



V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
V NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
25 a 28 de agosto de 2008 – Salvador – Bahia - Brasil
August 25 – 28, 2008 - Salvador – Bahia – Brazil

AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR COM DIFERENTES MICROESTRUTURAS

Eng. Christian Doré¹, chrisdore_2@yahoo.com.br
Eng João Henrique Bagetti¹, joabagetti@yahoo.com.br
Dr Eng Lourival Boehs¹, boehs@emc.ufsc.br
Dr Eng. Wilson L. Guessser^{2,3}, wguessser@tupy.com.br
Dr Ana Helena de Almeida Bressiani⁴, abressia@ipen.br

¹ GRUCON, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário Trindade, CEP 8804-900 Caixa Postal 476, Florianópolis, SC, Brasil.

² TUPY Fundições Ltda. Engenharia Metalúrgica, Rua Albano Schmidt 3400, CEP 89206-900, Joinville, SC, Brasil.

³ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, Brasil.

⁴ IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil.

Resumo: A crescente exigência por produtos de alto desempenho e leis ambientais por menores índices de poluições, faz do ferro fundido vermicular uma das alternativas para atendimento das demandas, principalmente na construção de blocos e cabeçotes de motor diesel, substituindo materiais como ferro fundido cinzento e o alumínio. Apesar das boas propriedades mecânicas do ferro fundido vermicular e dos vários benefícios que trás para a indústria automobilística, a sua estrutura e a composição são de difícil usinabilidade o que se tornam fatores limitantes de sua aplicação. Um desses fatores é o limite de nodularidade que deve estar em uma faixa de 0 a 20%, pois quanto maior seu aumento, maior será a resistência a tração e a rigidez, diminuindo a condutividade térmica e usinabilidade do material. Nesse contexto a pesquisa procurou verificar o efeito dessa variação da nodularidade na usinabilidade do ferro fundido vermicular através de ensaios de torneamento de longa duração. Os critérios utilizados para a análise foram os tempos de vida e mecanismos de desgaste das ferramentas de corte de metal-duro e de cerâmicas. Os resultados mostram que com o aumento da nodularidade o comportamento das ferramentas de corte de metal-duro difere do comportamento das ferramentas cerâmicas e que o metal-duro ainda é a melhor alternativa para a usinagem do ferro fundido vermicular em baixas velocidades de corte.

Palavras-Chave: Ferro Fundido Vermicular, Torneamento; Microestrutura, Usinabilidade.

1. INTRODUÇÃO

As constantes exigências pela diminuição das emissões de poluentes (CO₂), juntamente com a redução do consumo dos combustíveis fósseis, transformou-se em um objetivo generalizado entre os fabricantes de veículos [1]. É neste contexto que o ferro fundido vermicular vem se destacando substituindo os materiais atualmente utilizados na fabricação de blocos de motores, principalmente diesel. Porém apesar das boas propriedades mecânicas e dos vários benefícios que o ferro fundido vermicular trás, a sua estrutura é de difícil usinabilidade tornando-se fator limitante de sua aplicação [2].

A grande dificuldade na usinagem do ferro fundido vermicular, comparada ao ferro fundido cinzento, está relacionada a dois fatores principais: a sua alta resistência mecânica, envolvendo grandes forças de corte, e a ausência de sulfeto de manganês em sua microestrutura, sempre presente no ferro fundido cinzento, e que deposita-se sobre a ferramenta de corte e garante ação lubrificante local [3].

Outro fator, também importante e que deve ser levado em consideração na fabricação do ferro fundido vermicular é o limite de nodularidade que deve estar em uma faixa de 0 a 20%, pois quanto maior a quantidade de nódulos de grafita na sua microestrutura, maior será a resistência a tração e a rigidez, diminuindo a condutividade térmica e usinabilidade do material [2]. Desse modo o presente trabalho tem como objetivo verificar quais os efeitos da variação da nodularidade do ferro fundido vermicular no tempo de vida e desgaste de ferramentas de corte de metal-duro e de cerâmica, através de ensaios de torneamento de longa duração.

Dois fatores justificam a escolha do ferro fundido vermicular para o referido estudo que são os poucos estudos relacionados à usinabilidade do material, principalmente quanto se refere à influência da sua composição e microestrutura e por ser um material em ampla expansão nos mercados interno e externo.

2. REFERENCIAL DA PESQUISA

A grafita no ferro fundido vermicular aparece na forma de vermes ou de partículas de grafita vermicular, e daí o nome dado a esse material. As partículas são alongadas e orientadas aleatoriamente como no ferro cinzento, porém são mais curtas, mais grossas, e de bordas arredondadas. As partículas de grafita compacta estão conectadas os seus vizinhos mais próximos dentro da célula eutética. Essa morfologia da grafita, com as bordas arredondadas e as superfícies irregulares das partículas da grafita, resulta em maior adesão entre a grafita e a matriz metálica, dificultando assim a iniciação e o crescimento de trincas e fornecendo propriedades mecânicas superiores [6].

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

Do ponto de vista químico o ferro fundido vermicular não apresenta uma diferença significativa em relação ao ferro fundido cinzento e nodular. A diferença entre essas ligas se deve principalmente ao tipo da morfologia de suas grafitas como pode ser visto na Figura 1 [1,4].

A formação da grafita vermicular deve-se a ação do magnésio que é um elemento nodularizante, em um teor ativo entre 0,01 e 0,02%. Esta quantidade é insuficiente para gerar o ferro fundido nodular, mas suficiente para assegurar uma faixa estável do ferro fundido vermicular sem a formação de grafita lamelar [5].

