



## **ESTUDO DA USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS CINZENTOS LIGADOS AO CrCuSn E AO CrCuSnMo E VERMICULAR CLASSE 350 ATRAVÉS DO MONITORAMENTO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO E POTÊNCIA DE CORTE**

Vitor Tomaz Guimarães Naves, [vitor@mecanica.ufu.br](mailto:vitor@mecanica.ufu.br)<sup>1</sup>  
Marcio Bacci da Silva, [mbacci@mecanica.ufu.br](mailto:mbacci@mecanica.ufu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerdidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG, 38408-100, Brazil

**Resumo:** Utilizado na fabricação de bloco e cabeçote de motores diesel, o ferro fundido cinzento, apresenta como algumas de suas principais características a boa condutividade térmica e bom fator de amortecimento de vibrações que passam a ser fundamentais na aplicação destes materiais em peças automotivas. Porém, esta classe de material apresenta um limite de resistência mecânica menor que de alguns outros tipos de ferros fundidos. Mediante a essas características dos ferros fundidos cinzentos, um outro material, de maior resistência mecânica, passa a ganhar importância na fabricação destes componentes automotivos, por possuir características mais eficientes durante sua aplicação em condições mais severas de uso. Este material é o ferro fundido vermicular ou Compacted Graphite Iron (CGI) que aparece como uma alternativa para a substituição do ferro fundido cinzento por apresentar características, de condutividade térmica e amortecimento de vibração semelhante aos cinzentos. Porém, o CGI apresenta como desvantagem uma pior usinabilidade, ou seja, maior dificuldade na usinagem quando se comparado com o ferro fundido cinzento. Nisto, torna-se importante a investigação do comportamento destes materiais para que haja um aprimoramento das técnicas de fabricação, e assim obter melhores parâmetros de usinagem durante a fabricação com CGI em escala industrial, tais como velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e outros. O objetivo principal deste trabalho é analisar e comparar a usinabilidade de dois ferros fundidos cinzentos ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e um ferro fundido vermicular da classe 350, através da monitoração dos sinais de vibração e potência de corte durante os ensaios de usinagem. Foi também analisado a evolução do desgaste da ferramenta na aresta principal de corte. O processo de fabricação utilizado foi o fresamento frontal, a seco. As ferramentas foram pastilhas de metal duro revestidas com óxido de alumínio. Foram variados três faixas de velocidades de corte, 600, 800 e 1000 m/min. O avanço por dente por revolução e a profundidade de corte foram mantidos constante em 0,2 mm e 1 mm respectivamente. Os resultados demonstraram haver uma relação dos sinais de vibração e potência de corte com a evolução do desgaste na ferramenta. Para os materiais investigados o ferro fundido ligado ao CrCuSnMo foi o que apresentou piores índices de usinabilidade.

**Palavras-chave:** ferro fundido vermicular, ferro fundido cinzento, usinabilidade, fresamento

### **1. INTRODUÇÃO**

A tecnologia de ferros fundidos tem recebido, continuamente, importantes desenvolvimentos, tanto em processos de fabricação como em materiais. Estes desenvolvimentos, resultantes de necessidades nas áreas de aplicação ou ainda de redução de custos, trazem como consequência a atualização tecnológica de um material de longa tradição de uso na indústria automobilística (Guesser, 1997). A grande aplicação dos ferros fundidos em peças automotivas dá origem à necessidade de um aprimoramento em pesquisas, com o objetivo de melhor entender o desempenho destes materiais perante aos diversos tipos de processos de fabricação. Portanto, investimentos em pesquisas e desenvolvimento em novos produtos nesta linha, tornam-se fator de grande importância na economia de uma forma geral.

A substituição por novos materiais torna-se necessário para melhorar o desempenho de funcionamento de alguns produtos. Os blocos e cabeçote de motores diesel, por exemplo, vem sofrendo algumas mudanças a fim de conferir a estes componentes automotivos maiores rendimentos térmicos com o mínimo de impacto ambiental possível. Esse é o grande interesse atualmente das pesquisas com materiais, investigar a melhor aplicação que eles possam apresentar, gerando por fim um menor impacto ambiental.

O material tradicionalmente utilizado para a fabricação de blocos e cabeçote de motores a diesel, o ferro fundido cinzento, chegou a um limite de resistência, possibilitando este aumento de pressão somente pelo aumento da espessura das paredes do bloco, o que eleva o peso e, por sua vez, não cumpre as exigências especificada (CIMM, 2002).

O ferro fundido vermicular ou *Compacted Graphite Iron* (CGI) é um material que apresenta características de condutividade térmica e de amortecimento próximos aos dos ferros fundidos cinzento. Entretanto, suas propriedades mecânicas superiores a estes, possibilitarão a fabricação de componentes com menor peso, melhor desempenho mecânico e redução de poluição ambiental por gases e ruídos. Em contra partida a usinabilidade do CGI é inferior quando se comparado com o ferro fundido cinzento, levando a um maior desgaste da ferramenta. Por isso faz se necessário um intenso trabalho de pesquisa para a melhoria dessas ligas.

O ferro fundido vermicular permite a fabricação de motores diesel com uma combustão ainda mais eficiente e com melhor desempenho, pois admite maiores pressões na câmara de combustão, devido às suas melhores propriedades mecânicas, em relação ao ferro fundido cinzento. Simultaneamente, possibilita a redução nas espessuras das paredes do bloco, tornando o motor mais compacto e mais leve, refletindo na redução do peso da estrutura do veículo (Hick; Langmayr, 2000).

