ensaios de usinabilidade dos vermiculares 3, 4, 5 e 6.

Os parâmetros de fabricação dos **vermiculares 5 e 6** também diferem apenas no teor de cobre equivalente, sendo de 1,2% e 1,5%, respectivamente. No entanto, ambos apresentam praticamente a mesma proporção de perlita. O Vermicular 6 possui 5% a mais de grafita nodular, e dureza semelhante. Nas micrografias obtidas ao MEV observa-se uma sutil diferença no tipo de perlita dos dois materiais, sendo que o Vermicular 5 apresenta menor quantidade de  $Fe_3C$ .

No gráfico da Figura 5.5 observa-se que os resultados obtidos para os vermiculares 5 e 6 são bastante próximos. A ferramenta utilizada no material com maior teor de perlizantes apresentou uma vida menor. Contudo, o teste de variância, com 95% de confiabilidade, aplicado ao resultado das medições de desgaste revela que esta diferença não é estatisticamente significativa. Dentre todos os materiais ensaiados esses são os únicos que não apresentam diferenças estatisticamente significativas de usinabilidade.

A outra variável em estudo, o **tempo de desmoldagem**, pode ser avaliada isoladamente na comparação entre os **vermiculares 4 e 5**, ambos com 1,2% de cobre equivalente, desmoldados em 20 min e 2 h, respectivamente. O Vermicular 5 possui 5% a mais de perlita, entretanto, a dureza do Vermicular 4 é significativamente maior.

O objetivo de gerar materiais com diferentes tipos de perlita, através da alteração no tempo de desmoldagem, foi perfeitamente atingido. As perlitas dos vermiculares 4 e 5 são claramente diferenciáveis: a primeira, mais grosseira, com maior quantidade de  $Fe_3C$  e a segunda, com lamelas de  $Fe_3C$  claramente menos espessas, ou seja, menor quantidade de  $Fe_3C$  na perlita. Isso significa que o tempo de 2 horas gera uma velocidade de resfriamento que permite a difusão do carbono para as regiões de grafita, fazendo com que a austenita permaneça com menores quantidades de carbono, o que se reflete na menor espessura das lamelas de  $Fe_3C$  na perlita. Vale lembrar que essa difusão ocorre principalmente acima da temperatura de transformação da austenita, que é de aproximadamente 725°C.

Um estudo realizado por Bates (1996), discutido no item 4.2.2.a), revelou a influência negativa da quantidade de  $Fe_3C$  da perlita na usinabilidade de ferros fundidos cinzentos e nodulares em ensaios de torneamento, fresamento e furação.

Os ensaios de usinagem dos vermiculares 4 e 5 (Figura 5.5) mostram que a alteração no tempo de desmoldagem de 20 min para 2 h propiciou um aumento de 25% na vida da ferramenta, de 14,6 m para 18,2 m de furação. Considerando-se as características de fabricação e da perlita desses dois materiais, confirma-se o resultado obtido por Bates (1996), em que o material com maior quantidade de  $Fe_3C$  na perlita possui usinabilidade pior do que aquele com menor quantidade.

### c) Comparação da usinabilidade de todos os materiais

As variações dos parâmetros de fabricação do ferro fundido vermicular produziram uma ampla faixa de variação de sua usinabilidade, conforme apresentado na Figura 5.6. O resultado referente ao Cinzento 1 é a média dos experimentos realizados com os dois lotes de materiais. O valor de 9,7 m, referente ao Vermicular 2, representa a médias de três experimentos de um mesmo lote de material. O resultado indicado do Vermicular 3, é a vida da ferramenta obtida do segundo lote fabricado. O resultado do primeiro lote do Vermicular 3 foi descartado, uma vez que foi interrompido prematuramente devido a uma quebra anormal na ferramenta, provavelmente gerada por uma não-conformidade de sua própria geometria.

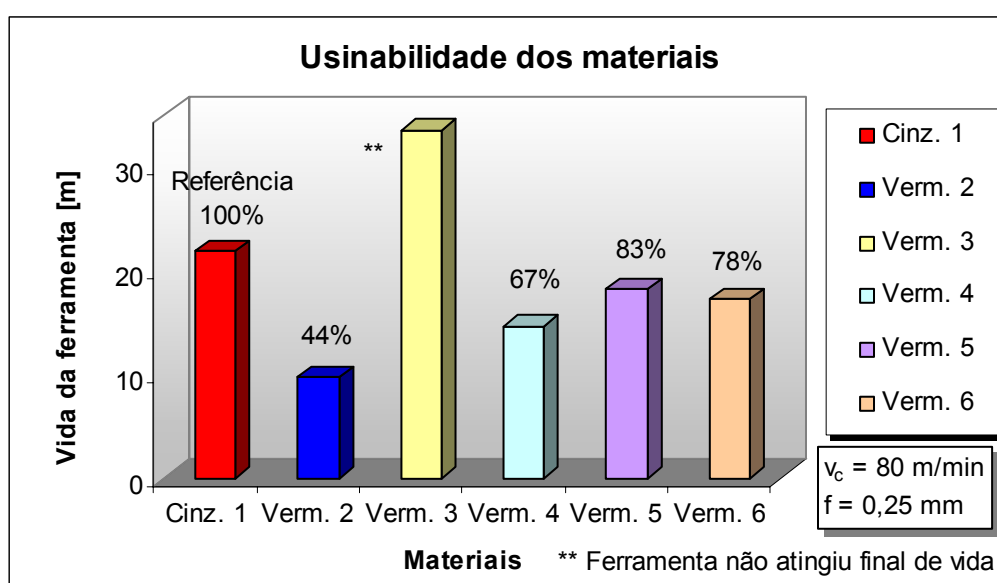


Figura 5.6: Comparação da usinabilidade de todos os materiais testados, segundo o critério de fim de vida  $VB_{max} = 0,4 \text{ mm}$ .

