



AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR EM ENSAIOS DE FURAÇÃO

Lourival Boehs, Dr. Eng. – Universidade Federal de Santa Catarina

Wilson Luis Guesser, Dr. Eng. – Universidade do Estado de Santa Catarina
– TUPY Fundições Ltda

Fabiano Mocellin, M. Eng. – Universidade Federal de Santa Catarina
Depto. de Engenharia Mecânica – UFSC – Cx. Postal 476 – CEP 88049-900
Florianópolis – SC – Brasil
fabianoemc@hotmail.com

Resumo. *O ferro fundido vermicular, também conhecido como “Compacted Graphite Iron” – CGI, tem se destacado na indústria automobilística mundial, nos últimos anos. Sua importância está ligada principalmente à fabricação de blocos e cabeçotes de motores diesel, além de outras peças. Um dos fatores limitantes do desempenho e de redução da emissão de poluentes destes motores é a pressão atingida na câmara de combustão. A resistência mecânica do ferro fundido cinzento, material atualmente muito utilizado, não permite atingir pressões maiores, no entanto, possui características particulares e indispensáveis, tais como boa condutividade térmica e amortecimento de vibrações. Por outro lado, o ferro fundido vermicular aparece como um bom substituto, pois além de possuir propriedades de condutividade e de amortecimento semelhantes ao cinzento, tem maior resistência mecânica e à fadiga, além de maior dureza e rigidez, permitindo a fabricação de motores de melhor desempenho e menor peso. A aplicação do vermicular, que possui características adequadas aos motores diesel mais eficientes, apresenta um problema que pode torná-lo excessivamente caro e limitar sua aplicação: a sua pior usinabilidade, em relação ao cinzento. O objetivo do presente trabalho é verificar a influência tipo de perlita na usinabilidade do vermicular, através de ensaios de furação de longa duração, utilizando brocas helicoidais de metal-duro revestidas com TiAlN. A usinabilidade dessas ligas é comparada com a usinabilidade do ferro fundido cinzento – FC-25.*

Palavras-chave: *usinagem, usinabilidade, ferro fundido vermicular, furação, perlita.*

1. INTRODUÇÃO

O ferro fundido vermicular, também conhecido como *Compacted Graphite Iron – CGI*, é o mais novo membro da família dos ferros fundidos. Tem apresentado uma crescente aceitação na indústria automobilística, demonstrando possibilidades de utilização em diversas peças, que atualmente são fabricadas em cinzento, tais como discos de freio, coletores de escapamento, cabeçotes de motor 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 maiores pudessem ser utilizados. Paralelamente, tão desejável quanto melhorar o rendimento do motor é a redução de seu peso, o qual 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 limitações

de peso e espaço físico, a substituição de material consiste em uma boa solução.

Dentre os materiais atualmente disponíveis para a fabricação de blocos de motores diesel em larga escala, o ferro fundido vermicular é o mais promissor. Entretanto, apresenta o problema de baixa usinabilidade, o qual tem, historicamente, limitado sua aplicação, devido ao alto custo de fabricação (Marquard et al., 1998).

Diante deste problema, a usinabilidade do ferro fundido vermicular passou a ser investigada intensamente desde 1995. O Instituto PTW¹, na Alemanha, é o principal centro de pesquisas do assunto na atualidade. Empresas automobilísticas, fabricantes de ferramentas, fundições e outros institutos de pesquisa têm empreendido esforços, na maioria das vezes em conjunto, no sentido de tornar viável e competitiva a usinagem de blocos de vermicular. A Empresa SinterCast² tem desenvolvido e comercializado a tecnologia de fabricação do vermicular sem adição de titânio para produção em larga escala.

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

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 Fundições³.

O trabalho consiste, inicialmente, na obtenção de duas variações do ferro fundido vermicular, cada qual com um tipo de perlita predominante.