No CGI uma parte do carbono que ficou retido na matriz do material transforma-se em grafita, que aparecem individualmente em forma de verme. Esta grafita apresenta-se de forma interconectadas com extremidades arredondadas e orientadas aleatoriamente, o que lhe confere maior resistência mecânica em relação ao ferro fundido cinzento (Diniz, 2006). A morfologia compacta, com extremidades arredondadas, torna a nucleação e propagação de trincas muito mais difícil que no caso dos ferros com grafita lamelar (Guesser, 2002).

Os ferros fundido cinzento e vermicular, ligas de alumínio e outras ligas menos comum como a de magnésio e alumínio-composito, são alguns dos materiais mais utilizados atualmente na fabricação de bloco de motores. Logicamente, observa-se para a escolha do material a ser empregado nos blocos de motores algumas características tais como: resistência mecânica, densidade do material, custo de fabricação, impactos ambientais produzidos na fabricação dos blocos entre outros. Nestes critérios, o ferro fundido vermicular é o material que preenche os requisitos de forma mais satisfatória. Porém, apresenta um dos piores desempenhos com relação ao custo de usinagem, limitando assim sua aplicação (Marquard et al., 1998).

Com a aplicação cada vez maior do CGI em linhas de produção do tipo *transfer* nas indústrias de peças automotivas, o desgaste das ferramentas de corte motiva a investigação para descobrir a melhor forma para a usinagem destes materiais, como por exemplo, alguns parâmetros de corte mais eficiente. Portanto, devido ao desgaste excessivo que pode ocorrer com a utilização em altas velocidades de corte, a ferramenta de usinagem deve apresentar boas características de resistência mecânica e resistência à fadiga.

A dificuldade na usinagem dos ferros fundidos vermiculares torna-se ainda maior quando estão submetidos a alguns processos de fabricação que envolvem altas velocidades de corte, altas taxas de calor gerado e assim um menor tempo de vida da ferramenta. A operação mais crítica foi - e ainda é - o mandrilamento dos cilindros, processo no qual a redução da vida útil da ferramenta é bastante significativa, estudada por (Moncellin, 2007). Estes problemas fizeram com que várias pesquisas fossem desenvolvidas, com a intenção de tornar viável e competitiva a usinagem do ferro fundido vermicular, envolvendo o meio acadêmico, empresas automobilísticas, os fabricantes de ferramentas, empresas de fundição e blocos de motores (Reuter, 1999).

Dawson (2004), Reuter (2000, 2001), Gusser (2001, 2002), Mocellin (2002, 2007), Xavier (2003), Andrade (2005), Doreh (2007), são exemplos de pesquisadores que investigaram a usinabilidade do ferro fundido vermicular, e citam em seus trabalhos que ao se comparar a usinabilidade de um ferro fundido cinzento com um vermicular, este apresentará uma pior usinabilidade seja qual for o processo de fabricação. Isto geralmente pode estar relacionado a uma série de fatores, principalmente com a microestrutura, morfologia, quantidade e distribuição da grafita na matriz metálica.

Dawson et al., (1999) enumera três principais campos de pesquisa na usinabilidade destes materiais, são elas: melhoria da usinabilidade do CGI, aprimoramento das técnicas de usinagem; desenvolvimento de novos materiais das ferramentas para a usinagem do CGI.

Para o aprimoramento das técnicas de usinagem é importante entender o comportamento de algumas grandezas originadas durante os fenômenos de usinagem, como por exemplo, sinais de vibração do sistema máquina/ferramenta/peça, da potência de corte, o monitoramento das componentes das forças de usinagem, da temperatura interface cavaco-ferramenta, o acabamento das superfícies das peças, a vida da ferramenta e a análise das condições da interface cavaco/ferramenta por meio da utilização de dispositivo de *quick-stop*. Neste trabalho será apresentado os resultados referentes aos sinais de vibração e potência de corte durante a usinagem.

O objetivo primordial deste trabalho resume-se na investigação da usinabilidade de dois ferros fundidos cinzentos ligados ao (CrCuSn e CrCuSnMo) e um vermicular da classe 350, materiais comumente utilizado na fabricação de bloco e cabeçote de motores diesel. A presença dos elementos de liga neste ferros fundidos influenciarão a rigidez e resistência mecânica dos mesmos, o que de alguma forma, influenciará durante os fenômenos de usinagem.

O processo de fabricação adotado foi o fresamento frontal a seco. Foram utilizados ferramentas de metal duro da classe K revestidas com Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de alumínio), pela técnica de deposição química de vapor em médias temperaturas (MTCVD). Foi utilizada uma fresa de metal duro com diâmetro de 125 mm com oito arestas de corte. Foram monitorados os sinais de vibração e a potência de corte durante a usinagem, contribuindo ainda para o entendimento da usinabilidade destes materiais. O trabalho é fruto da parceria entre a Universidade Federal de Uberlândia, através do programa de pós-graduação em engenharia mecânica e a Tupy Fundições Ltda, fabricante dos materiais em estudo, e pioneira na fabricação de ferro fundido vermicular no Brasil.

## 2. METOLOGIA

Os ensaios de usinabilidade foram realizados no processo de fresamento frontal, onde foram monitorados sinais de vibração e potência de corte. Foi utilizada uma fresadora modelo MACH IV fabricada pela ROMI. Foram realizados ensaios em condições severas de usinagem, a fim de acelerar o surgimento de desgastes nas ferramentas de corte. Os valores da velocidade de corte, por exemplo, foram bem superiores daquelas recomendadas pelo fabricante da ferramenta de corte, já os valores de avanço por dente e a profundidade de corte empregados, estiveram dentro da especificação. A ferramenta utilizada foi uma pastilha de metal-duro, com especificação 1505ZNE-KM K20D, revestida por óxido de alumina ( $Al_2O_3$ ). Esta ferramenta é utilizada na linha de produção na usinagem dos blocos e cabeçotes de motores de combustão interna. Esta ferramenta foi desenvolvida especificamente para a usinagem de ferros fundidos vermiculares. O porta ferramenta utilizado tem especificação R365-125Q40-S15M, com 125 mm de diâmetro e com capacidade para oito insertos.

