

ESFORÇOS DE USINAGEM NA FURAÇÃO DE FERRO FUNDIDO VERMICULAR E NODULAR PERLÍTICO

Patrícia Alves Barbosa, patricia026_eng@hotmail.com¹
Guilherme Boaventura Rabelo, guilhermefemec@yahoo.com.br¹
Wilson Luiz Guesser, wguesser@tupy.com.br²
Éder Silva Costa, eder@div.cefetmg.br¹
Álison Rocha Machado, alissnm@mecanica.ufu.br¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem - Campus Santa Mônica - 38408-902 - Uberlândia - MG - Brasil

² Tupy S.A., R Albano Schmidt 3400 CEP: 89206-900, Joinville/SC - Brasil e FEJ/ UDESC, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Prof. Avelino Marcante s/n - Bairro Bom Retiro, CEP 89223-100- Joinville-SC - Brasil

Resumo: A história do ferro fundido nodular é marcada pela boa fundibilidade, capacidade de amortecimento e propriedades mecânicas (ductilidade, tenacidade e resistência) e usinabilidade apropriadas. O ferro fundido vermicular, material de início de fabricação recente, pode ser considerado, como um ferro fundido intermediário entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular. Tem encontrado aplicação crescente em blocos e cabeçotes de motores, apresentando entretanto usinabilidade distinta do ferro fundido cinzento, material tradicional nestas aplicações. O objetivo deste trabalho foi comparar a usinabilidade, no processo de furação, do ferro fundido vermicular (classe FV 450) com o ferro fundido nodular perlítico (classe FE 70003) em relação aos critérios de usinabilidade referentes à força de avanço (Fz) e torque (Mz), e mostrar os efeitos da variação das condições de corte nestas variáveis de saída. Foram realizados testes de furação, utilizando brocas de aço rápido revestidas com TiN, segundo um planejamento fatorial 2⁴, consistindo em duas variáveis quantitativas, velocidade de corte (Vc) e avanço (f), e duas variáveis qualitativas, material e tipo de aplicação de fluido. Os resultados mostraram que não existe diferença significativa entre o FoFo Vermicular e o FoFo Nodular Perlítico para as condições de corte estudadas, e que tanto o avanço quanto o tipo de aplicação do fluido de corte influenciaram significativamente os resultados de Fz, no entanto os resultados de Mz são influenciados significativamente somente pelo avanço.

Palavras-chave: usinabilidade, furação, ferro fundido nodular perlítico, ferro fundido vermicular, esforços de corte.

1. INTRODUÇÃO

Classicamente, “a usinabilidade é definida como sendo uma grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de se usinar um material”, salientado que esta não é uma propriedade do material e sim uma função do teste e das condições investigadas (Machado e Da Silva, 2004). Das grandezas consideradas inerentes ao processo que podem ser apresentadas como índice de usinabilidade estão: a força de corte, potência consumida, vida da ferramenta, acabamento da superfície, taxa de desgaste, temperatura de corte e controle do cavaco.

Uma grande contribuição de ensaios de usinabilidade é a possibilidade de geração de bancos de dados que é dificultada pela quantidade de materiais de processamento em geral e materiais de ferramenta, além dos processos de usinagem utilizados. Para maior confiabilidade destes bancos de dados devem-se utilizar critérios e procedimentos padronizados para que seja possível a transferência e utilização dos dados gerados, sem restrições.

No entanto, a maioria dos resultados de testes de usinabilidade publicados se referem ao torneamento, por isso o interesse em ampliar os estudos para outros processos de usinagem como a furação que é o processo mais utilizado na indústria, cerca de 25% em tempo de usinagem e 33% em números de operações de todos os processos empregados (Tönshoff, citado por Santos, 2002).

A história do ferro fundido nodular tem sido influenciada por um número de desenvolvimentos técnicos que tem resultado nas novas oportunidades de negócios para as indústrias de fundição. Estes possuem boa fundibilidade, capacidade de amortecimento e propriedades mecânicas (ductilidade, tenacidade e resistência) e usinabilidade apropriada. Devido a estas vantagens têm sido utilizados em muitas aplicações estruturais. Cames, virabrequins, carcaça

de bombas, válvulas e articulações de direção são exemplos importantes da utilização de ferro dúctil em veículos (Toktas et al, 2006).