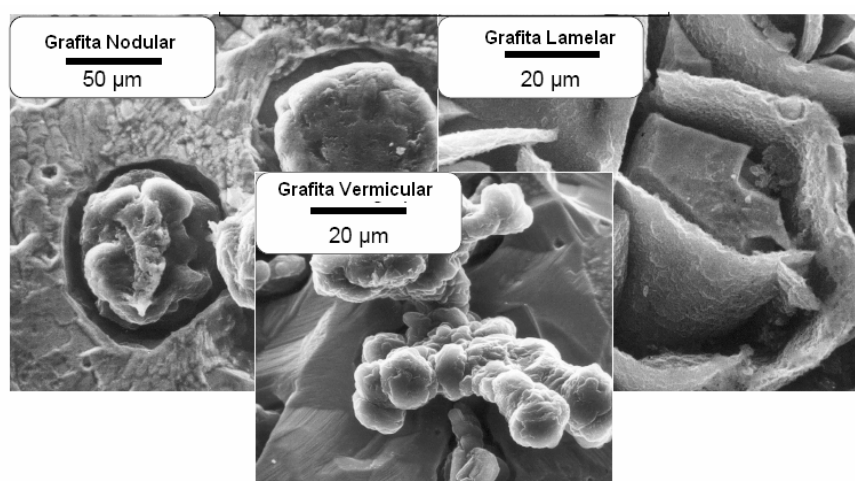


Figura 1. Morfologia típica da grafita nodular, vermicular e lamelar [14].

Na Tabela 1 são apresentadas propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular, comparadas ao ferro fundido cinzento e nodular.

Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas do ferro fundido vermicular [7].

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

O ferro fundido vermicular inclui invariavelmente algumas partículas (esferoidais) de grafita nodular. Enquanto a nodularidade aumenta, aumentam também a força e a rigidez diminuindo a usinabilidade e a condutividade térmica [8, 6]. Além disso, com o aumento da nodularidade a resistência mecânica do material também é elevada influenciando diretamente na sua usinabilidade [6]. A Tabela 2 mostra a influência da nodularização da grafita nas propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular. Para blocos e cabeçotes de motores que combinam grande carregamento térmico e mecânico e que também exigem usinagem extensiva, requerem um controle maior da microestrutura, permanecendo a nodularidade dentro de uma escala de 0-20% [9, 10].

Tabela 2. Influência da Nodularização nas propriedades físicas e mecânicas do ferro fundido vermicular [11].

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

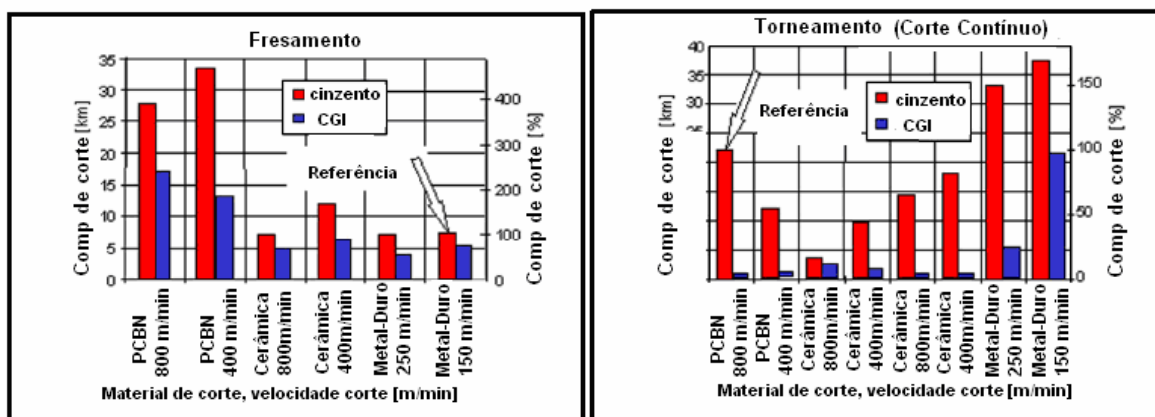
Os ferros fundidos são formados por partículas de grafita em uma matriz de ferrita e/ou perlita. Durante a solidificação o material passa por uma faixa de temperatura na qual se encontra sob a forma de austenita. Abaixo de 725° C o material se transforma em ferrita ou perlita. Se a velocidade de resfriamento é lenta o suficiente e as condições químicas são favoráveis, os átomos de carbono migram para formar partículas de grafita. Entretanto, se os átomos não conseguirem sair da matriz ocorrerá à formação de perlita. A perlita é constituída por uma estrutura lamelar alternada entre ferrita e cementita (Fe_3C). Essas lamelas de Fe_3C reforçam a matriz tornando-a mais dura e resistente [12].

A razão perlita / ferrita é outro fator determinante na resistência mecânica do material. Um aumento de 15% para 95% de perlita no ferro fundido vermicular mantendo as demais variáveis inalteradas, induz a um aumento de tensão limite de resistência de 300 MPa para 480 MPa refletindo na sua usinagem [12].

2.1 Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular

Segundo Dawson [6], o ferro fundido vermicular possui um limite de resistência 75% maior que o ferro fundido cinzento e uma rigidez 45% maior refletindo na diminuição de sua usinabilidade. A Figura 2, obtida inicialmente usando parâmetros de corte padrão do ferro cinzento, mostra que o corte em velocidades mais baixas (entre 100-200 m/min) com as ferramentas convencionais de metal-duro fornece aproximadamente 50% da vida da ferramenta em comparação ao ferro fundido cinzento em operações de fresamento e de torneamento [6].