O vermicular 100% perlítico (Vermicular 2) obtido com alto teor de manganês apresentou uma usinabilidade muito inferior ao cinzento, para proporções semelhantes de perlita. Os demais vermiculares, apesar de possuírem menores quantidades de perlita, possuem propriedades mecânicas superiores ao Cinzento 1. O Vermicular 3 apresentou usinabilidade excelente, no entanto, possui uma baixa proporção de perlita e dureza bastante inferior ao Cinzento 1. O Vermicular 4, com 84% de perlita, apresentou uma usinabilidade intermediária. Os vermiculares 5 e 6, com 90% de perlita, propiciaram uma vida de ferramenta significativamente superior em relação ao Vermicular 4. Com exceção dos vermiculares 5 e 6, todas as demais diferenças de usinabilidade são estatisticamente significativas.

### **5.3 Resultados da usinabilidade dos materiais: Critério forças de corte**

Outro importante critério na avaliação da usinabilidade dos materiais é a força de corte. No caso da furação, são normalmente avaliados o momento torçor da broca e a força de avanço. Os resultados são apresentados nos itens seguintes.

#### **5.3.1 Correlação entre forças de corte e desgaste da ferramenta**

Conforme discutido no item 5.6, foram realizados dois experimentos no Vermicular 2 a fim de verificar a influência da variável “desgaste da ferramenta” nas forças de corte e avanço. Os gráficos das Figuras 5.7 e 5.8 mostram as forças de corte em função do comprimento de furação da broca, e portanto, indiretamente em função do desgaste.

Ao longo da vida da broca, para o critério de fim de vida utilizado nos experimentos ( $VB_{max} = 0,40\text{mm}$ ), observa-se um aumento de aproximadamente 7,5% na força de avanço e de 6,0% no momento torçor, valores obtidos pela aproximação da melhor reta pelo método dos mínimos quadrados. Todavia, observou-se que as medições de momento torçor apresentaram dispersões aleatórias mais expressivas em relação às medições de forças de avanço. Acredita-se que isto deva-se à presença da adesão de material sobre os gumes das brocas,

uma vez que durante estes ensaios a adesão não foi removida. Em ensaios posteriores, a adesão do gume passou a ser removida, reduzindo a variação.

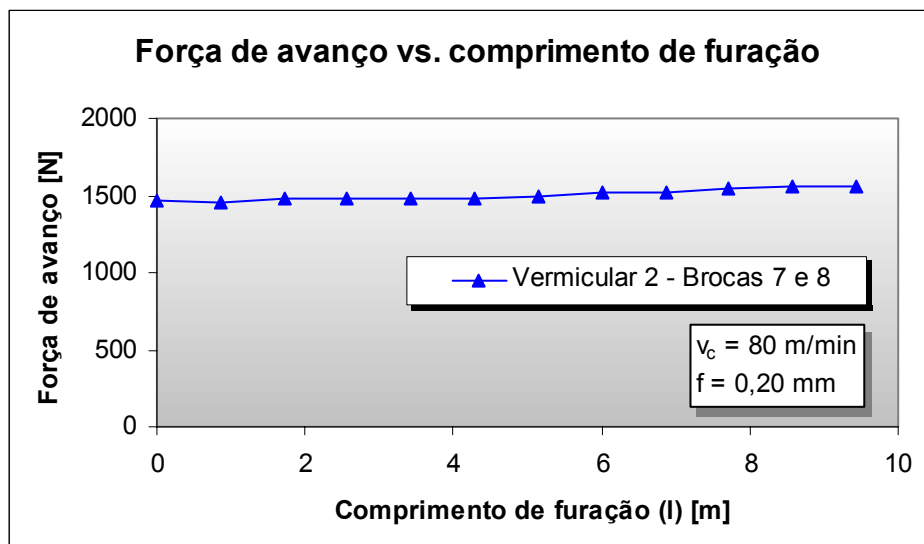


Figura 5.7: Efeito do aumento do desgaste da broca na força de avanço.

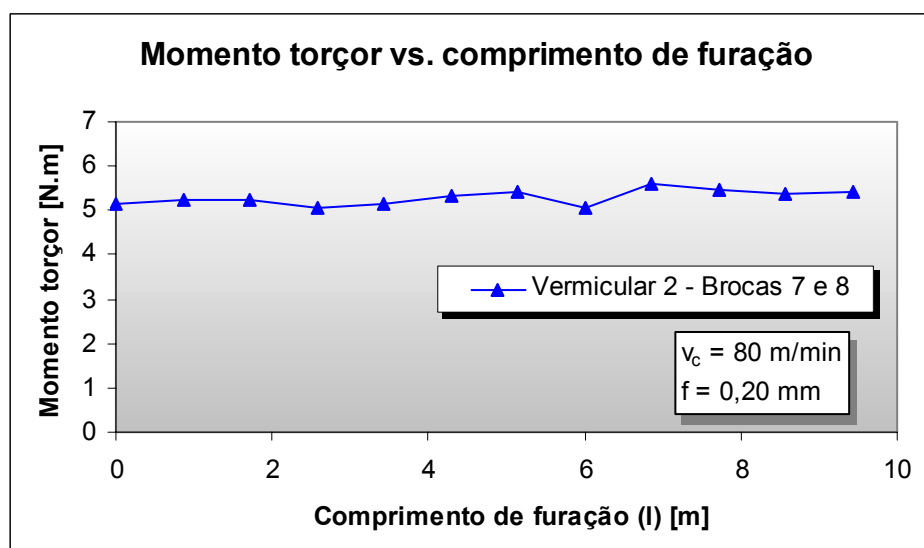


Figura 5.8: Efeito do aumento do desgaste da broca no momento torçor.

### 5.3.2 Resultados das medições de forças de corte

#### a) Comparações de força de avanço de todos os materiais

Em cada um dos materiais foram executados três furos para avaliação da força de avanço. Os resultados são mostrados no gráfico da Figura 5.9, onde cada

curva, representando um material, é a média de três medições. Esse gráfico é compreendido por três regiões: uma região de força de avanço ascendente, que representa a entrada gradual da broca na peça; uma região intermediária, de remoção do material; e a região de saída da broca. Observa-se que a força de avanço praticamente não varia com o tempo de furação, ou seja, a profundidade do furo. Para efeito comparativo, tomou-se a média das forças de avanço para cada material, retirando-se a parte inicial e final da curva, delimitadas pelas linhas verticais do gráfico (Figura 5.9). Os resultados são mostrados na Tabela 5.2 e no gráfico da Figura 5.10.