Os parâmetros de corte foram definidos com base naqueles adotados na linha de produção da empresa de fundição parceira desta pesquisa e por testes realizados em um primeiro momento para quantificar a usinabilidade dos materiais. Na Tabela 1 estão descritos os parâmetros utilizados nos testes de usinagem.

Tabela 1 – Parâmetro de Corte Utilizado

Teste	1	2	3
$v_c$ (m/min)	600	800	1000
$v_f$ (mm/rev/dente)	2445	3259	4074
$f_z$ (mm/rev/volta)	0,2	0,2	0,2
$a_p$ (mm)	1	1	1
$a_e$ (mm)	67	67	67
$n$ (rpm)	1528	2037	2546

Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram pré-usinados, tanto na face inferior, para que a peça estivesse em condições de ser nivelada quando da sua fixação sobre a mesa da máquina, quanto na parte superior, para remover a camada bruta de fundição, para evitar influência desta no desgaste das ferramentas. A espessura da camada removida em ambas as faces foi de 3 mm, como pode ser observado na Figura 1 (a). Este procedimento também foi adotado por Bagetti (2008) durante a investigação da usinabilidade de dois ferros fundidos, um cinzento e outro vermicular com a mesma configuração dos corpos de prova utilizados neste trabalho.

Porém, ainda neste trabalho foi necessária a confecção de um rasgo longitudinal junto à base do corpo de prova. Este rasgo tem uma altura de 20 mm e um comprimento de 355 mm que corresponde ao comprimento longitudinal da base do corpo de prova. Isto foi necessário devido ao sistema de fixação do corpo de prova na fresadora, que apenas foi possível através de uma morsa presa a base da mesa de coordenadas da máquina operatriz. Com esta configuração de fixação, foi inevitável não deixar uma parte do corpo de prova em balanço, uma vez que a garra da morsa era menor que o comprimento da base do mesmo. A figura 1 (b) ilustra a fixação do corpo de prova.

O sistema de fixação e o perfil da peça são de extrema importância durante o processo de fresamento, uma vez que eles agem diretamente ligados aos fenômenos de vibração e assim sendo influenciando no acabamento final da superfície usinada. Tentou-se neste trabalho posicionar a peça de modo que o comprimento em balanço fosse o menor possível e ambos de igual comprimento. Neste caso o comprimento em balanço foi de 72 mm em cada extremidade. É esperado que com o aumento da frequência de vibração haja uma maior propagação da amplitude de vibração dos comprimentos em balanço, o que pode influenciar em algumas análises de vida da ferramenta posteriormente.

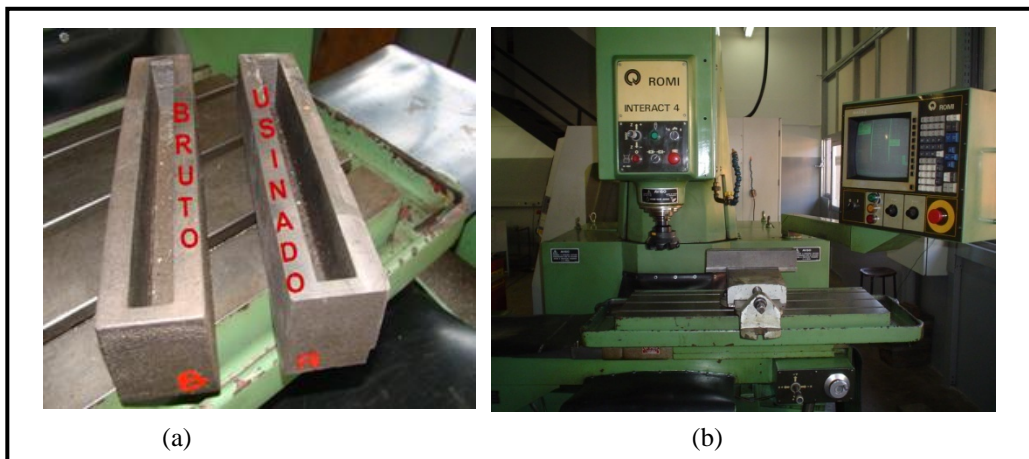


Figura – 1 (a) corpo de prova bruto de fundição e pré-usinado; (b) fresadora com sistema de fixação do corpo prova através de morsa.

Para cada ensaio de vida da ferramenta, durante a usinagem dos três materiais, foram utilizados oito insertos em um fresa de 125 mm de diâmetro. Richetti et al (2004) investigou a influência do número de insertos na evolução do desgaste da ferramenta no fresamento frontal em dois aços com ferramentas com e sem revestimento. As conclusões de seu trabalho mostram que, mantendo-se o mesmo avanço por aresta, quanto maior o número de aresta de corte durante o processo de fresamento, maiores taxas de desgaste de flanco surgirão devido à alta temperatura de usinagem gerada no processo. Desta forma, por se tratar de ensaios de curta duração, adotou-se a quantidade máxima possível de insertos na fresa, acelerando assim o mecanismo de desgaste da ferramenta, objetivando maiores intensidades nos sinais de vibração e potência de corte.