Similarmente, a operação de fresamento em alta velocidade (400-800 m/min) fornece aproximadamente 50% da vida da ferramenta do que para ferro fundido cinzento ao usar ferramenta de nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) ou insertos cerâmicos. Entretanto, a diferença entre a usinabilidade do ferro fundido vermicular e do ferro cinzento é mais significativa ao usar ferramentas de PCBN ou insertos de cerâmica em operações contínuas de alta velocidade do corte, tais como o torneamento e brunimento do cilindro [6].



Xavier [13] em sua pesquisa realizou testes de torneamento com ferramentas de metal-duro, cerâmica e nitreto de boro cúbico (CBN), para verificar qual dessas ferramentas possui melhor desempenho na usinagem de ferro fundido vermicular. O material possuía uma matriz metálica com 92% de perlita e 8% de ferrita, grafita na forma III e IV sendo 92% vermicular e 8% nodular e dureza média de 236 HB. Diante dos resultados obtidos dentre as ferramentas de corte a que se mostrou mais adequada tecnicamente foi a de metal-duro em baixa velocidade de corte. Essa ferramenta possuía três camadas de revestimento sendo a primeira de carbonitreto de titânio (TiCN), a intermediária de óxido de alumínio (Al_2O_3) e a camada externa de nitreto de titânio (TiN). Os resultados obtidos por Xavier [13] podem ser vistos na Figura 3. O rendimento superior dessa ferramenta está relacionado ao revestimento de TiN que proporcionou baixo

coeficiente de atrito protegendo a mesma por mais tempo da ação dos mecanismos de desgaste, que no ferro fundido vermicular são potencializados devido seu comportamento abrasivo, adesivo e o comportamento dúctil do cavaco.

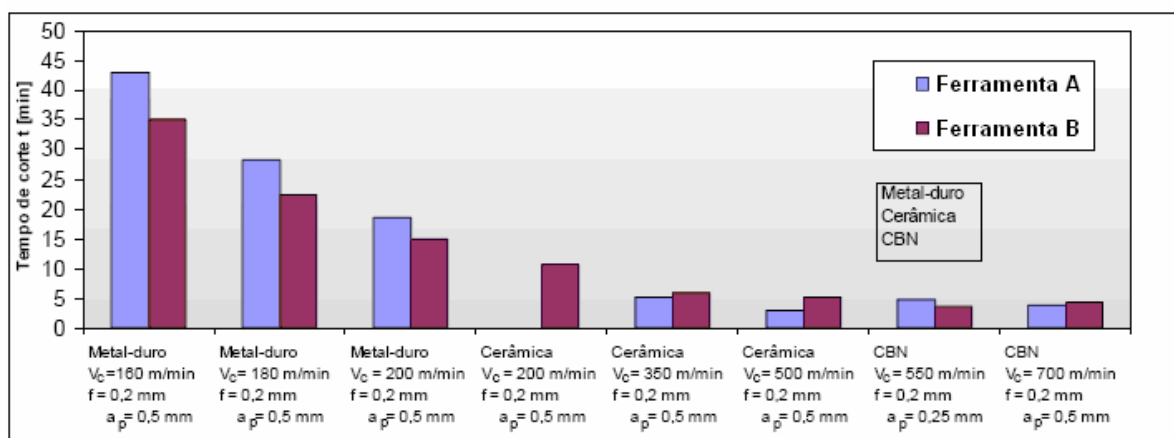


Figura 3. Desgaste ferramenta de metal-duro em torneamento realizado por Xavier [13].

Outro trabalho que se destaca é o de Mocellin [15], que avaliou a usinabilidade do ferro fundido vermicular com diferentes propriedades através de ensaios de furação de longa duração. Os corpos de prova foram furados com brocas de metal-duro revestidas por TiNAl monocamada, sendo que o desgaste de flanco de 0,40mm foi considerado como critério de fim de vida para as ferramentas.

Analisando os resultados obtidos, pode-se dizer que os diferentes tipos de ferros fundidos vermiculares obtidos de variáveis de fundição controladas podem fornecer uma ampla gama de usinabilidades. Com a adição de elementos de liga para formar um ferro fundido vermicular 100% perlítico, consegue-se apenas 44% de usinabilidade em relação ao ferro fundido cinzento, sendo que os vermiculares com 84% de perlita apresentaram uma usinabilidade de 67% em relação aos cinzentos. Já o resultado do vermicular 3 foi excelente, no entanto possuía uma baixa proporção de perlita e dureza bastante inferior ao cinzento 1 [15]. Os resultados obtidos por ele estão representados na Figura 4.

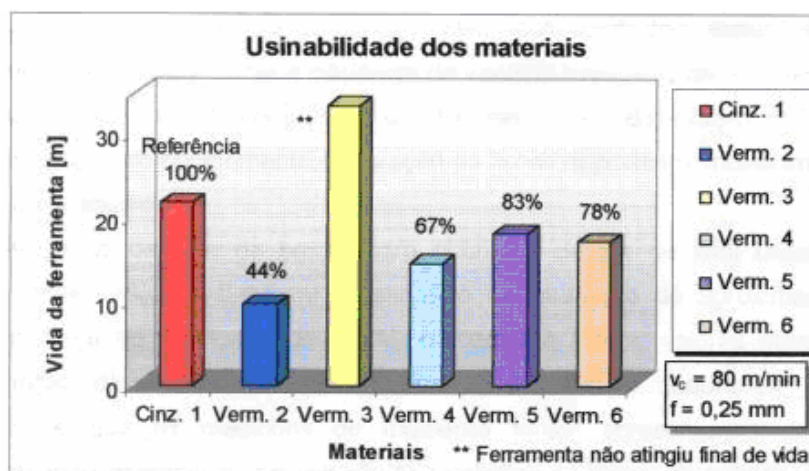


Figura 4. Usinagem de diferentes microestruturas de ferro fundido vermicular pelo processo de furação [15].

3. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Nesta pesquisa optou-se pela realização de experimentos de torneamento de longa duração. O torneamento foi escolhido por ser um processo mais barato, de fácil execução e que possibilita fazer aproximações, no que tange a vida da ferramenta, ao processo de mandrilamento, que é onde se apresenta ainda grandes problemas para a usinagem do vermicular. Para realização dos ensaios foi utilizado um torno ROMI com rotação máxima de 2000 rpm. Como ferramenta de corte utilizou-se metais-duros revestidos e de cerâmicas de nitreto de silício (Si_3N_4) revestida e óxido de alumínio (Al_2O_3).

As ferramentas de metal-duro foram denominadas de MD-3005 e MD-AC700 fabricadas com substrato K10 e geometria CNM 120408 de acordo com a norma ISO 1832-1985. A primeira dessas ferramentas possui três camadas de revestimento sendo a primeira de TiCN, a intermediária de Al_2O_3 e a externa de TiN, tendo esta como vantagem o seu

baixo coeficiente de atrito e alta resistência ao desgaste, enquanto que a segunda ferramenta apresenta apenas duas camadas de revestimento, a interna de óxido de alumínio (Al_2O_3) e a externa de carbonitreto de titânio (TiCN). As ferramentas de cerâmica foram denominadas de CER-NS260, fabricada com geometria CNMG 120408 e substrato de nitreto de silício (Si_3N_4) e de CER-AN fabricada com geometria RNGN 090300 (redondas) e substrato de óxido de alumínio (Al_2O_3) com carboneto de nióbio (NbC). A ferramenta CER-NS260 possui também duas camadas de revestimento sendo uma de óxido de alumínio (Al_2O_3) e outra de nitreto de titânio (TiN), fornecendo um aumento na dureza e maior resistência ao desgaste. Para a fixação das pastilhas de corte foram utilizados dois suportes de ferramenta fornecidos pela empresa Sandvik, com o código DCLNR 2525M12 e CRSNR 2525M09.

Nesta pesquisa optou-se pela utilização de corpos de prova de geometria cilíndrica com comprimento de 205 mm, diâmetro externo de 145 mm e diâmetro interno de 90 mm. Antes da realização dos ensaios foi feita uma pré usinagem dos corpos de prova sendo removida uma camada de aproximadamente 3 mm no diâmetro externo com objetivo de garantir que falhas de fundição e efeitos de uma má solidificação da liga afetassem a vida da ferramenta de corte durante a realização dos ensaios. Os corpos de prova foram denominados de VER-1 e VER-3, em função da porcentagem de grafita nodular presente nas ligas.

Antes do início dos ensaios de usinagem, foram realizados ensaios de caracterização da microestrutura dos corpos de prova e os resultados podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização da microestrutura dos corpos de prova.

Material	Vermicular	Nodular	Forma Grafita	Perlita	Ferrita	Dureza da Superfície
VER-1	94%	6%	III e IV	98%	2%	278 HB
VER-3	64%	36%	III e IV	95%	5%	241 HB

Na liga VER-1 foi observado o aparecimento de inclusões duras (carbonetos) oriundas do processo de fundição. A diminuição na inoculação para obtenção de uma liga com menor nodularidade fez com que houvesse uma segregação de 1% de carbonetos no material. Entre esses carbonetos podemos citar a cementita ou carboneto de ferro. Na Figura 5 estão representadas as microestruturas da liga VER-1 e da VER-3.

A realização dos ensaios ocorreu no Laboratório do USICON da Universidade Federal de Santa Catarina. Como critério de fim de vida para as ferramentas de corte foi utilizado um desgaste de flanco com valor máximo de 0,3 mm e a referência para a medição do desgaste foi o gume principal de ferramenta de corte. Os parâmetros de corte foram definidos com base na literatura e são: velocidade de corte de 160 m/min, avanço de 0,2 mm/rot e profundidade de corte de 0,5 mm para as ferramentas de metal-duro e para as ferramentas de cerâmica velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,2 mm/rot e profundidade de corte de 0,5 mm.