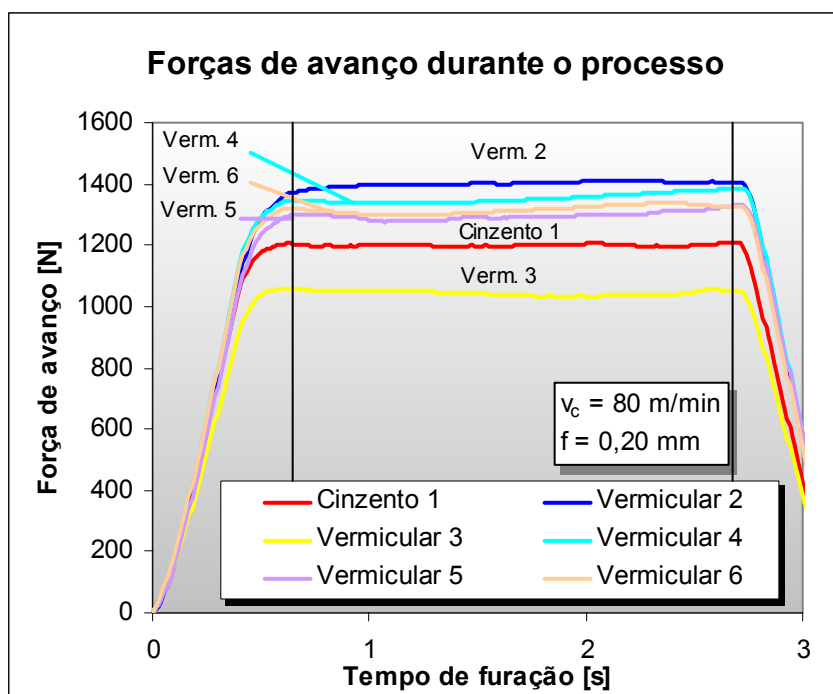


Figura 5.9: Evolução da força de avanço durante a execução dos furos. Cada curva representa a média de três medições.

Os resultados das medições foram submetidos a análises de variância, com 95% confiabilidade, a fim de verificar se as diferenças observadas são, de fato, estatisticamente significativas. Uma aplicação inicial do teste sobre todos os valores medidos de forças de avanço revelaram que as diferenças entre os materiais são significativas. Em seguida os materiais foram posicionados por crescente força de avanço média, e aos pares, novamente submetidos à análise de variância. Como resultado, obteve-se que apenas dois materiais, os vermiculares 5 e 6, não



apresentaram diferenças significativas de forças de avanço. Todos os demais mostraram-se diferentes entre si.

Tabela 5.2: Resultado das medições de forças de avanço [N] nos ensaios de furação – valores médios das curvas.

Materiais:	Cinz. 1	Verm. 2	Verm. 3	Verm. 4	Verm. 5	Verm. 6
Furo 1:	1195,9	1394,6	1031,2	1335,2	1277,9	1313,8
Furo 2:	1200,8	1404,8	1039,0	1348,9	1299,2	1311,0
Furo 3:	1204,0	1404,8	1060,8	1374,9	1309,2	1326,2
Média:	1200,2	1401,4	1043,7	1353,0	1295,5	1317,0
Desv. Padrão:	4,10	5,92	15,35	20,17	15,99	8,10

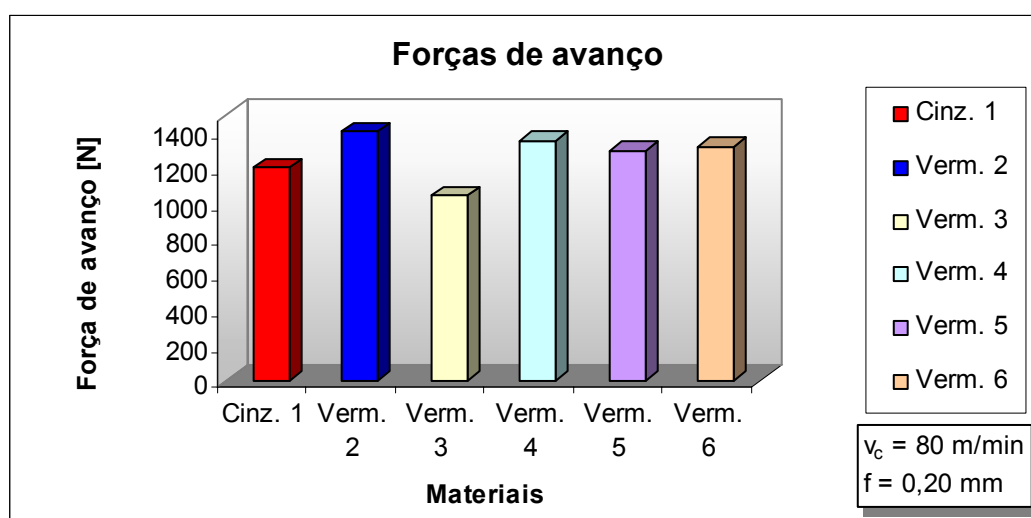


Figura 5.10: Representação gráfica das medições de força de avanço nos ensaios de furação – média dos valores médios das curvas.

No item 5.2.3.b), mostrou-se também a conclusão de que os vermiculares 5 e 6 foram os únicos a não apresentar diferenças significativas de usinabilidade para o critério  $VB_{max}$ , coincidindo com o resultado de força de avanço.

#### b) Comparações de momentos torçores de todos os materiais

Na Figura 5.11, observam-se os resultados das medições de momento torçor da broca durante a furação, onde cada curva, representativa de um material, é a média de três medições. As medições revelaram um comportamento diferenciado,

mostrando ser sensível à profundidade dos furos, pois verifica-se que o momento ao qual a ferramenta está submetida aumenta com o tempo de furação, representado no gráfico. Isso deve-se, provavelmente, ao atrito entre a parede do furo e as guias da broca. O momento torçor do Vermicular 3, o mais dúctil dentre todos, mostrou-se mais sensível à profundidade do furo.