Em um segundo momento, realiza-se a avaliação da usinabilidade de um material de referência, que é o ferro fundido cinzento, atualmente utilizado na fabricação de blocos de motores e outras peças, e o estudo da usinabilidade dos dois tipos de ferro fundido vermicular produzidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ferro Fundido Vermicular

A ampla aplicação do ferro fundido cinzento na fabricação de blocos de motor está fundamentalmente ligada à sua excelente usinabilidade e à sua boa condutividade térmica. A eficiência do material em trocas térmicas deve-se ao fato de possuir a grafita espacialmente interconectada, uma vez que esta possui maior condutividade térmica do que a matriz (Jaszczak, 2001). No entanto, a grafita lamelar e interconectada provoca a uma redução de resistência mecânica, ductilidade e tenacidade do material, pois gera descontinuidades na matriz assim como efeitos de entalhe (Marquard et al., 1998). Já no ferro fundido vermicular, boa parte da grafita encontra-se interconectada, no entanto, com uma geometria distinta (Fig.1), gerando descontinuidades menos pronunciadas e menores efeitos de entalhe.

A forma e a disposição da grafita, que são as diferenças fundamentais do ferro fundido vermicular em relação ao cinzento, conferem ao vermicular um ganho substancial de propriedades mecânicas, destacando-se as resistências mecânica e à fadiga, com uma perda pouco significativa de condutividade térmica.

O processo de obtenção do vermicular influencia decisivamente em sua usinabilidade. A vermicularização da grafita deve-se à ação do magnésio, que é um elemento nodulizante. Para a formação da grafita compactada, o teor de magnésio ativo na liga deve ser mantido na faixa de, aproximadamente, 0,01 e 0,02%. Como este controle de composição é complexo, nos processos normais de fundição utiliza-se titânio, elemento antinodulizante, em teores de 0,1 a 0,2%, o qual amplia a faixa de obtenção de vermicular para valores mais altos de magnésio. No entanto, a adição de Ti implica na formação inclusões duras de carbonetos e carbonitretos, o que prejudica substancialmente a usinabilidade do vermicular (Dawson, 1994 e Dawson et al., 1999).

1. Instituto PTW – Alemanha: *Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen. Technische Universität Darmstadt.*

2. Empresa SinterCast S/A – Suíça: Empresa que vem desenvolvendo a tecnologia de fabricação de ferro fundido vermicular.

3. Empresa TUPY Fundições Ltda – Joinville – SC: Fornecedora de fundidos, brutos e acabados, à indústria automobilística.

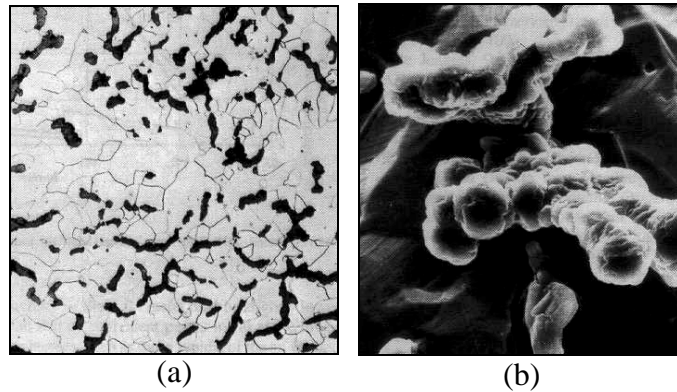


Figura 1. Micrografia do ferro fundido vermicular. (a) Micrografia óptica. (b) Forma espacial da grafita compactada. MEV 395x. (ASM, 1996).

2.2 Fatores influentes na usinabilidade dos vermiculares

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

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

Uma ampla explanação poderia ser realizada a respeito das variáveis supracitadas. Entretanto, o presente artigo limita-se a tratar apenas dos efeitos intimamente relacionados às variáveis presentes nos materiais em estudo, isto é, a forma da grafita, a proporção de perlita e o tipo de perlita.