Para a medição da potência de corte, a aquisição destes sinais foi realizada por meio da corrente elétrica que chega ao cabo de alimentação do motor principal da máquina-ferramenta, eixo-árvore. Utilizou-se um sensor de corrente por efeito Hall da *Newtronic*, modelo NW-SCD-50-R, cuja faixa de amperagem é de 0 a 50 A, a tensão de alimentação de  $\pm 9\text{VDC}$  e o sinal de saída na faixa de 0 a 5 VDC. O cabo de alimentação de energia elétrica do motor principal responsável pela rotação da fresa passa através deste sensor (na forma de um anel), sendo o mesmo sensível às variações de corrente. A medição da corrente elétrica é feita com o eixo-árvore girando em vazio com o objetivo de se determinar a potência de referência. A seguir foram feitas as aquisições durante o corte.

Durante o momento da usinagem, o sinal era adquirido através deste sensor e então conduzido à uma placa de conversão analógico-digital e de aquisição de sinais. Esta placa é fabricada pela *National Instruments*, modelo NI DAQPad-6251 Pinout, gerenciado por um microcomputador utilizando o software LabView 5.1, também da *National Instruments*. Realizou-se a aquisição do sinal com uma taxa de amostragem de 10.000 pontos por segundo durante 15s do corte de cada passe.

Foi necessário construir uma curva de calibração do valor da corrente elétrica presente no motor responsável pelo movimento do eixo árvore, através de amperímetro digital, e então relacionado ao sinal que chegava à placa de aquisição. Portanto, o valor da corrente elétrica para os fins de cálculo da potência elétrica consumida pelo motor é encontrado multiplicando-se o sinal de saída por este fator de conversão e subtraído de um incremento. A equação 1 apresenta a curva de calibração da corrente real consumida por este motor. Os valores para a construção dessa curva de calibração foi realizada para uma velocidade de corte de 1000 m/min usinando o material C e em vazio. Esta calibração foi necessária com objetivo de analisar a corrente elétrica real que o motor elétrico consumia durante o processo de usinagem, uma vez que a tensão da máquina fresadora permanecia constante em 400 volts. Assim a potência consumida pode ser obtida multiplicando-se o valor de corrente encontrado pela tensão nos terminais do motor do eixo-árvore. O valor da potência de cada aquisição é o resultado da média obtida durante o período efetivo de corte, medida em cada passada. Os dados da potência efetiva de corte assim como o de vibração foram analisados através do programa *MatLab* versão 7.

$$y = 9,1725 x - 0,691 \quad (1)$$

onde,

y - é o valor da corrente real consumida pelo motor que aciona o eixo árvore da fresadora em ampères.

x - é o valor do sinal em milivolts que o sensor de efeito hall envia para a placa de aquisição.

Os sinais de vibração foram captados por meio de um acelerômetro fixado no mancal do eixo-árvore da máquina-ferramenta. Este é conduzido até um amplificador, a um filtro da marca *Sensis* modelo DM42 e finalmente a uma placa de aquisição de sinais, a mesma placa que recebe o sinal do sensor de efeito hall, uma vez que esta placa apresenta outros canais de entrada para aquisição e outros tipos de sinais. Todos estes dados, tanto aqueles obtidos pelo acelerômetro quando os originados pelo sensor de efeito hall, eram então enviados, processados e armazenado em computador, que por meio de um programa em *LabView* foram analisados para cada teste de usinagem.

A fixação do acelerômetro no mancal do eixo-árvore da máquina-ferramenta é fundamentada nos estudos de análise do comportamento dinâmico de qualquer máquina operatriz. O trabalho de Sousa (1998) contribuiu para o entendimento da sensibilidade de vibração na estrutura mecânica, da fresadora utilizada neste trabalho, com base nas variações observadas nas curvas das Funções Resposta e Frequência (FRF). Este autor mapeou 80 locais para a colocação dos acelerômetros, identificando qual a região que apresentaria maior sensibilidade à variação de vibração durante o processo de usinagem, para a máquina em questão. Como resultado, o autor identificou que o mancal do eixo-árvore da fresadora apresentou a maior sensibilidade à variação dos sinais de vibração mecânica durante o fresamento frontal de um aço ABNT 1045. Daí o motivo de fixar o acelerômetro especificamente nesta região da fresadora. A Figura 2 (a) apresenta o acelerômetro fixado na região próximo ao mancal do eixo árvore da fresadora, e a Figura 2 (b) mostra o sistema de aquisição de sinais do sensor de efeito hall (potência de corte), do acelerômetro e o computador para tratamento dos sinais.

Naves (2009) realizou um levantamento de algumas importantes propriedades físicas e mecânicas dos três materiais analisados, como dureza, micro dureza, resistência de ruptura à tração, e caracterização metalográfica. As informações das propriedades mecânicas para o ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn (material A), ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo (material B) e o ferro fundido vermicular da classe 350 (material C) estão apresentadas na Tabela 2.

Nesta tabela os valores da condutividade térmica correspondem a uma faixa de temperatura de 100°C obtidos por Guessser e outros (2005).



Figura 2 – (a) acelerômetro fixado no mancal do eixo-árvore da máquina-ferramenta. (b) sistema de aquisição dos sinais de potência e vibração.

Tabela – 2. Propriedades dos materiais investigados.

Propriedade	Material A	Material B	Material C
Resistência à Tração (Mpa)	233,06	251,17	356,52
Dureza (HB)	216,4	223,5	174,9
Micro Dureza da Perlita (HV 01)	320,3	330,13	341,64
Condutividade Térmica (W/K.m)	50	45,5	37

A microestrutura para os três materiais é apresentada na figura 3. Nesta figura é possível observar a distribuição aleatória das grafitas em uma matriz perlítica. A tabela 3 apresenta algumas informações do fabricante do material.



Figura – 3. Microestrutura dos materiais A, B e C atacados com a 3% de Nital, ampliação de 400x.

Tabela – 3. Caracterização dos materiais.