Os vermiculares 2 e 4 apresentaram os maiores momentos, e o Vermicular 3, o menor. As curvas dos demais estão praticamente sobrepostas.

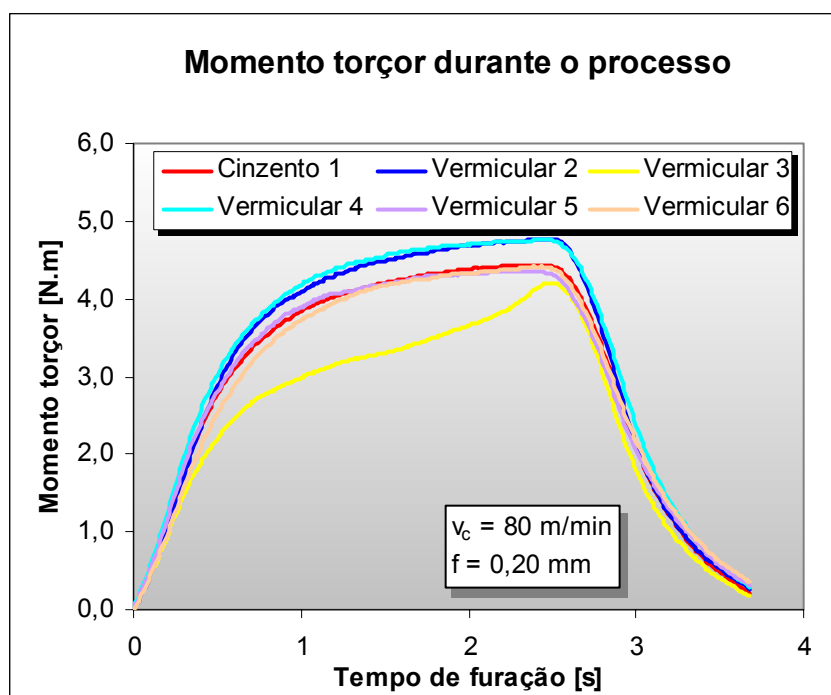


Figura 5.11: Evolução do momento torçor durante a execução dos furos. Cada curva representa a média de três medições.

Tendo em vista a forma da curva, o valor de máximo momento mostrou-se mais adequado para ser utilizado como parâmetro comparativo entre os materiais, diferente das forças de avanço, onde se optou pela média. Os valores de máximo momento de cada medição e suas médias são apresentados na Tabela 5.3. Na Figura 5.12, tem-se uma representação gráfica da média dos resultados máximos.

Tendo em vista as dispersões observadas em medições anteriores de momento (item 5.3.1), procedeu-se a remoção da adesão dos gumes da broca antes da realização de cada furo. Por fim, realizou-se um quarto furo, em cada material, com medição de momento, porém sem a remoção da adesão, estimando-se sua influência.

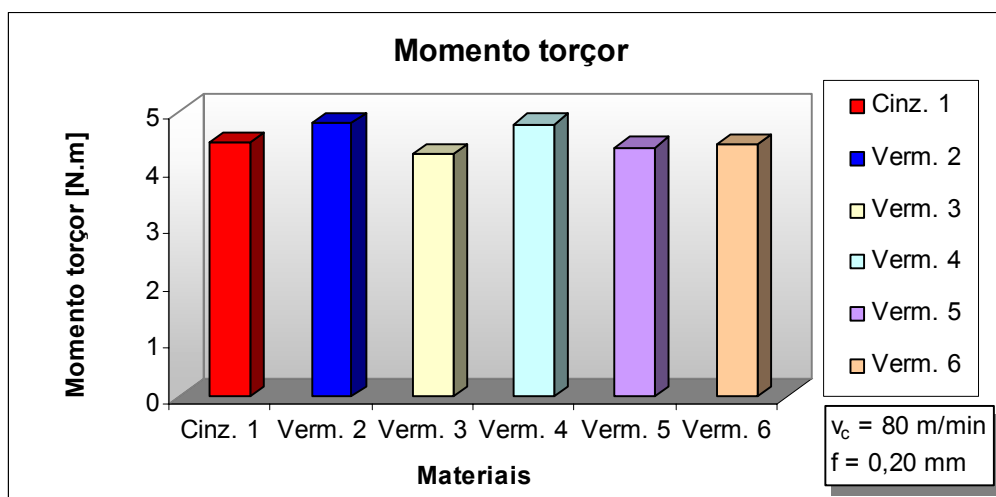


Figura 5.12: Representação gráfica das medições de momento torção nos ensaios de furação – média dos valores máximos das curvas.

Os resultados da Tabela 5.3 foram submetidos à análise de variância, de maneira semelhante ao procedimento aplicado às forças de avanço, descrito anteriormente. Porém, apesar de alguns resultados se mostrarem aparentemente diferenciados dos demais, o teste revela que não existem diferenças estatisticamente significativas, para o nível de confiabilidade de 95%. Isto significa que, para o número de três amostras considerado, a dispersão entre as medições não permite resultados conclusivos. Um número maior de amostras eventualmente revelaria alguma diferenciação.

Tabela 5.3: Resultado das medições de momento torção [N.m] nos ensaios de furação – valores máximos das curvas.

Materiais:	Cinz. 1	Verm. 2	Verm. 3	Verm. 4	Verm. 5	Verm. 6
Furo 1:	4,10	4,65	3,55	4,50	4,71	4,23
Furo 2:	4,56	4,96	4,41	5,05	4,13	4,20
Furo 3:	4,68	4,74	4,79	4,76	4,26	4,83
Média:	4,45	4,78	4,25	4,77	4,37	4,42
Desv. Padrão:	0,31	0,16	0,63	0,28	0,31	0,36
Furo 4 (sem remoção da adesão):	4,16	4,79	5,32	5,12	4,84	4,56
Incremento devido à adesão nos gumes:	-0,29	0,01	1,07	0,35	0,47	0,14

O quarto furo foi feito apenas para verificar a influência da adesão nos gumes da ferramenta. Não é um resultado de elevada confiabilidade, pois foi realizada apenas uma medição. Entretanto, mostra um resultado interessante, em que o Vermicular 3, que possui maior quantidade de ferrita, apresentou o maior incremento em relação à média, devido à adesão de material sobre o gume da ferramenta.