O ferro fundido vermicular, também conhecido como *Compacted Graphite Iron* (CGI), foi descoberto por acaso durante a fabricação do ferro fundido nodular, devido a erros de composição química. Dentro dos ferros fundidos, o CGI pode ser considerado, como intermediário entre o cinzento e o nodular. Tem encontrado aplicação crescente em blocos e cabeçotes de motores, apresentando entretanto, usinabilidade distinta do ferro fundido cinzento, material tradicional nestas aplicações (Mocellin, 2002). A usinabilidade mais baixa do ferro fundido vermicular em relação ao cinzento se deve, além de sua maior resistência mecânica, à ausência do elemento enxofre em sua composição, o que implica em ausência de inclusões de sulfetos que agem como lubrificante na interface cavaco-ferramenta (Mocellin et al, 2004).

O objetivo deste trabalho foi comparar a usinabilidade, no processo de furação, do ferro fundido vermicular (classe FV 450) com o ferro fundido nodular perlítico (classe FE 70003) em relação aos critérios de usinabilidade referentes à força de avanço (Fz) e torque (Mz), e mostrar os efeitos da variação das condições de corte nestas variáveis de saída.

2. MÉTODO PROPOSTO

Os testes de furação foram realizados segundo um planejamento fatorial 2^4 , consistindo em duas variáveis quantitativas, velocidade de corte (Vc) e avanço (f), e duas variáveis qualitativas, material e tipo de aplicação de fluido, contemplando duas réplicas para avaliar a reprodutibilidade dos dados. Foram usinados furos cegos com um comprimento de penetração (L_f) de 20 mm. O monitoramento da força de avanço (Fz) e torque (Mz) foi feito simultaneamente durante a execução dos furos. A Tabela (1) apresenta os fatores, que foram variados em dois níveis e a Tab. (2) mostra a configuração do planejamento utilizado.

Tabela 1. Variáveis de entrada à dois níveis.

Variável	Nível (-1)	Nível(+1)
Vc [m/min]	25	35
f [mm/volta]	0,15	0,25
Material	FV450	FE 70003
Fluido de Corte	Jorro	MQF

Tabela 2. Planejamento Fatorial 2^4 .

Ensaios	Vc [m/min]	f [mm/volta]	Fluido de Corte	Material
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1

2.1. Aparato Experimental

Para a execução do trabalho foi necessária a utilização dos seguintes equipamentos:

- Centro de Usinagem CNC Discovery 760 da marca Romi;
- Dinamômetro rotativo modelo 9124B e condicionador de sinais 5223B da marca Kistler e software Labview®: para o monitoramento da força de corte (Fz) e torque (Mz).

2.2. Ferramenta e Material de Trabalho

A ferramenta e os materiais utilizados no trabalho estão relacionados a seguir:

- Ferramenta: broca helicoidal de aço rápido, revestidas com TiN e $\varnothing = 10$ mm;
- Material de trabalho:
 - Ferro Fundido Nodular Perlítico bruto-de-fundição (classe FE 70003);
 - Ferro Fundido Vermicular (classe FV 450).

O corpo de prova do Ferro Fundido Nodular, esquematizado na Fig. (1), possuía forma cilíndrica com 104 mm de diâmetro e 30 mm de espessura e no caso do Ferro Fundido Vermicular foi utilizado um coxim com 72 x 350 x 35 [mm] contendo um vão de 24 x 320 x 16 [mm] no centro do corpo de prova, como mostrado na Fig. (2). A Tabela (3) apresenta a microestrutura e a dureza dos materiais estudados.