Material	Matriz	Grafita			
		Forma	Tipo	Tamanho	Nodular
A	Perlita 100%	I	A	4-5	-
B	Perlita 100%	I	A	4-5	-
C	Perlia com ~ 44% de ferrita	III - VI	-	-	15%

### 3. RESULTADOS

Conforme apresentado, a potência foi obtida em cada teste a partir do monitoramento da corrente elétrica do motor principal (eixo-árvore). Por se tratar de um motor de corrente contínua o cálculo da potência era feito pelo produto da corrente pela tensão do motor do eixo árvore. A tensão de alimentação deste motor manteve-se constante em 400 V. O

rendimento do motor não foi considerado para os cálculos da potência de corte, pois a intenção deste teste foi avaliar a comparação do comportamento dentre os materiais para cada faixa de velocidade de corte. Logo, foram monitorados apenas os sinais de corrente elétrica.

As Figuras 4 a 6 mostram o comportamento do sinal da potência de corte, dado em watts, para as três condições de velocidade de corte durante a usinagem dos três ferros fundidos investigados, sendo os mesmos coletados no ultimo passe já com ferramentas próximas ao fim de vida, o que representava a usinagem de 5 corpos de prova. Para facilitar a interpretação, estes sinais, foram filtrados, apresentando uma média móvel de 10000 pontos, o que também representa a taxa de aquisição dos sinais coletados durante todo o momento do passe da fresa sobre o material.

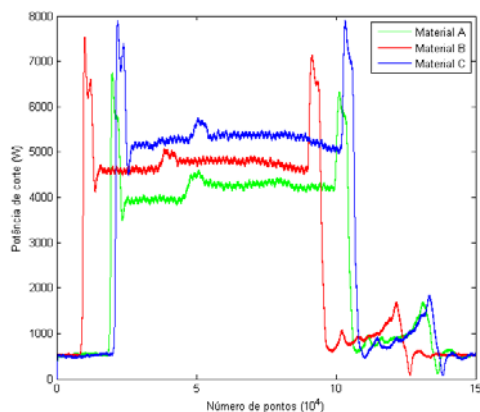


Figura 4 – Potência de corte para  $V_c = 600$  m/min.

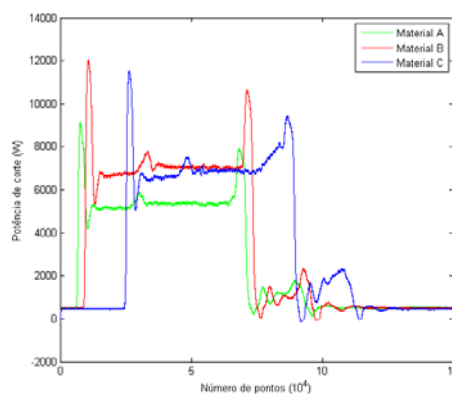


Figura 5 – Potência de corte para  $V_c = 800$  m/min.

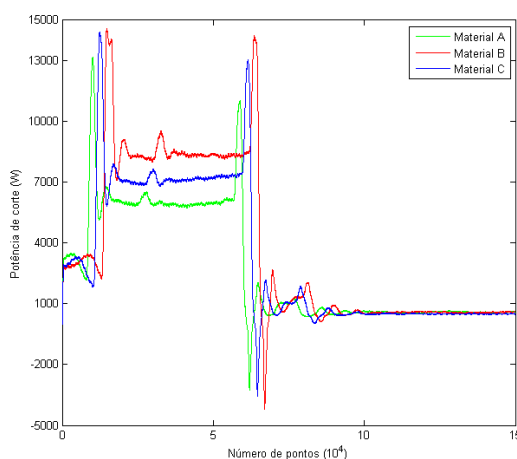


Figura 6 – Potência de corte para  $V_c = 1000$  m/min.

Observa-se pelos gráficos da potência de corte que o material que apresentou a menor potência durante as três faixas de velocidade de corte foi o material A, ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSn. Este material apresenta maiores valores de resistência de ruptura à tração e dureza menores que os demais materiais. Isto implica em menores esforços durante o cisalhamento do material. Como o material da peça apresentava uma geometria característica (um rasgo no centro), os esforços de usinagem poderiam ser alterados devido a um volume não constante de material a medida que iria sendo usinado. Isto explica o fato de algumas alterações que ocorriam no sinal da corrente elétrica, consequentemente na potência de corte.

Observa-se pelos gráficos de potência de corte que a potência aumenta com a velocidade de corte. Segundo Diniz (2006) a potência de corte não é diretamente proporcional à velocidade de corte, pois com o aumento da velocidade de corte leva a um decréscimo da pressão específica de corte e, portanto, da força de corte. A diminuição da pressão específica de corte é motivada pela redução da deformação e da dureza do cavaco e também dos coeficientes de atrito que o aumento da velocidade de corte (e consequentemente da temperatura de corte) proporciona. Logo, em velocidades de corte altas, a influência deste parâmetro na pressão específica é pequena e com isto a potência de corte nesta faixa de velocidade de corte é diretamente proporcional à velocidade de corte.