*c) Correlação entre a vida da ferramenta e a força de avanço*

Uma redução de forças de corte pode levar a um desgaste de ferramenta menos intenso e, portanto, ser inversamente proporcional à vida da ferramenta. No entanto, esta relação não é necessariamente válida, pois existem inúmeras variáveis que influenciam no desgaste da ferramenta, tais como abrasão, difusão e adesão, entre outras.

Observou-se que existe uma correlação entre a vida das ferramentas e as forças de avanço medidas para cada material. A fim de tornar esse resultado mais claro, os materiais em estudo foram dispostos por crescente usinabilidade, tanto pelo critério vida da ferramenta, quanto pelo critério força de corte. Observa-se que a seqüência de materiais por ambos os critérios é idêntica, ou seja, materiais com maior força de avanço apresentam menor vida de ferramenta e vice-versa, conforme apresentado na Figura 5.13.




	 <b>Crescente usinabilidade</b>					
Material:	Verm. 2	Verm. 4	Verm. 6	Verm. 5	Cinz. 1	Verm. 3
Vida da ferramenta	 <b>Crescente vida da ferramenta</b>					acima de
[m]:	9,7	14,6	17,2	18,2	23,2	33,5
Material:	Verm. 2	Verm. 4	Verm. 6	Verm. 5	Cinz. 1	Verm. 3
Força de avanço	 <b>Crescente força de avanço</b>					
[N]:	1401,4	1353,0	1317,0	1295,5	1200,2	1043,7

Figura 5.13: Materiais dispostos por ordem de crescente usinabilidade por ambos os critérios de desgaste e de força de avanço.

Com os dados da Figura 5.13 pode-se construir uma curva da vida das ferramentas em função da força de avanço, apresentada na Figura 5.14.

A Figura 5.14 pode ser entendida como uma certa comprovação dos resultados, pois existe uma perfeita coerência entre os resultados obtidos por dois critérios distintos de avaliação de usinabilidade.

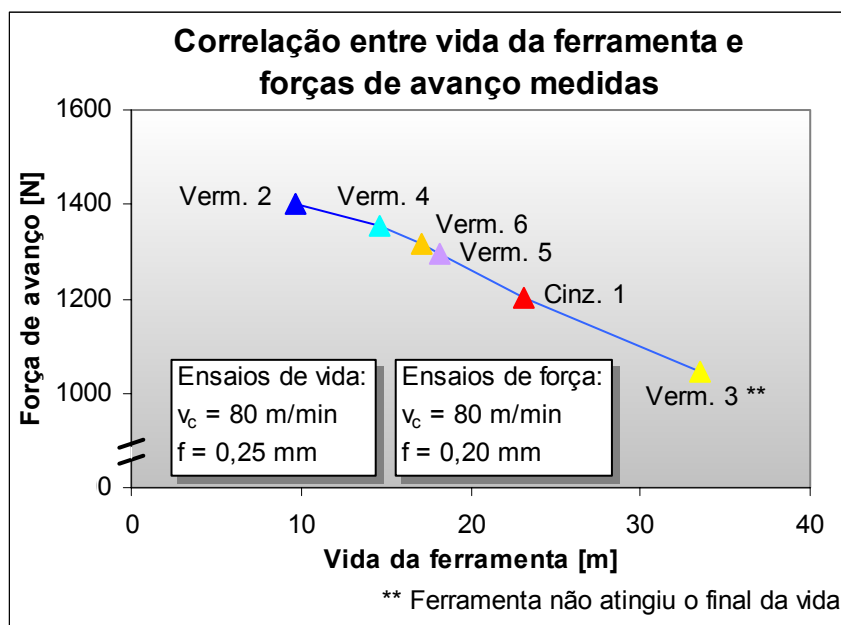


Figura 5.14: Correlação entre as vidas das brocas e as forças de avanço medidas.

### 5.3.3 Determinação da constante e do expoente da Equação de Kienzle

Neste trabalho, as constantes de Kienzle foram determinadas empiricamente para os materiais: Cinzento 1 e Vermicular 4. O cinzento foi selecionado por ser um material de referência, e o Vermicular 4 foi escolhido aleatoriamente dentre os vermiculares com alto teor de perlita. O levantamento da Equação de Kienzle de todos os materiais não foi realizado por não ser este um dos principais objetivos da pesquisa.

Foram utilizados os avanços de 0,10; 0,20 e 0,25 mm no levantamento das curvas para cálculo das constantes. Os resultados são apresentados nos itens seguintes.

a) Determinação de “ $k_{c1.1}$ ” e “ $1-m_c$ ”

Os resultados das medições de momento torçor para três avanços distintos são apresentados na Tabela 5.4. Os valores de  $F_c$ , necessários para a última coluna da tabela, são calculados através da Equação (5.10).

A Equação de Kienzle (5.4) pode ser linearizada como segue:

$$F_c = \frac{Mt}{0,38.D} \quad (5.10)$$

$$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_c} \quad (5.11)$$

$$\therefore \log\left(\frac{F_c}{b}\right) = (1-m_c) \cdot \log(h) + \log(k_{c1.1}) \quad (5.12)$$

a qual é uma equação de reta composta por:

$\log\left(\frac{F_c}{b}\right) \rightarrow$  ordenada;

$\log(h) \rightarrow$  abscissa;

$(1-m_c) \rightarrow$  coeficiente angular;

$\log(k_{c1.1}) \rightarrow$  coeficiente linear.

Tabela 5.4: Dados para determinação de “ $k_{c1.1}$ ” e “ $1-m_c$ ”

Material	f [mm]	$M_t$ [N.m]	$\log(h)$	$\log(F_c/b)$
Cinzento 1	0,10	2,46	-1,027	2,09
	0,20	4,44	-0,726	2,34
	0,25	5,53	-0,629	2,44
Vermicular 4	0,10	2,72	-1,027	2,13
	0,20	4,77	-0,726	2,37
	0,25	6,11	-0,629	2,48

Com os valores de  $\log(h)$  e  $\log(F_c/b)$ , são construídas as curvas da Figura 5.15. A partir de cada um dos conjuntos de três pontos é obtida a melhor reta e seus coeficientes, indicados no gráfico.