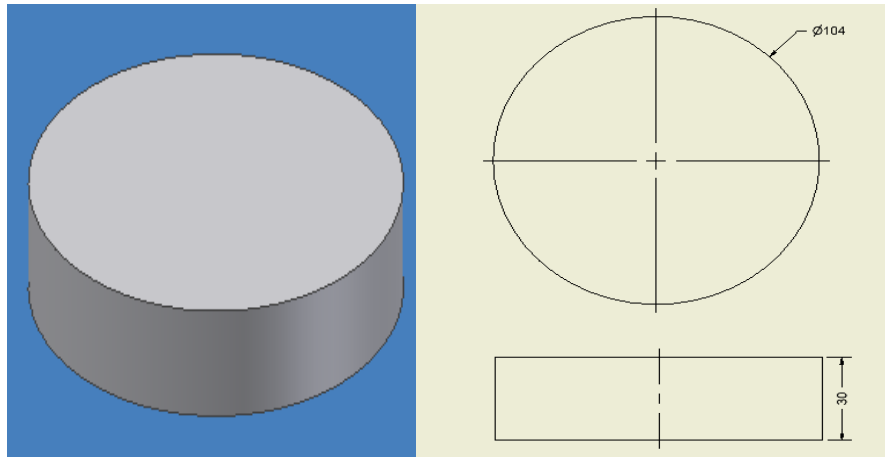


Figura 1. Esquema do corpo de prova de Ferro Fundido Nodular Perlítico.

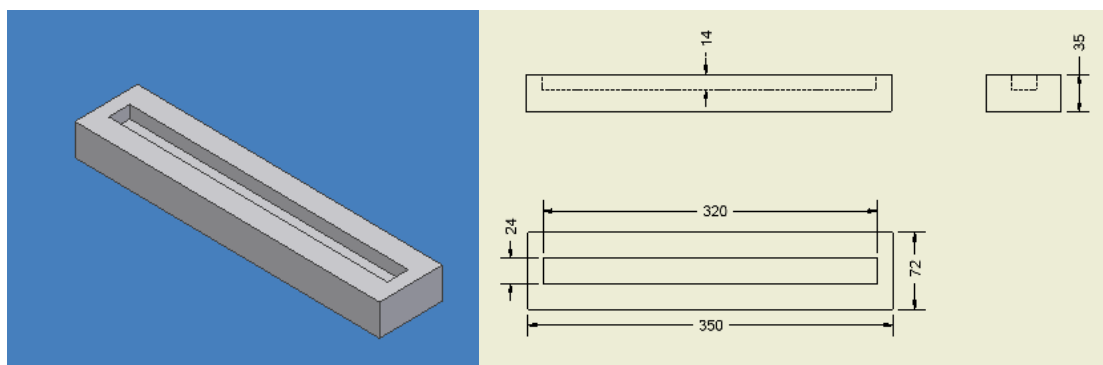


Figura 2. Esquema do corpo de prova de Ferro Vermicular.

Tabela 3. Microestrutura e dureza Brinell.

Material	Microestrutura	Dureza Brinell (HB 5/750)
Nodular (FE 70003)	Grafita nodular em matriz Perlítica c/ ~2% de ferrita	269
Vermicular (FV 450)	Grafita vermicular e nodular em matriz Perlítica c/ ~2% de ferrita	237

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados obtidos foi realizada através de gráficos, tabelas comparativas e análise de significância. A Tabela (4) apresenta os valores médios de F_z e M_z obtidos. As Tabelas (5) e (6) apresentam os resultados das análises de significância para força de avanço e torque, respectivamente. Estas mostram, com uma confiabilidade de 95% e nível de significância de 5%, que não existe diferença significativa entre o Ferro Fundido Vermicular e o Ferro Fundido Nodular Perlítico para as condições de corte estudadas e que tanto a força de avanço quanto o tipo de aplicação do fluido de corte influenciaram significativamente os resultados de F_z . No entanto, os resultados de M_z são influenciados

significativamente somente pelo avanço. O fato dos materiais apresentarem comportamento semelhante pode ser devido à microestrutura de ambos apresentarem uma matriz perlítica com aproximadamente 2% de ferrita.

Tabela 4. Resultados obtidos.