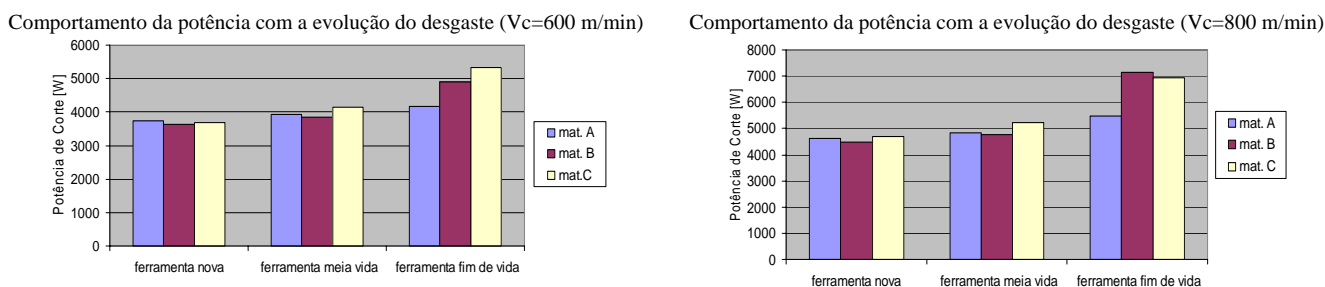
O material B, ferro fundido cinzento ligado, demonstrou ter a pior usinabilidade nas velocidades de corte de 800 e 1000 m/min do que o ferro fundido vermicular, material C. A confirmação é observada pelas figuras 5 e 6. O fato de o ferro fundido vermicular apresentar uma maior resistência à tração, neste caso não foi fundamental responsável por apresentar uma maior potência de corte, consequentemente maiores esforços durante a usinagem. A dureza do material B é cerca de 30% maior que a dureza do material C, uma vez ainda que a matriz desse material ser totalmente perlítica. Esta diferença de microestrutura aliada aos maiores valores de dureza tendem a levar o material B, novamente,

demonstrar maiores dificuldades durante a usinagem. A morfologia da grafita nos ferros fundidos cinzentos, assim como sua distribuição, afeta de forma positiva durante o cisalhamento destes materiais. Os veios de grafita nos ferros fundidos cinzentos, por possuírem em suas extremidades formas finas e pontiagudas, levariam a facilitar a propagação de trincas na matriz destes materiais e conseqüentemente facilitaria a usinagem, quando se comparados aos ferros fundidos de grafita compactada. Porém, estas características não motivaram menores esforços, e conseqüentemente menores valores de potência de corte para as velocidades de corte mais elevada.

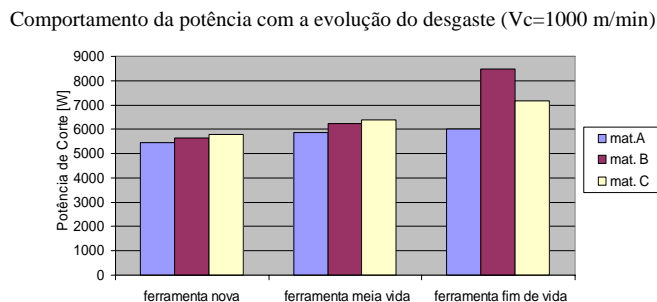
A adição do molibdênio, como elemento de liga no material B, principal diferença para o material A, leva a formação de carbonetos de molibdênio. Estes carbonetos, que são partículas duras e abrasivas, objetivam em conferir na matriz dos materiais maiores resistência a quente e assim maior resistência à fadiga térmica (Guesser, 2003). Conseqüentemente a presença deste tipo de carbonetos podem contribuir a aumentar os esforços durante a usinagem em elevadas faixas de velocidade de corte.

Na velocidade de corte de 600 m/min a potência de corte foi maior para o ferro fundido vermicular. Nesta condição de corte a ferramenta apresentou maior desgaste em relação aos demais materiais. É importante ressaltar que nesta faixa de velocidade de corte o sulfeto de manganês, presentes apenas nos ferros fundidos cinzentos, pode ter auxiliado positivamente no cisalhamento deste tipo de material e assim gerando uma menor potência de corte. Acima desta faixa de velocidade, parece não haver tanta influência destes elementos.

A figura 7, um conjunto de dois gráficos, que informam o comportamento da potência de corte no decorrer da usinagem até atingir o critério de fim de vida da ferramenta que foi de 5 corpos de prova. A mesma análise é feita na figura 8 para a condição de 1000 m/min. Considera-se como meia vida da ferramenta o momento que a ferramenta havia removido um volume de material de aproximadamente 2460 cm<sup>3</sup>, ou seja, 2,5 corpos de prova. Os dados de potência de corte para a ferramenta nova, foram obtidos nos primeiros passes dos testes, ou seja, não havia ainda a presença de desgaste na aresta principal da ferramenta.



**Figura 7 – Condições da potência de corte para as ferramentas nova, meia e fim de vida, para as velocidades de corte de 600 e 800 m/min.**



**Figura 8 – Condições da potência de corte para as ferramentas nova, meia e fim de vida, para as velocidades de corte de 1000 m/min.**

A figura 9, um conjunto de dois gráficos, que informam o comportamento da potência de corte no decorrer da usinagem. A mesma análise é feita na figura 10 para a condição de 1000 m/min. As informações apresentadas por estas figuras foram obtidas pela média quadrática (RMS) dos valores dos sinais de vibração, durante apenas o período ativo da fresa, ou seja, apenas durante a usinagem do corpo de prova. Este sinal da vibração, que é apresentado em volts nas figuras, representada um sinal de aceleração do comportamento da vibração durante a usinagem. Novamente, considera-se como meia vida da ferramenta o momento que a ferramenta havia removido um volume de material de aproximadamente 2460 cm<sup>3</sup> e para a ferramenta nova, não havia ainda a presença de desgaste na aresta principal da ferramenta.