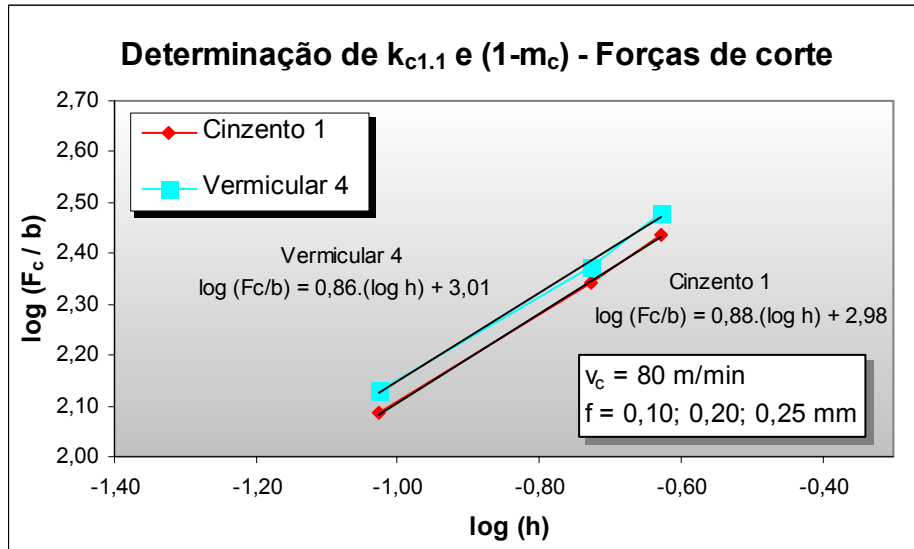


Figura 5.15: Equações de reta para determinação das constantes de Kienzle “ $k_{c1.1}$ ” e “ $1-m_c$ ”.

A partir desta análise são obtidas as constantes de Kienzle para forças de corte do Cinzento 1 e Vermicular 4 no processo de furação, apresentadas na Figura 5.16.

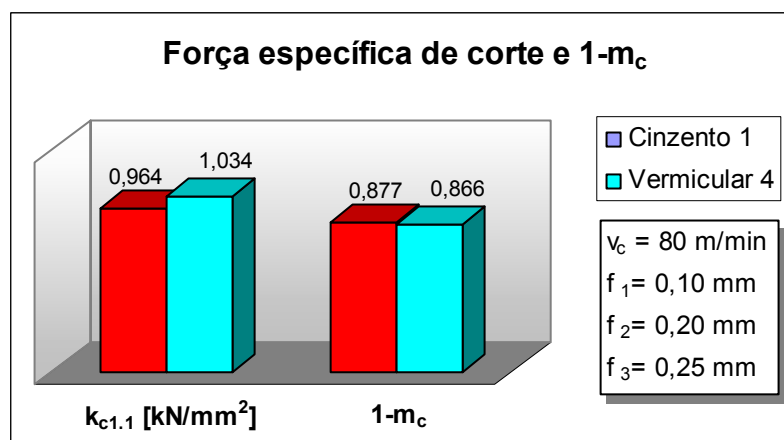


Figura 5.16: Constantes de Kienzle, determinadas empiricamente, para cálculo da força de corte ( $F_c$ ) em furação.

b) Determinação de “ $k_{f1.1}$ ” e “ $1-m_f$ ”

Os resultados das medições de força de avanço, apresentados na Tabela 5.5, permitem o cálculo das outras colunas da tabela,  $\log(h)$  e  $\log(F_f/b)$ , as quais são as variáveis da Equação de Kienzle linearizada para forças de avanço (5.13).

$$\log\left(\frac{F_f}{b}\right) = (1-m_f) \cdot \log(h) + \log(k_{f1.1}) \quad (5.13)$$

Tabela 5.5: Dados para determinação de “ $k_{f1.1}$ ” e “ $1-m_f$ ”.

Material	f [mm]	F <sub>f</sub> [N]	log (h)	log (F <sub>f</sub> /b)
Cinzento 1	0,10	600,5	-1,027	2,05
	0,20	1200,2	-0,726	2,35
	0,25	1520,1	-0,629	2,46
Vermicular 4	0,10	637,1	-1,027	2,08
	0,20	1353,0	-0,726	2,40
	0,25	1733,3	-0,629	2,51

Com os valores de  $\log(h)$  e  $\log(F_f/b)$ , são construídas as curvas da Figura 5.17. As equações das melhores retas são indicadas no gráfico.

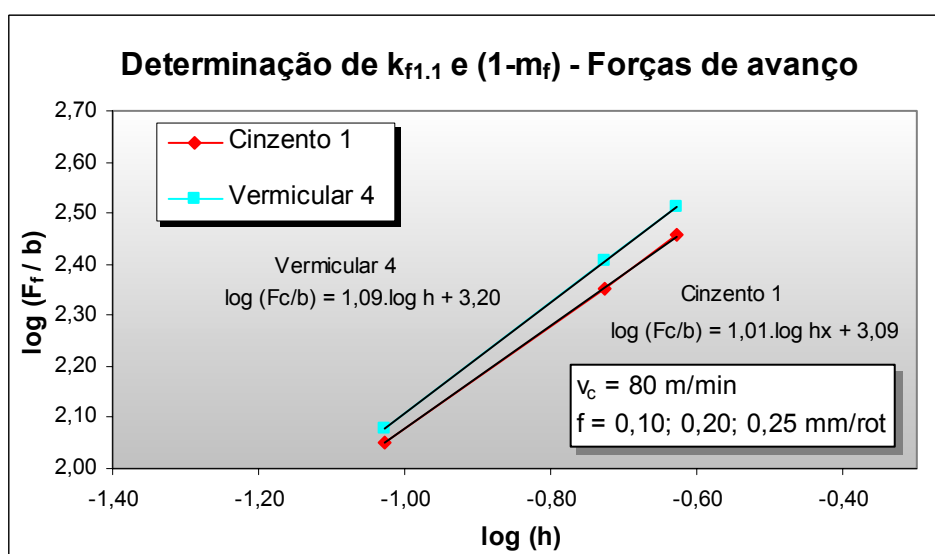


Figura 5.17: Equações de reta para determinação das constantes de Kienzle “ $k_{f1.1}$ ” e “ $1-m_f$ ”.