Material	Vc [m/min]	f[mm/volta]	Fluido de Corte	Fz [N]	Mz [Nm]
Vermicular	25	0,15	jorro	845,55	4,19
Vermicular	35	0,15	jorro	851,42	4,00
Vermicular	25	0,25	jorro	1374,98	6,05
Vermicular	35	0,25	jorro	1323,84	5,97
Vermicular	25	0,15	MQF	882,94	4,01
Vermicular	35	0,15	MQF	877,66	3,99
Vermicular	25	0,25	MQF	1500,86	6,29
Vermicular	35	0,25	MQF	1556,99	6,28
Nodular	25	0,15	jorro	877,68	4,11
Nodular	35	0,15	jorro	545,19	2,71
Nodular	25	0,25	jorro	1440,84	6,62
Nodular	35	0,25	jorro	1355,76	6,45
Nodular	25	0,15	MQF	920,24	4,24
Nodular	35	0,15	MQF	914,15	4,19
Nodular	25	0,25	MQF	1634,89	6,68
Nodular	35	0,25	MQF	1756,56	6,96

Tabela 5. Análise de significância do Planejamento 2⁴ comparando Ferro Fundido Vermicular (FV 450) e Ferro Fundido Nodular Perlítico (FE 70003) com relação a Fz.

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	1166,224	17,62719	0,000000
Material	28,885	35,25439	0,449878
Vc [m/min]	-37,051	35,25439	0,341393
f [mm/volta]	653,739	35,25439	0,000008
fluido	178,628	35,25439	0,003877
Material x Vc	-38,449	35,25439	0,325191
Material x f	78,959	35,25439	0,075244
Material x fluido	72,964	35,25439	0,093282
Vc x f	47,446	35,25439	0,236166
Vc x fluido	78,659	35,25439	0,076051
f x fluido	59,841	35,25439	0,150381

Tabela 6. Análise de significância do Planejamento 2⁴ comparando Ferro Fundido Vermicular (FV 450) e Ferro Fundido Nodular Perlítico (FE 70003) com relação a Mz.

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	5,171574	0,085324	0,000000
Material	0,145452	0,170648	0,432940
Vc [m/min]	-0,202020	0,170648	0,289685
f [mm/volta]	2,481287	0,170648	0,000028
fluido	0,315473	0,170648	0,123759
Material x Vc	-0,131533	0,170648	0,475659
Material x f	0,383685	0,170648	0,074426
Material x fluido	0,227506	0,170648	0,239982
Vc x f	0,210664	0,170648	0,271869
Vc x fluido	0,256138	0,170648	0,193661
f x fluido	-0,038348	0,170648	0,831093

Os gráficos das figs. (3) a (8) ilustram as influências das variáveis significativas na força F_z e no torque M_z .

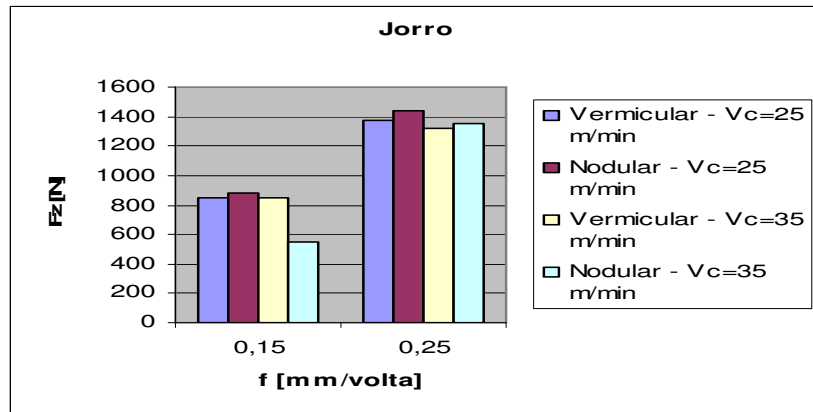


Figura 3. Força de avanço média (F_z) em função da variação do avanço (f) com aplicação de fluido de corte por jorro.