2.2.1 Efeito da forma da grafita

Em ferros fundidos, a forma, o tamanho e a quantidade da grafita são normalmente mais significativos nas propriedades mecânicas do que a sua composição química (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 a ser mais dúctil. O comportamento frágil do ferro fundido cinzento faz com que o contato do material com o flanco e a face da ferramenta seja intermitente (Cohen et al., 2000), existindo portanto intervalos de tempo em que não existe contato abrasivo sobre a ferramenta (Dawson et al., 1999).

2.2.2 Influência da perlita

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 Fe_3C na perlita é de 12%. No entanto, na prática, a velocidade de resfriamento, a presença de elementos perlitizantes e inoculantes influenciam na formação da perlita, que passa a apresentar uma proporção de Fe_3C na faixa de 8-15% (Dawson et al., 1999).

Um estudo realizado por Bates (1996), revela a relação entre o teor de Fe_3C da perlita e a usinabilidade de ferros fundidos cinzentos e nodulares. Os resultados mostram que o número de

furos produzidos por cada ferramenta cai bruscamente com o aumento do teor de Fe_3C na perlita (Fig. 2).

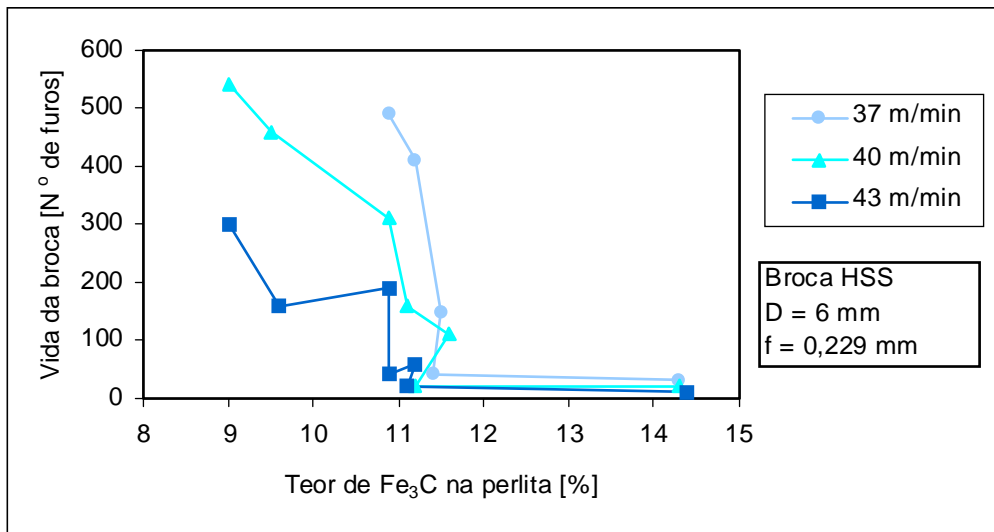


Figura 2. Redução da vida da ferramenta com o aumento da quantidade de Fe_3C na fase de perlita (Bates, 1996).

b) Proporção perlita / ferrita

A resistência mecânica de um material é proporcional à razão perlita / ferrita, mantendo-se as demais variáveis constantes. Dawson et. Al (1999) afirmam que o aumento na proporção de perlita não implica necessariamente em um maior desgaste da ferramenta de usinagem. Ensaios 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 realizados testes com metal-duro e CBN. Para cada um deles, uma velocidade de corte alta e uma baixa. Os testes revelaram que os efeitos proporção de perlita não são os mesmos para os processos de torneamento e fresamento. Considerando a faixa entre de 70% e 97,5% de perlita, enquanto a vida da ferramenta de torneamento diminui com o aumento da perlita, no fresamento a vida aumenta substancialmente, principalmente no caso do CBN (Dawson et al., 1999).

2.2.3 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 melhorar 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 superfície da ferramenta, formando uma camada protetora. Já no vermicular, não se observa a formação da referida camada, pois o teor de enxofre normalmente presente é da ordem de 0,01%, dez vezes menor do que no cinzento. 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 protetora de MnS (Reuter et al., 2000).