De uma forma geral os dados dos sinais de vibração para a velocidade de corte de 600 e 1000 m/min, demonstraram que à medida que a ferramenta desgasta o sinal de vibração tende a aumentar. Segundo Sousa (1998) no início, pelo assentamento das arestas de corte na fresa e pela própria evolução do desgaste das mesmas, ou seja, a dificuldade de se obter a mesma altura nas oito arestas de corte durante o ajuste inicial de montagem da fresa, acaba definindo alturas diferentes das mesmas em relação à peça, provocando portanto no início do processo de fresamento, cortes com profundidades diferentes. As arestas mais protuberantes são mais exigidas, portanto desenvolvem o desgaste mais rapidamente. Isto gera esforços menores do que quando todas as arestas de corte trabalham com a mesma altura, e

esforços menores implicam em nível de vibração menor durante o processo de fresamento. Mas à medida que se aumentam o número de passes, as arestas de corte vão se desgastando e a tendência é ajustar as alturas relativas à peça, provocando assim a estabilização do nível de vibração do sistema. Mesmo que não aconteça este ajuste, o desgaste continua a evoluir de maneira desigual, aumentando as forças de corte, que acarretam em níveis de vibração maiores na fresadora.

A capacidade de amortecimento de vibração de um material é a sua habilidade de dissipar energia vibracional. Em ferros fundidos, a capacidade de amortecimento de vibrações é resultado entre a grafita e a matriz metálica, durante a solitação mecânica. A capacidade de amortecimento de vibração depende de defeitos na grafita, sendo independente da matriz metálica. Elevada quantidade de partículas grandes de grafita lamelar, tende a favorecer esta capacidade (Guesser et al., 2003). Este comportamento demonstrou ocorrer para o material A, que possui este tipo de grafita. Em média foi o material que apresentou menores taxas de vibração para três condições de velocidade de corte.

Com o aumento da velocidade de corte, o sinal de vibração foi menor. Com o aumento do desgaste de flanco, os sinais de vibração durante a usinagem aumentam, mas a taxa de aumento é baixa para elevadas velocidades de corte Ghani (2002). Este autor usinou um ferro fundido de semelhante composição química, dureza resistência à tração dos ferros fundidos aqui investigados, e também foi observado em seus experimentos um menor sinal de vibração quanto maiores eram as velocidades de corte. O autor ainda acrescenta que à medida que a velocidade de corte aumenta o processo de usinagem tende a ficar mais estável, consequentemente gerando menores ruídos de vibração no sistema ferramenta-peça-máquina.

A monitoração do sinal RMS de vibração em usinagem é um bom indicativo do acompanhamento da integridade da aresta de corte da ferramenta e seu desempenho durante a usinagem, como também fornecer uma previsão da qualidade do acabamento da superfície da peça usinada. Porém, é necessário ter o domínio de todos os fatores que podem influenciar direta ou indiretamente no processo de usinagem, para que os resultados possam posteriormente serem melhor tratados e analisados. Um importante fator que tenha influenciado nos resultados pode ter sido alteração no raio de arredondamento da aresta principal de corte. A perda do revestimento, aliado ao desgaste da ferramenta, influenciam significativamente na vibração de máquinas devido à alteração na geometria da aresta de corte. As características do material da peça, aliado às elevadas velocidades de corte podem ter mascarados alguns resultados do sinal de vibração.

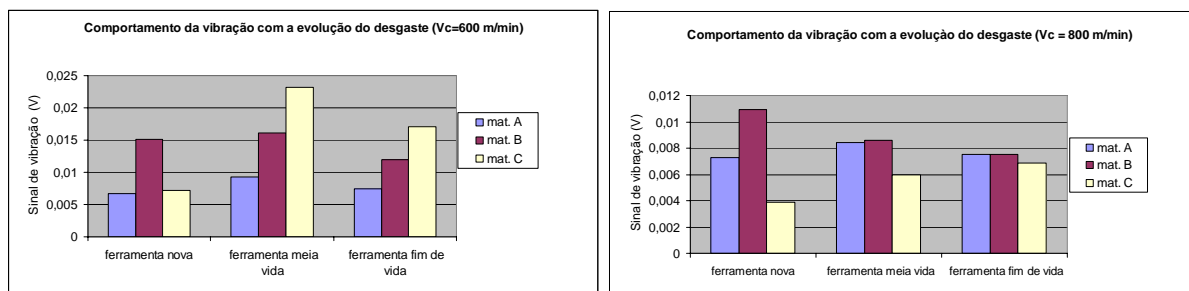


Figura 9 – Sinal de vibração para três estados de afiação da ferramenta para velocidades de corte de 600 e 800 m/min.

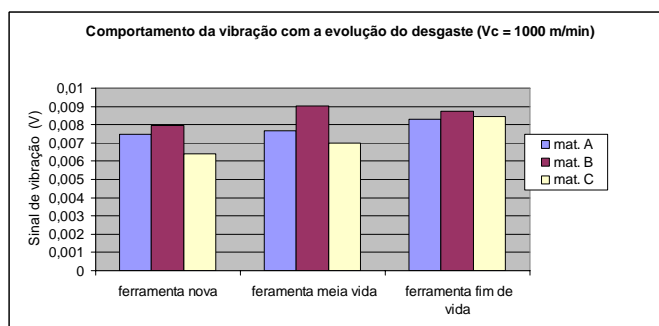


Figura 10 – Sinal de vibração para três estados de afiação da ferramenta para velocidades de corte de 1000 m/min.

#### 4. CONCLUSÕES

As principais conclusões dos sinais da vibração e potência de corte durante o fresamento frontal de dos materiais investigados e variados, conforme apresentado, a velocidade de corte foram:

- É evidente que apesar do importante papel desempenhado pela morfologia da grafita em relação à usinabilidade, a vida útil da ferramentas pode estar fortemente relacionada também pela matriz metálica. Assim, matrizes perlíticas, com menor espaçamento inter lamelar, apresentam maior resistência mecânica, influenciando negativamente na usinabilidade do material.
- O Material B, ferro fundido cinzento ligado ao CrCuSnMo, demonstrou ter o pior índice de usinabilidade, pois apresentou os maiores valores de potência de corte nas para as velocidades de corte de 800 e 1000 m/min, sendo estas faixas encontram-se nas faixa de altas velocidades de corte, podem ter alterados alguns



fenômenos de usinagem. A influência da matriz metálica (perlítica) e as inclusões de carbonetos de molibdênio podem ter influenciado significativamente nestes resultados.