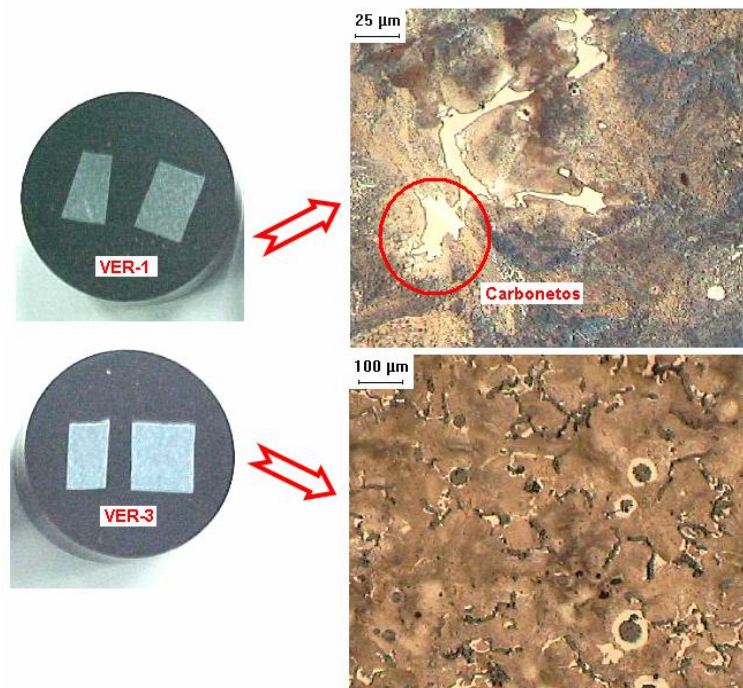


Figura 5. Imagens da microestrutura das ligas VER-1 e VER-3.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente foram realizados os ensaios de desgaste com a ferramenta de metal-duro MD-3005 na liga VER-1, que apresentou um tempo médio de vida de aproximadamente 26 minutos para um desgaste de flanco $VB = 0,3$ mm como pode ser visto na Figura 6. Nesta liga a ferramenta apresentou um desgaste linear ao longo do tempo até um $VB=0,2$ mm e após isso a taxa de desgaste eleva-se consideravelmente atingindo o desgaste de flanco escolhido como critério para decretar o fim de vida da ferramenta de corte. A ferramenta MD-AC700 na usinagem da liga VER-1 obteve um tempo de vida de 28 minutos, semelhante ao da ferramenta MD-3005.

Na usinagem da liga VER-3 a ferramenta MD-3005 teve um aumento no tempo médio de vida que passou de 26 minutos para 35 minutos e pode ser visto na Figura. Novamente a ferramenta apresenta uma taxa de desgaste linear ao longo do tempo até um $VB= 0,2$ mm e após isso a taxa eleva-se consideravelmente estabelecendo o fim de vida da ferramenta. Nesta liga a ferramenta MD-AC700 obteve um tempo de vida de 37 minutos, cerca de 5% superior ao tempo da ferramenta MD-3005.

Para as ferramentas de metal-duro, o aumento da nodularidade ocasionou um aumento significativo na vida da ferramenta de corte. Essa verificação contraria a pesquisadores como Guessser [8]; Dawson [6], que afirmam que o aumento da nodularização da grafita, aumenta também a força e a rigidez diminuindo a usinabilidade e a condutividade térmica do ferro fundido vermicular. Esse fato mostra que além da nodularidade outros fatores como o aumento da dureza e a presença de carbonetos na liga VER-1 influenciaram na usinagem diminuindo o tempo de vida da ferramenta de metal-duro com relação à usinagem da liga VER-3.

Os resultados em termos de vida das ferramentas de metal-duro na usinagem da liga VER-1 quando comparados aos obtidos por Xavier [13], nas mesmas condições de corte, se mostram inferiores em 35%. A principal diferença é a menor dureza e ausência de carbonetos na liga utilizada por Xavier, já que em termos de nodularidade e tipo de matriz metálica as ligas são semelhantes. Na comparação dos resultados obtidos na liga VER-3 com os de Xavier [13], a inferioridade nos tempos de vida diminui para 18%. Essa comparação entre a liga VER-3 e a de Xavier, foi realizada para indicar a variação no tempo de vida da ferramenta de corte entre uma liga e outra já que Xavier em seu trabalho utilizou uma liga de baixa nodularidade semelhante à liga VER-1, porém nas mesmas condições de corte e com as mesmas ferramentas utilizadas neste trabalho.

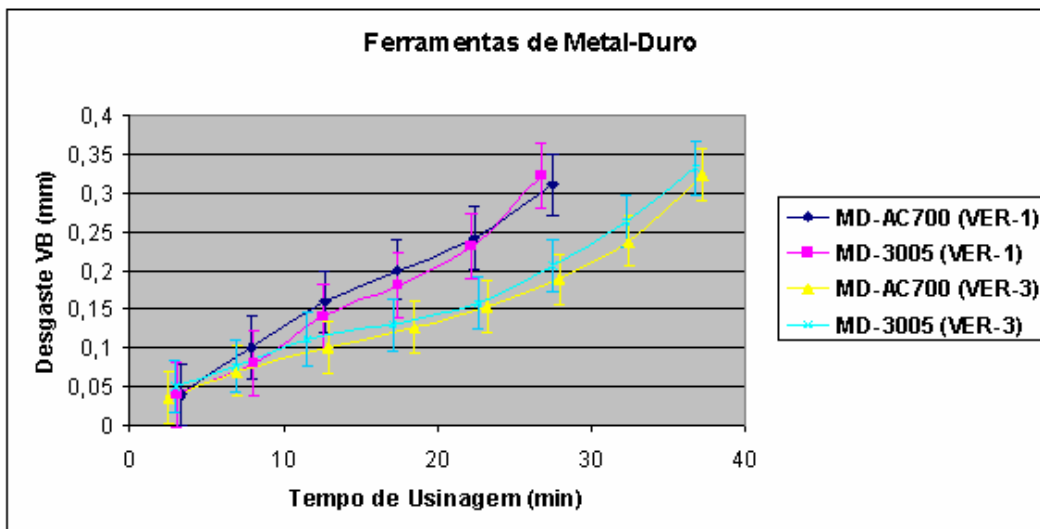


Figura 6. Comportamento do desgaste das ferramentas de metal-duro na usinagem das ligas VER-1 e VER-3.

Quanto ao mecanismo de desgaste nas ferramentas de corte de metal-duro, é apresentada como causa principal a abrasão presente tanto na liga VER-1 quanto na liga VER-3. Na figura 7 pode-se visualizar a marca de desgaste no flanco das ferramentas onde é possível visualizar na liga VER-3 que o gume ficou mais avariado, porém, o menor tempo de vida ocorreu na liga VER-1. Isso mostra que o aumento na dureza e a presença de carbonetos na liga VER-1, junto com a nodularidade, provocaram o fim de vida antecipado da ferramenta. A maior dureza do material, somada a presença de carbonetos, aumenta a abrasividade do cavaco, aumentando assim a taxa de desgaste.