3. METODOLOGIA

3.1 Caracterização dos materiais usinados

Todos os materiais usinados foram caracterizados através de análises microestruturais, ensaios mecânicos de tração e dureza¹. Os resultados são mostrados na Tab. 1. As micrografias dos três materiais em estudo são exemplificadas nas Fig. 3, 4 e 5.

Tabela 1. Caracterização dos ferros fundidos em estudo.

<i>Propriedade</i>	MATERIAIS		
	CINZENTO 1	VERMICULAR 4	VERMICULAR 5
<i>% vermicular</i>	lamelar	92	91
<i>% nodular</i>	lamelar	8	9
<i>% perlita</i>	97	84	89
<i>Dureza média [HB]</i>	214	237	229
<i>Classe</i>	250	450	450

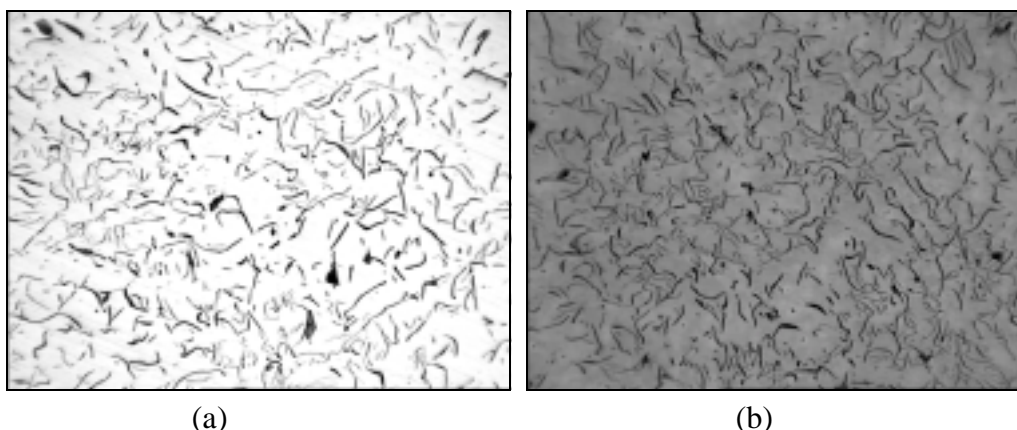


Figura. 3. Micrografias do ferro fundido Cinzento 1 sem ataque químico (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x.