As constantes de Kienzle para forças de avanço do Cinzento 1 e Vermicular 4 no processo de furação são apresentadas na Figura 5.18.

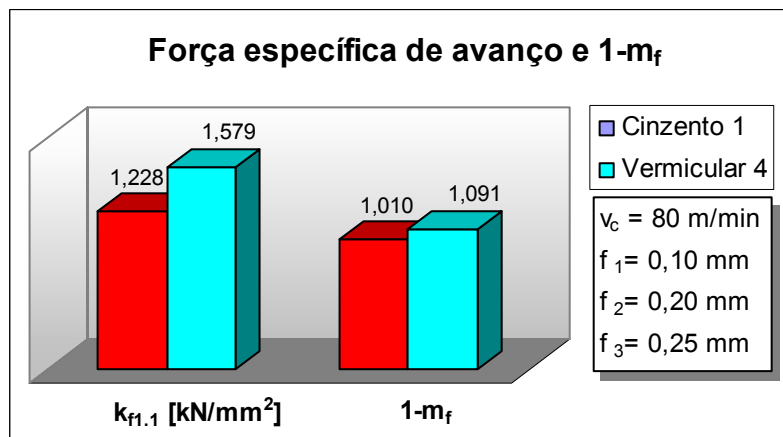


Figura 5.18: Constantes de Kienzle, determinadas empiricamente, para cálculo da força de avanço ( $F_f$ ) em furação.

O Vermicular 4 apresentou uma força específica de corte 7% acima do cinzento e uma força específica de avanço 29% maior. O resultado obtido permite que sejam feitas inferências a respeito de forças de corte e potências de máquina, necessárias para a usinagem do ferro fundido vermicular. Estimativas das forças de usinagem de vermicular podem ser realizadas através da comparação dos valores obtidos para o ferro fundido cinzento com os disponíveis na literatura para a usinagem de cinzento por outros processos.

#### 5.4 Comentários finais

Os resultados obtidos na presente pesquisa mostram que as variáveis em estudo ocasionam diferenças expressivas de usinabilidade entre os materiais. Do conhecimento científico gerado, podem ser extraídas importantes informações de interesse industrial, pois os materiais estudados refletem problemas reais enfrentados atualmente na fundição e usinagem de peças em vermicular.

A obtenção de vermicular totalmente perlítico, Vermicular 2, mostrou-se pouco promissora quanto à usinabilidade. Porém, a combinação de uma proporção de perlita um pouco inferior com um tempo de desmoldagem adequado, permitiu atingir

uma usinabilidade de 83% em relação ao cinzento, no processo de furação, o que é um resultado satisfatório.

Para aplicações em que não são exigidos altos teores de perlita, a utilização do Vermicular 3 pode ser adequada, uma vez que apresenta uma usinabilidade superior à do Cinzento 1, além de maior resistência mecânica.

## 6 CONCLUSÃO

As conclusões técnicas da pesquisa serão divididas em cinco grupos, em função do foco em análise:

1. Em relação à fabricação dos materiais:

- A fabricação dos materiais foi bem sucedida, pois as variáveis em questão, teor de elementos perlitizantes e tempo de desmoldagem, puderam ser perfeitamente caracterizadas nas propriedades desses materiais;
- O manganês confirmou sua forte função de perlitizante, na presença dos outros elementos formadores de perlita, Cu, Sn e Cr.

2. Em relação ao teor de elementos perlitizantes:

- A utilização de manganês no Vermicular 2 permitiu a obtenção de matriz totalmente perlítica, porém, esse material apresentou a pior usinabilidade dentre todos, mesmo com um grande tempo de desmoldagem. Esse resultado confirma a influência negativa do Mn como elemento perlitizante, verificado por Dawson et al. (1999), em ensaios de torneamento com metal-duro;
- O Vermicular 3, com uma quantidade de perlita de apenas 40%, apresentou a melhor usinabilidade dentre todos os materiais, inclusive o cinzento, uma vez que a matriz ferrítica gera um menor desgaste abrasivo na ferramenta. Contudo, a aplicação desse material em componentes automotivos é um tanto limitada, pois pode não suprir especificações técnicas de propriedades mecânicas, dureza e proporção de perlita;
- A variação do  $Cu_{eq}$  de 1,2%, no Vermicular 5, para 1,5%, no Vermicular 6, não gerou diferenças significativas na usinabilidade, forças de corte e dureza do material.

3. Em relação ao tempo de resfriamento:

- Na proporção de 1,2%  $Cu_{eq}$ , o tempo de desmoldagem dos corpos de prova passou de 20 min para 2 h, reduzindo a quantidade de  $Fe_3C$  da perlita, o que proporcionou um ganho de 25% na usinabilidade.

4. Em relação ao processo de usinagem selecionado:

- O processo de furação, empregado para avaliar a usinabilidade, mostrou-se confiável e sensível o suficiente para detectar as diferenças entre os materiais. Nos ensaios realizados não foram constatados resultados com grande dispersão ou tendenciosamente incorretos;

5. Em relação à usinabilidade dos materiais:

- No processo de furação, os parâmetros de fabricação selecionados proporcionaram uma ampla faixa de variação na usinabilidade dos materiais;
- A afirmação tipicamente encontrada na literatura de que a usinabilidade do ferro fundido vermicular é inferior à usinabilidade do ferro fundido cinzento é incompleta. Há de se considerar as características microestruturais do ferro fundido vermicular, sem as quais a afirmação é inconsistente;
- O ferro fundido vermicular 100% perlítico, com adição de manganês como perlitzante, gera um material de baixa usinabilidade, em relação a outras ligas de vermicular e ao cinzento;
- Em situações em que não são requeridos altos teores de perlita e elevada dureza, tais como em cabeçotes de motores, a aplicação do vermicular com o teor de perlita em torno de 40% é promissora, uma vez que apresenta uma usinabilidade superior ao cinzento, aliada a uma maior resistência mecânica;
- Uma proporção de perlita em torno de 90%, dá ao material boas propriedades de resistência mecânica e dureza. A esse material, a utilização do tempo de desmoldagem de 2 h permite um ganho significativo de usinabilidade, em relação ao tempo de desmoldagem de 20 min;
- Dentre os materiais pesquisados, o Vermicular 5 é o mais adequado a aplicação de blocos de motores diesel, pois combina uma usinabilidade de 83% em relação ao cinzento, com elevados valores de teor de perlita, resistência mecânica e dureza.