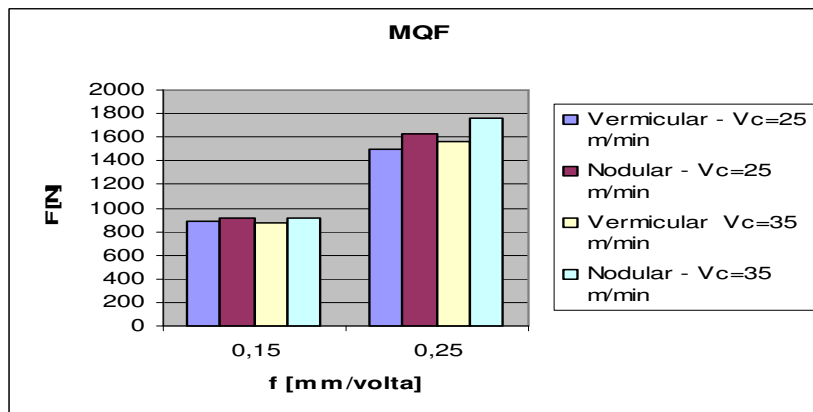


Figura 4. Força de avanço média (F_z) em função da variação do avanço (f) com aplicação de fluido de corte por MQF.

Pode-se observar pelas Figs. (3) e (4), que ao se aumentar o avanço de 0,15 mm/volta para 0,25 mm/volta o valor de F_z aumenta, em média, em 654 N. O aumento do avanço aumenta diretamente as áreas de cisalhamento primário e secundário, causando um aumento de F_z , em uma proporção direta.

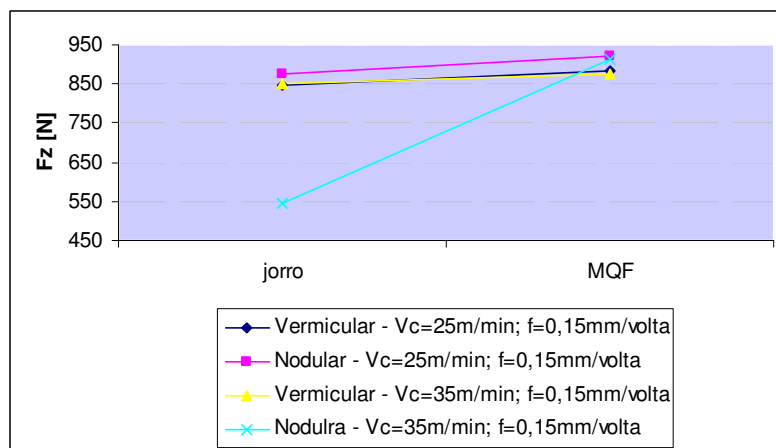


Figura 5. Força de avanço média (F_z) em função do tipo de aplicação de fluido de corte, para o menor avanço (f).

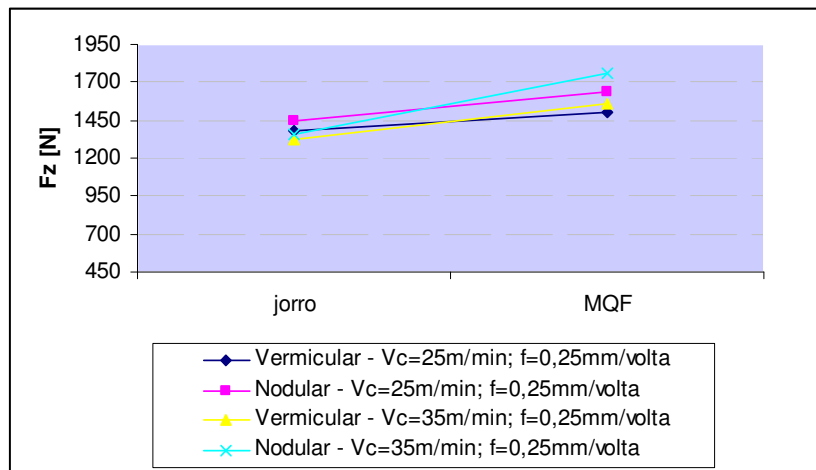


Figura 6. Força de avanço média (Fz) em função do tipo de aplicação de fluido de corte, para o maior avanço (f).

Pode-se observar pelas Figs. (5) e (6) que ao mudar o tipo de aplicação de fluido de corte de jorro para MQF têm-se um aumento no valor de Fz, em média, de 179 N. Tanto o sistema MQF como o sistema jorro foram aplicados externamente. Os resultados indicam, entretanto, que o sistema de aplicação em jorro proporcionou uma maior capacidade de lubrificação que o sistema MQF. Outro motivo para o pior desempenho do sistema MQF pode ser devido à ineficiência da expulsão do cavaco da região de corte, quando comparado com o jorro.