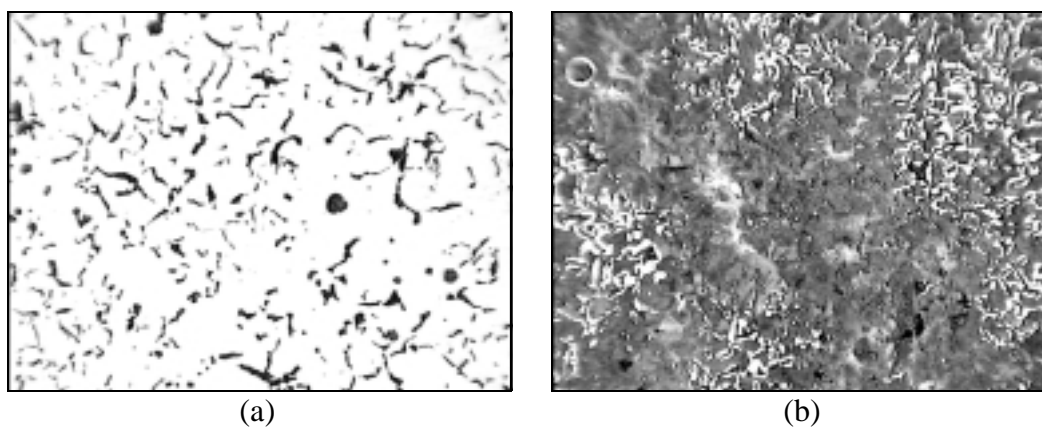
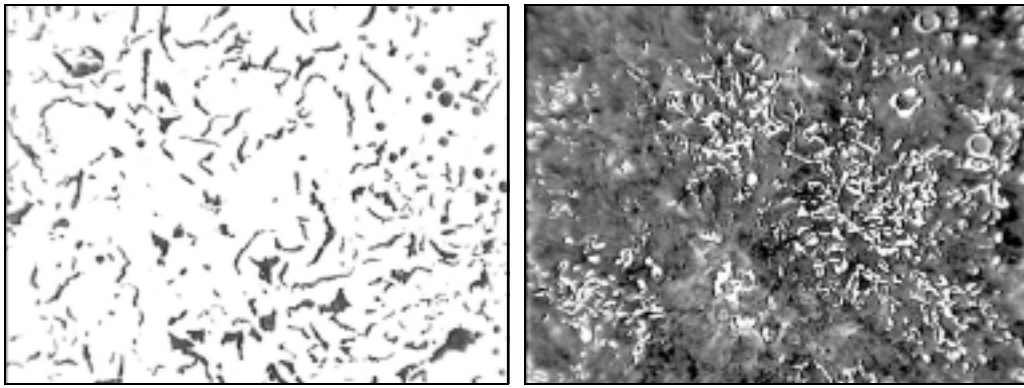


Figura. 4. Micrografias do ferro fundido Vermicular 4 sem ataque químico (a); com ataque de nital 2% (b). Aumento de 100x.

1. Dureza Brinell com esfera de 5 mm de diâmetro e carga de 7.355 N.



(a)

(b)

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

Através de imagens de microscopia eletrônica, com aumento de 5.000 x, procurou-se caracterizar os tipos de perlita, isto é, a proporção de Fe_3C na perlita, dos vermiculares 4 e 5. Qualitativamente, pôde-se verificar que o vermicular 4 possui a perlita com maior quantidade de cementita, com pequenas distâncias entre lamelas. O vermicular 5 possui um espaçamento maior entre as lamelas de cementita, as quais apresentam menor espessura e muitas descontinuidades, conforme micrografias nas Fig. 6 e 7, dos materiais 4 e 5, respectivamente.

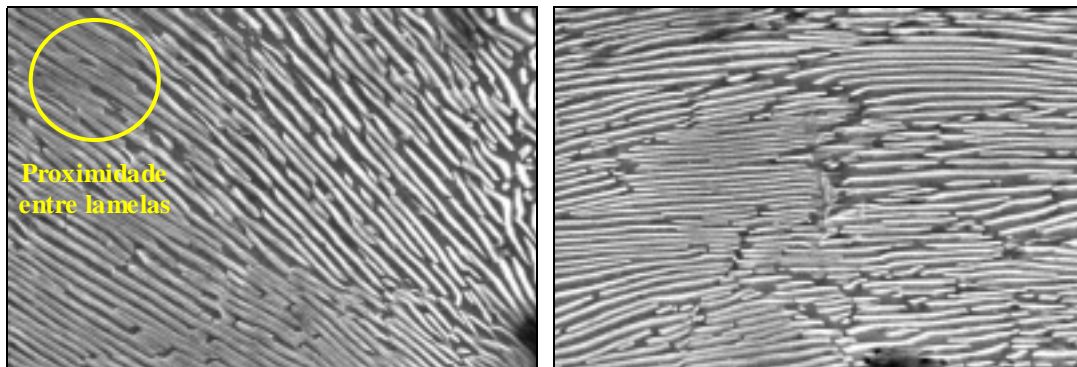


Figura 6. Perlita típica do Vermicular 4. MEV 5.000x. Nital 2%.