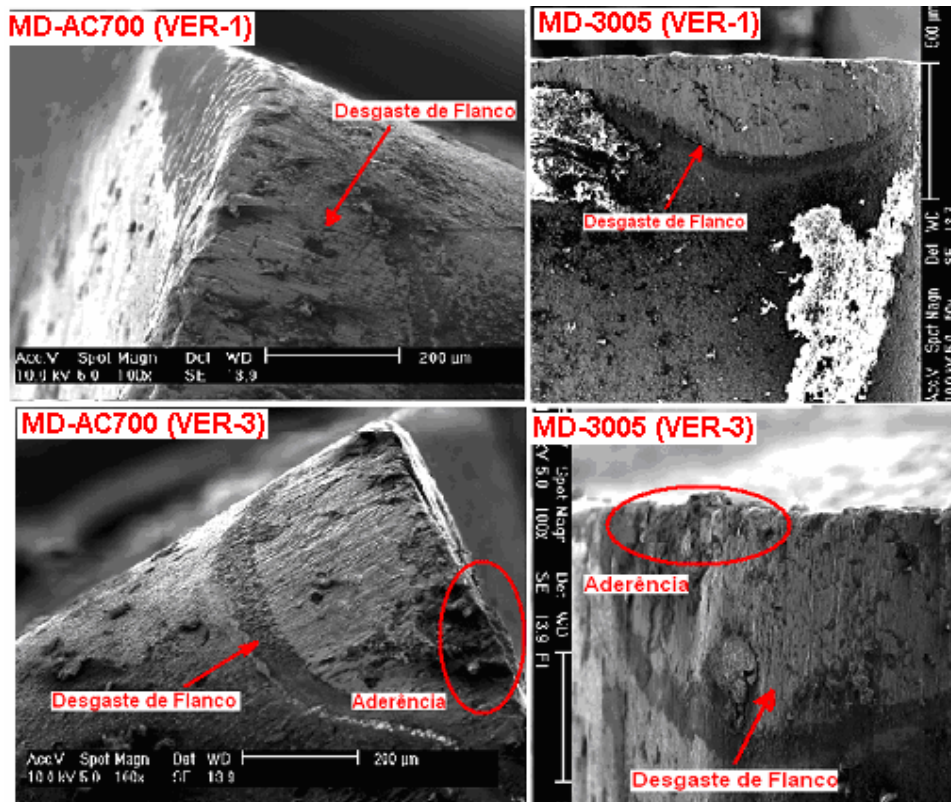


Figura 7. Desgaste de flanco nas ferramentas MD-3005 e MD-AC700 nas ligas VER-1 e VER-3.

Na usinagem da liga VER-1 a cerâmica CER-NS260 apresentou um tempo médio de vida de aproximadamente 6 minutos para um desgaste de flanco $VB=0,3\text{mm}$, como pode ser visto na Figura 8. Já na usinagem com a ferramenta CER-AN o tempo de vida de ferramenta passou para 16 minutos. Na usinagem do ferro fundido com a cerâmica de nitreto de silício percebeu-se uma elevada taxa de desgaste o que diminuiu bastante o efeito do revestimento da ferramenta, porém com a ferramenta de óxido de alumínio o resultado foi bastante expressivo.

Na liga VER-3 o tempo médio de vida da ferramenta CER-NS260 foi de 5 minutos para um desgaste de flanco $VB=0,3\text{ mm}$ e da mesma forma ocorrida na liga VER-1, a taxa de desgaste foi bastante elevada, antecipando o fim de vida da ferramenta, como pode ser visto na Figura 8. Já com a ferramenta CER-AN o resultado foi de 11 minutos novamente cerca de 100% superior a ferramenta cerâmica de nitreto de silício.

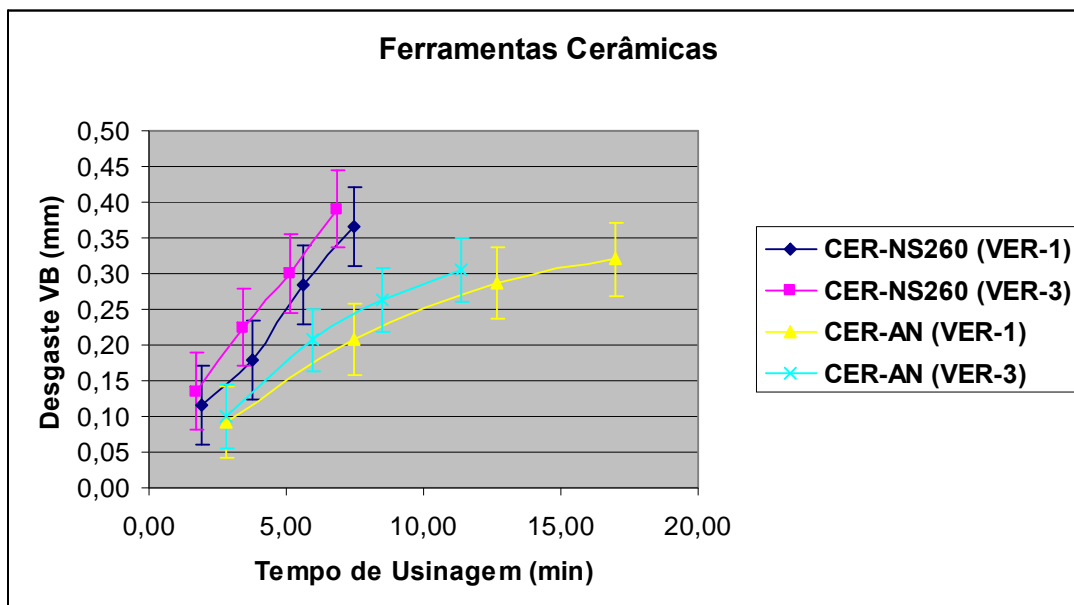


Figura 8. Comportamento do desgaste das ferramentas cerâmicas na usinagem das ligas VER-1 e VER-3.