A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que, para o processo de furação, a substituição do ferro fundido cinzento pelo ferro fundido vermicular pode ser realizada tecnicamente, porém, o fator custo de usinagem ainda carece de uma análise mais detalhada.

### **6.1 Proposições para novos trabalhos**

As pesquisas realizadas até o momento são bastante recentes e em número reduzido. O campo de estudo da usinagem dos ferros fundidos vermiculares é muito amplo e as pesquisas nessa área tendem a crescer, uma vez que o material está apenas começando a ser utilizado industrialmente.

A seguir, são colocadas algumas sugestões para futuros trabalhos relativos à usinagem de ferros fundidos vermiculares:

- Pesquisar a influência da proporção de grafita nodular na usinabilidade, adicionalmente aos efeitos de teor de perlita e tipo de perlita;
- Desenvolver ferramentas específicas para a usinagem de vermiculares, abordando os materiais, recobrimentos e geometria, tanto dos insertos quanto dos suportes;
- Avaliar a influência da utilização de fluidos de corte nos diferentes processos de usinagem de vermiculares;
- Pesquisar e otimizar as técnicas de usinagem através de pesquisa de campo, em linhas de produção;
- Estudar os mecanismos de desgaste presentes nos diversos materiais de ferramentas, na usinagem de vermiculares.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM. **Speciality handbook: cast irons**. Estados Unidos: ASM International, 1996, p. 33-267.

BALZERS. **Catálogos de produtos**. Disponível em: <<http://www.balzers.com.br>>. Acesso em: 16 dezembro 2001.

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

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

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

BORRMANN, Klaus. **Advanced tooling solution for CGI machining at Kennametal Hertel**. In: Compacted Graphite Iron – Machining Workshop, 2000, Darmstadt, Germany.

COHEN, P. H.; VOIGT, R. C. e MARWANGA, R. O. **Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of ductile irons**. In: AFS Casting Congress, 2000, Pittsburg. American Foundrymen's Society.

COLPAERT, Humbertus. **Metalografia dos produtos metalúrgicos comuns**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 1969. 412 p.

Dawson, S. e Würtemberg, J. M. **Experiências práticas com ferro fundido de grafita compactada como material para componentes automotivos**. In: 26<sup>o</sup> Simpósio Internacional sobre Tecnologia Automotiva e Automação – ISATA, 1994, Aachen, Germany.

DAWSON, S. **Operational properties of compacted graphite iron: Feedback from ongoing test programmes**. SinterCast S.A. Fev. 1994.

DAWSON, S., et al. The effect of metallurgical Variables on the machinability of compacted graphite iron. In: Design e Machining Workshop – CGI, 1999.

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

DAWSON, Steve. **The SinterCast Process and compacted graphite iron.** In: International Conference on Latest and Best in Melting and Metal Treatment in Ferrous and Non-Ferrous Foundries, Coventry, England, 1994.

DERFLINGER, V.; BRÄNDLE, H. e ZIMMERMANN, H. New hard/lubricant coating for dry machining. **Surface and coatings technology**, n. 113, p. 286-282, 1999.

GASTEL, M. et al. Investigation of the wear mechanism of cubic boron nitride tools used for the machining of compacted graphite iron and gray cast iron. **International Journal of Refractory Metals e Hard Materials**, v. 18, p. 287-296, 2000.

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

HICK, Hannes e LANGMAYR, Franz. All star cast. **Engine Technology International**, Germany, p 40-42. jan/2000.

KÖNIG, Wilfried e KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren.** 5. Auflage. Aachen, 1997.

KRESS, Dieter. **Cylinder bores in CGI: state of the art.** In: Compacted Graphite Iron – Machining Workshop, 2000, Darmstadt, Germany.

MARQUARD, Ralf e HELFRIED, Sorger e McDONALD, Malcolm. Crank it up: New materials create new possibilities. **Engine technology international**, v. 2, p. 58-60, 1998.

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

REUTER, Ulrich e SCHULZ, H. **CGI machinability developments towards production.** In: Design e Machining Workshop – CGI, 1999.

REUTER, Ulrich, et al. **The wear process of CGI cutting and machining developments.** In: Compacted Graphite Iron – Machining Workshop, 2000, Darmstadt, Germany.

REUTER, Ulrich, et al. **Wear mechanisms in high-speed machining of compacted graphite iron.** In: Design e Machining Workshop – CGI, 1999.

SADNVIK-COROMANT. **Helical milling for cylinder bores: with coated cemented carbide**. In: Compacted Graphite Iron – Machining Workshop, 2000, Darmstadt, Germany.

SCHROETER, Rolf Bertrand. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de geometria definida**: Curso Tecnologia de Usinagem I, 1998. 170 f. Notas de aula. Fotocópia.

SINTERCAST. Compacted graphite iron. **Catálogo de produtos**. SinterCast S.A, 2001.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte I**. 4. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1993. 250 p.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte II**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1992. 314 p.

TEIXEIRA, Cleiton Rodrigues. **Influência dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço rápido na qualidade dos furos produzidos**. Florianópolis. 1995. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

TITEX. Ferramentas Titex Plus para Usinagem com Altas Velocidades. **Catálogo de produtos**. TITEX PLUS, 2000.

UPTON, David. **Drilling and tapping research in compacted graphite iron**: carried out for FORD Motor Company. In: Design e Machining Workshop – CGI, 1999.

WALTER. **Catálogo geral**: Ferramentas de metal duro. Áustria: Walter, 2000. 752 p.

WÜRTEMBERG, J. M. **The diesel engine**: lean, clean and “green”. SinterCast S.A. Fev. 1994.