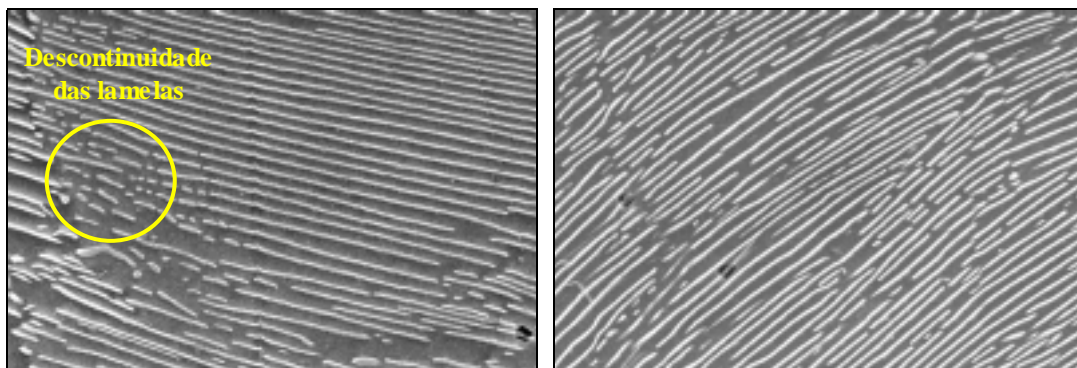


Figura 7. Perlita do vermicular 5. MEV 5.000x. Nital 2%.

3.2 Ensaios de Usinagem

Todos os ensaios de usinagem foram realizados em corpos de prova circulares, com diâmetro de 104 mm e espessura de 29 mm. Em uma das faces de cada corpo de prova foi realizado um faceamento e sobre esta, gerados 39 furos de 22 mm de profundidade. A cada corpo de prova, uma medição do desgaste da broca.

3.2.1 Ferramentas

As brocas utilizadas, da marca *Walter*, código B1422.Z.10,0.Z2.49, diâmetro 10 mm, 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. Utilizou-se um mandril hidráulico, da marca *Mapal*, código Ø10 sc 0799.

3.2.2 Máquina-ferramenta

Os ensaios de furação foram realizados em uma fresadora vertical CNC, 3 eixos, da marca *ROMI* modelo Polaris F400.

3.2.3 Critério de Fim-de-vida

A avaliação da performance das brocas ao longo dos ensaios de usinagem se deu pela medição do desgaste de flanco máximo (VB_{max}). Na Fig. 8, observa-se a posição de ocorrência do VB_{max} , no diâmetro da broca. 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.

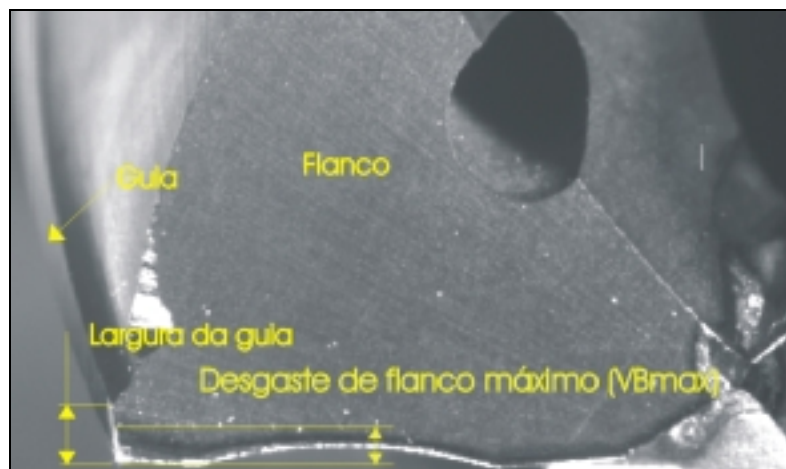


Figura 8. Medição do desgaste nas brocas.