Os resultados obtidos em termos de vida da ferramenta CER-NS260, quando comparados aos de Xavier [13] nas mesmas condições de corte se mostram cerca de 50% inferiores, indicando que a variação na nodularidade, dureza e presença de carbonetos em uma das ligas influenciou no resultado final. Quando comparamos os resultados da CER-AN com os resultados obtidos por Xavier, verifica-se um ganho representativo de 25%, indicando o bom desempenho dessa classe de ferramenta na usinagem de ferro fundido vermicular.

Na ferramenta cerâmica de nitreto de silício o mecanismo de desgaste ocorrido tanto, no VER-1 quanto no VER-3, foi à abrasão, juntamente com um acentuado desgaste de cratera, este possivelmente provocado pelo mecanismo de difusão. O mecanismo de difusão não foi avaliado neste trabalho, mas pode ser visto na Figura 9 mostra um acentuado desgaste de cratera, que segundo a literatura da área, Stemmer citado por Xavier [13], é um forte indicativo de difusão. Já na ferramenta de óxido de alumínio o mecanismo de desgaste também é abrasão, porém o mecanismo de difusão ocorre com menor intensidade.

Observo-se também uma inversão de resultados entre as ferramentas de metal-duro e as cerâmicas. Na usinagem da liga VER-1 os maiores tempos de vida foram obtidos pelas cerâmicas, enquanto que os maiores tempos de vida das ferramentas de metal-duro foram obtidos na usinagem da liga VER-3.

Os resultados obtidos com a ferramenta de cerâmica na usinagem do ferro fundido vermicular se mostram pouco satisfatórios, quando comparados aos da ferramenta de metal-duro e com os resultados obtidos por Xavier [13], em termos de tempo de vida de ferramenta e condições de corte utilizadas.

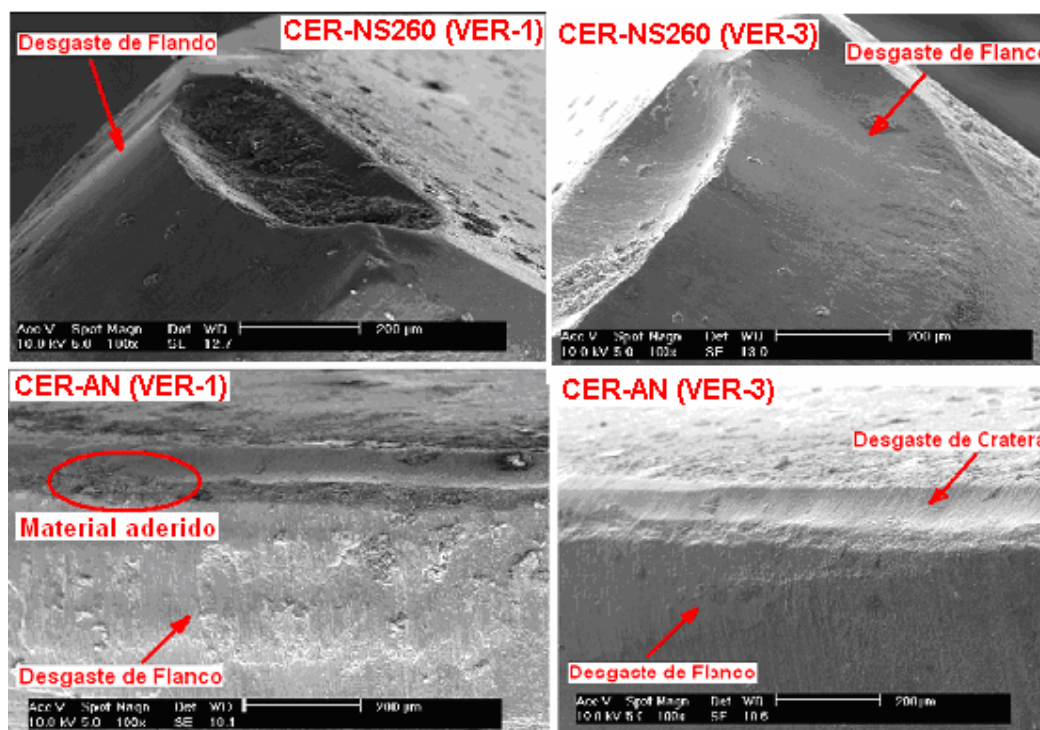


Figura 9. Desgaste de flanco nas ferramentas cerâmicas na usinagem das ligas VER-1 e VER-3.