- De um modo geral o sinal RMS da vibração foi maior à medida que aumentava o desgaste nas ferramentas de corte. Este comportamento ocorreu para todos os materiais analisados. Por sua vez, o comportamento da vibração tornou-se mais estável à medida que a velocidade de corte era aumentada. Logo, isso favoreceu de certo modo, a usinagem para a velocidade de corte de 1000 m/min.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, C. F. L., 2005, “Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Bagetti, J. H., et al., 2008, “Análise Da Usinabilidade Dos Ferros Fundidos Vermicular e Cinzento no Processo de Fresamento Frontal”. V CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Salvador, Brasil.
- CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica. [www.cimm.com.br](http://www.cimm.com.br)
- Dawson, S., et al., , 1999, “The effect of metallurgical Variables on the machinability of compacted graphite iron. In: Design e Machining Workshop – CGI.
- Dawson, S., Schroeder, T., 2004, “Practical Applications for Compacted Graphite Iron”, AFS Transactions, American Foundry Society, Des Plaines, USA: Paper 04-047, p.1-9.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 2006, “Tecnologia da Usinagem dos Metais” 5ª ed. São Paulo: Artliber Editora.
- Doré, C., 2007, ”Influência da Variação da Nodularidade na Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular Classe 450”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Ghani, A. K. et al., 2002, “Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool”, Journal of Materials Processing Technology.
- Guesser, L. W E Guedes, L. C., 1997, “Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à industria automobilística”. In: Simpósio de Engenharia Automotiva, AEA, São Paulo.
- Guesser, W., 2002, ”Ferro Fundido com Grafita Compacta”, Metalurgia & Materiais. p.403-405.
- Guesser, W., Masiero, I., Cabezas, C., 2005, “Thermal Conductivity of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Cylinder Heads”. Revista Matéria, vol 10, n. 2, p 265-272.
- Hick, H., Langmayr, F., 2000, “All star cast” . Engine Tecnology International, Germany, p 40-42.
- Machado, A. R, Da Silva, M. B; Coelho, R. T; Abrão, A. M., 2009, “Teoria da Usinagem dos Materiais”. 1ª ed. São Paulo:Editora Blucher.
- Marquarad, R., Helfried, S., Donald, M. C., 1998, “New materials create new possibilities”. Engine Technology International, v. 2, p. 58-60.
- Mocellin, F., 2002, “Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Mocellin, F., 2007, “Desenvolvimento de Tecnologia para Brunimento de Cilindros de Blocos de Motores em Ferro Fundido Vermicular”. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Naves, V. T. G., 2009, “Estudo da usinabilidade no Fresamento Frontal dos Ferros Fundidos Vermicular Classe 350 e Cinzentos Ligados CrCuSn e CrCuSnMo”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.
- Reuter, U., et al., 1999, “Wear mechanisms in high-speed machining of compacted graphite iron”. In: Design e Machining Workshop – CGI.
- Reuter, U., et al., 2001, “The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron”, Society of automotive engineers, Inc, Alemanha, p 1-18
- Richetti, A. et al., 2004, “Influence of the number of inserts for tool life evaluation in face miling of steels”. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 695-700.
- Sousa, M.M., 1998, “Utilizando a Vibração Mecânica para Monitorar o Desgaste das Ferramentas de Corte e o Acabamento Superficial no Processo de Fresamento”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- Xavier, F. A., 2003, “Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN”. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.



## **STUDY OF THE MACHINABILITY OF ALLOYED GRAY CAST IRON (CrCuSn AND CrCuSnMo) AND COMPACTED GRAPHITE IRON ASTM 350 THROUGH OF MONITORING OF VIBRATION SIGNALS AND CUTTING POWER**

**Vitor Tomaz Guimarães Naves, vitor@mecanica.ufu.br<sup>1</sup>**  
**Marcio Bacci da Silva, mbacci@mecanica.ufu.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Federal University of Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG, 38408-100, Brazil

**Abstract.** *Gray cast iron is used in the manufacture of block and cylinder head of diesel engines due to some characteristics like good thermal conductivity and good damping factor of vibrations that become essential in automotive parts. However, this class of material has a limit of mechanical strength than some other types of cast iron. Alloyed gray cast iron and compacted graphite iron (CGI) are materials of higher mechanical strength, and is gaining importance in replacement of gray cast iron in the manufacture of automotive components. However, CGI and alloyed gray cast iron have the disadvantage of worse machinability, ie, are materials difficult to cut. Herein, it is important to investigate the behavior of these materials during manufacturing. The main objective of this work is to analyze and compare the machinability of two gray cast iron alloys (CrCuSn and CrCuSnMo) and vermicular cast iron class 350. This is done by monitoring vibration signals and cutting power during the operation. The manufacturing process used was front milling with cemented carbide inserts coated with aluminum oxide. Three cutting speeds were investigated, 600, 800 and 1000 m/min. The feed per tooth per revolution and the depth of cut were kept constant at 0.2 mm and 1 mm respectively. The results showed a good relationship between vibration signal and cutting power with tool wear. According to the results, the alloyed gray cast iron CrCuSnMo was the most difficult to cut material at the highest cutting speeds used in this work.*

**Keywords:** *compacted graphite iron 1, gray cast iron 2, machinability 3*