3.2.4 Parâmetros de usinagem

Todos os ensaios de usinagem foram realizados com $v_c = 80$ m/min e $f = 0,25$ mm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os materiais em estudo foram produzidos sob diferentes parâmetros de fundição, visando avaliar e melhorar a usinabilidade. As comparações a seguir são realizadas por partes, em função das propriedades dos materiais.

4.1 Usinabilidade do Cinzento 1 vs. Vermiculares 4 e 5

Estes testes foram conduzidos essencialmente com o intuito de comparar o material atualmente utilizado na fabricação de blocos de motores, o ferro fundido FC-250, com os vermiculares obtidos.

No gráfico da Fig. 9, observa-se que o ferro fundido cinzento, material de referência, propiciou uma vida de ferramenta maior do que os vermiculares, apesar de possuir uma maior quantidade de perlita. A diferença fundamental do ferro fundido cinzento é a grafita lamelar. As discontinuidades da matriz e o efeito de entalhe gerados pela grafita lamelar reduzem as propriedades mecânicas e facilitam a remoção e a quebra dos cavacos, melhorando a usinabilidade.

A presença do MnS no cinzento facilita a quebra dos cavacos, além de poder propiciar a formação de uma camada protetora de MnS sobre a face da ferramenta, dificultando os mecanismos de desgaste de difusão e abrasão. Porém, testes realizados por Reuter et. al (2000) revelaram que a formação de tal camada é mais intensa em altas velocidades de corte, acima daquela empregada no presente trabalho (80 m/min). No vermicular, admite-se ausência de S e conseqüente inexistência de camada de MnS sobre a ferramenta de usinagem.

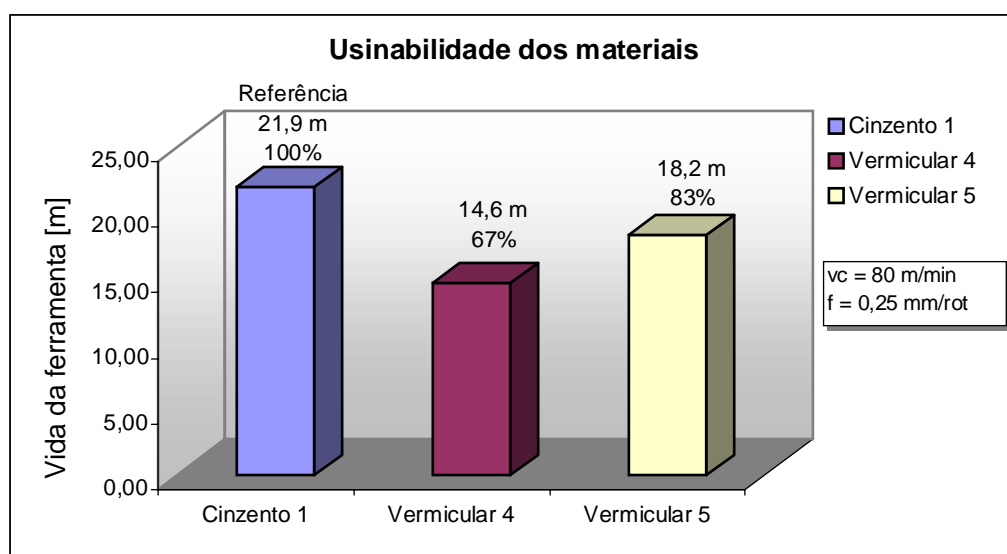


Figura 9. Gráfico comparativo da usinabilidade dos materiais em estudo, segundo o critério de vida $VB_{max} = 0,40$ mm.

4.2 Usinabilidade do Vermicular 4 vs. Vermicular 5

A variável proporção de Fe_3C na perlita é avaliada isoladamente na comparação entre os vermiculares 4 e 5. As perlitas dos vermiculares 4 e 5 são claramente diferenciáveis: a primeira com maior quantidade de Fe_3C , lamelas mais espessas e próximas e a segunda, com lamelas de Fe_3C claramente menos espessas e mais distanciadas.