5. CONCLUSÕES

Com relação à influência da microestrutura na usinagem do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro e de cerâmicas podem-se registrar as seguintes conclusões:

- Tanto na liga VER-1, com menor nodularidade, quanto na liga VER-3, com maior nodularidade, à ferramenta de metal-duro foi superior à ferramenta de cerâmica em termos de tempo de vida, porém em velocidades de corte diferentes. Esse resultado inferior, porém expressivo obtido com a ferramenta cerâmica de óxido de alumínio é de suma importância, pois seve como base para o desenvolvimento de pesquisas nacionais, buscando-se melhorar o desempenho dessas ferramentas na usinagem do ferro fundido vermicular.
- A ferramenta de metal-duro na liga VER-3 obteve um tempo médio de vida 20% superior ao obtido na VER-1. Neste caso o desempenho inferior na usinagem da liga VER-1 pode ser relacionado ao efeito combinado da nodularidade, dureza e presença de carbonetos responsáveis pela diminuição da vida da ferramenta de corte.
- No caso da usinagem com a cerâmica de nitreto de silício o aumento da nodularidade para 36% na liga VER-3 teve maior efeito na vida da ferramenta, diminuindo-a em torno de 20%. O aumento da nodularidade pode ter provocado um aumento no tempo de adesão do cavaco na ferramenta de corte provocando o aumento na taxa

de desgaste e decretando seu fim de vida. Já os melhores resultados obtidos com a ferramenta CER-AN podem ser creditados as boas propriedades fornecidas pelo óxido de alumínio e pelo carboneto de nióbio, que conferem maior resistência ao desgaste em altas temperaturas, maior dureza e maior tenacidade à fratura.

- Quanto à inversão dos resultados entre as ferramentas de metal-duro e de cerâmica se deve a maior dureza e resistência das cerâmicas ao desgaste abrasivo causado pelos carbonetos presentes na liga VER-1, diferente do metal-duro que não tem a mesma resistência, porém as cerâmicas são mais sensíveis a desgaste como aderência e difusão presentes na liga VER-3 de maior nodularidade.
- O mecanismo de desgaste predominante nas ferramentas foi abrasão, tanto para a menor, quanto para a maior nodularidade, e na ferramenta de cerâmica houve também a ocorrência de desgaste de cratera, possivelmente causado pelo mecanismo de difusão não abordado neste estudo. Esses desgastes são resultados do efeito antagônico da nodularidade, dureza e presença de carbonetos sobre a ferramenta de corte.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial a Fundição Tupy Ltda. pela produção dos corpos de prova;
A Pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina e ao CNPq pelo apoio financeiro;
Aos laboratórios de materiais e usinagem por disponibilizar os equipamentos necessários;
A Sandvik pelo fornecimento das ferramentas para realização dos ensaios;
Ao IPEN pela produção da ferramenta cerâmica de óxido de alumínio especial para o trabalho;
Ao Projeto Verde-Amarelo Tupy-LMP/GRUCON pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Andrade, C. “Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN”. Florianópolis, 2005. Dissertação Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [2] Luchner, C., Ludwig, P. “Usinagem do Ferro Fundido com Grafita Vermicular”. Revista Máquinas e Metais, Outubro de 2004. p 34.
- [3] Reuter, U., Schulz, H., Dawson, S., Hollinger, I., Robbins, M., Daeth, J. “The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron”. Society of automotive engineers, Inc, Alemanha, 2001, p 1-18.
- [4] Sintercast. “What is CGI”. Em www.sintercast.com, Acesso Maio de 2006.
- [5] Dawson, S. “Process Control for the Production of Compacted Graphite Iron”. 106th AFS Casting Congress, Kansas City, 4-7 Maio 2002.
- [6] Dawson, S., Schroeder, T. “Practical Applications for Compacted Graphite Iron”. AFS Transactions, American Foundry Society, Des Plaines, USA: Paper 04-047, 2004, p.1-9.
- [7] Mocellin, F., et al. “Study of Machinability of Compacted Graphite Irons for Drilling Process”. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering: vol 26, 2004.
- [8] Guesser, W. “Compacted Graphite Iron – a New Material for Diesel Engine Cylinder Blocks”. II Encontro da SBPMat Brazilian MRS Meeting, 2003.
- [9] Dawson, S., Wurtemberg, M.V. “Experiências Práticas com Ferro Fundido de Grafita Compacta como Material para Componentes Automotivos”. Baseado no trabalho apresentado no 26^o ISATA, 1993, Aachen, Alemanha, 1994.
- [10] Guesser, W., Masiero, I., Cabezas, C. “Thermal Conductivity of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Cylinder Heads”. Revista Matéria, vol 10, n. 2, 2005, p 265.
- [11] Sintercast. “Material Data Sheet: Compacted Graphite Iron”. SinterCast S.A, Suécia, 2001.
- [12] Mocellin, F. “Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação”. Florianópolis, 2002a. Dissertação Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [13] Xavier, F.A. “Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN”. Florianópolis, 2003. Dissertação Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [14] Lohe, D. “Properties of Vermicular Cast Iron at Mechanical and Thermal-Mechanical Loading”. 8th.Machining Workshop for Powertrain Materials, Darmstadt, Novembro 2005.

EVALUATION OF THE CGI MACHINABILITY WITH DIFFERENTS MICROSTRUCTURES

Abstract: The increasing requirement for products of high performance and environmental laws for smaller indices of pollutions it makes of the CGI one of the alternatives for attendance of the demands, mainly in the construction of cylinder blocks and heads of diesel engine, substituting material as gray cast iron and aluminum. Despite the good mechanical properties of the CGI and the some benefits that backwards for the automobile industry, its structure and the composition have a very hard machinability what become limiting factors to its application. One of these factors is the limit of nodularity that must be in a band of 0-20%, therefore how much bigger, its greater will be the tensile strength and stiffness, decreasing machinability and thermal conductivity of the material. In this contest the present work looked to verify the effect of this variation of nodularity in the machinability of CGI through turning process. The criteria used for the analysis of results were the tool life and wear mechanisms of carbide and ceramics tools. The results show that with the increase of nodularity the behavior of carbide cutting tools differs from the behavior of ceramic tools and that the carbide tools still are the best alternative for CGI machining in low speeds of cut.

Keywords: CGI; Turning; Microstructure; Machinability.