A alteração do tipo da perlita propiciou um ganho na vida da ferramenta do Vermicular 5 de 25% em relação ao Vermicular 4. O Vermicular 5, apresentou uma usinabilidade de 85% em relação ao cinzento (Fig. 9), o que é um resultado bastante positivo, uma vez que possui maior dureza e resistência mecânica.

5 CONCLUSÃO

Do presente artigo, podem ser extraídas conclusões e confirmações de hipóteses levantadas a respeito da usinabilidade de vermiculares. As informações aqui constantes, passam a constituir o conjunto de informações tecnológicas que vêm sendo formado no objetivo de passar a utilizar o referido material na produção seriada de peças, com qualidade e a um custo competitivo.

A seguir, serão apresentadas as conclusões técnicas da pesquisa:

- A fabricação dos materiais foi bem sucedida, pois os parâmetros de fabricação geraram ferros fundidos com características perfeitamente diferenciáveis;
- O processo de furação, empregado nas avaliações de usinabilidade, mostrou-se confiável e sensível o suficiente para detectar as diferenças entre os materiais. Dentre todos os ensaios realizados, não existiram resultados demasiadamente dispersos ou ilógicos;
- Os ferros fundidos vermiculares, da classe 450, Vermiculares 4 e 5, apresentaram usinabilidade de 67% e 83%, respectivamente, em relação ao cinzento FC-250 perlítico;
- O controle das variáveis de fundição permitiu obter o Vermicular 5, o qual possui características de resistência mecânica, dureza e proporção de perlita adequadas à fabricação de blocos de motores, com uma usinabilidade apenas 17% inferior ao cinzento FC-250.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao financiamento obtido junto à CAPES e ao apoio da Empresa TUPY Fundições Ltda.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASM. “Speciality handbook: cast irons”. Estados Unidos: ASM International, 1996, p. 33-267.
- 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.
- 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, American Foundrymen’s Society, Pittsburg, 2000*.
- DAWSON, Steve et al. “The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron”. In: *Design e Machining Workshop – CGI, 1999*.
- 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*.
- 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*.
- JASZCZAK, John A. Michigan “Technological University, Department of Physics and the A. E. Seaman Mineral Museum”. The graphite page. Disponível em: <<http://www.phy.mtu.edu/faculty/info/jaszczak/graphite.html>>. Acesso em 17 dezembro 2001.
- MARQUARD, Ralf; HELFRIED, Sorger e McDONALD, Malcolm. Crank it up: “New materials create new possibilities”. *Engine technology international*, v. 2, p. 58-60, 1998.
- REUTER, Ulrich, et al. “The wear process of CGI cutting and machining developments”. In: *Compacted Graphite Iron – Machining Workshop, Darmstadt, Germany, 2000*.

EVALUATION OF COMPACTED GRAPHITE IRON MACHINABILITY IN DRILLING PROCESS

Lourival Boehs, Dr. Eng. – University of Santa Catarina

Wilson Luis Guesser, Dr. Eng. – Tupy Fundições Ltda
– University of the State of Santa Catarina

Fabiano Mocellin, Eng. Mec. – University of Santa Catarina
Dept. of Mechanical Engineering – UFSC – Postal Address 476 – Postal code: 88049-900
Florianópolis – SC – Brazil
fabianoemc@hotmail.com

Abstract. *Recent years have seen a trend toward the development of Compacted Graphite Iron – CGI – by the automotive industry. Its application is closely related to crankcase of diesel engines, heads and some other parts. The engine peak firing pressures 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. However, it has the necessary characteristics of 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 to the gray cast iron. Considering the manufacturing of CGI parts, the main problem to overcome is its poor machinability. The objective of the present work is to produce two types of CGI and evaluate their machinability in drilling process, comparing to the gray cast iron – FC-250. The drilling tests were carried out using TiAlN coated carbide helical drills.*

Keywords. *machining, machinability, compacted graphite iron, drilling.*