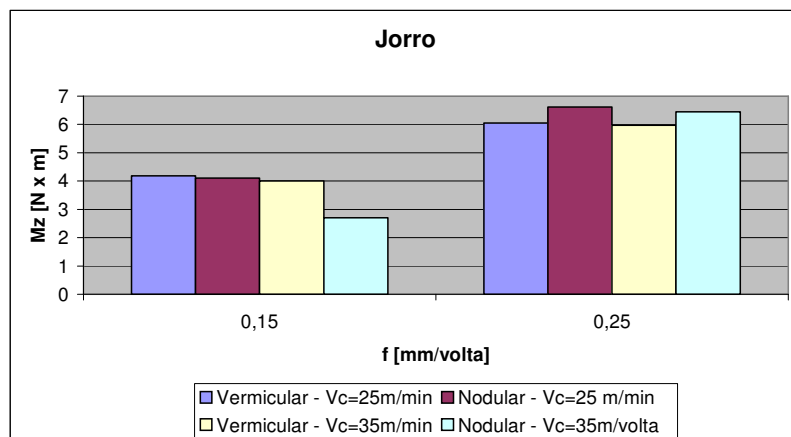


Figura 7. Torque médio (Mz) em função da variação do avanço (f) com aplicação de fluido de corte por jorro.

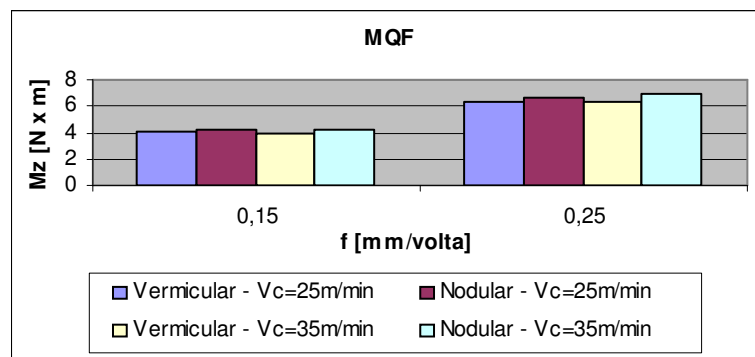


Figura 8. Torque médio (Mz) em função da variação do avanço (f) com aplicação de fluido de corte por MQF.

Pelas Figuras (7) e (8), ao se aumentar o avanço de 0,15 mm/volta para 0,25 mm/volta pode-se observar um aumento no Mz, em média, de 2,5 Nm. Da mesma forma que em Fz, o aumento do avanço aumenta diretamente as áreas de cisalhamento primário e secundário, causando um aumento de Mz.

4. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos pôde-se concluir que os materiais não apresentaram diferença significativa na força de avanço e no torque para as condições estudadas.

A força de avanço foi influenciada significativamente tanto pelo avanço quanto pelo tipo de aplicação de fluido. O aumento do avanço fez com que Fz aumentasse e a mudança de aplicação de fluido de jorro para MQF também aumentou ligeiramente Fz.

O torque foi influenciado significativamente apenas pelo avanço, sendo que Mz foi aumentado pelo aumento deste parâmetro.

5. AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos às agências de fomento: CAPES, FAPEMIG, CNPq e IFM e pelo apoio incondicional à infraestrutura do LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da FEMEC – UFU e à Tupy S.A. pelo fornecimento dos corpos de prova.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Machado, A.R. e da Silva, M.B., 2004, “Usinagem dos Metais”, Apostila da disciplina Usinagem dos Metais do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, 8a versão, 257p.
- Santos, S.C., 2002, “Estudo da Influência de Resvestimentos e da Aplicação de Fluido de Corte no Desempenho de Brocas de Metal Duro Integral na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento”, Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Toktas, G.; Tayanç, M. and Toktas, A., 2006, “Effect of matrix structure on the impact properties of an alloyed ductile iron”, *Materials Characterization* Vol. 57, pp 290-299.
- Mocellin, F., Estudo da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaio de Furação. 2002. 94p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Mocellin, F.; Melleras, E.; Guesser, W. L.; Boehs, L., 2004, “Study of the Machinability of Compacted Graphite Iron for Drilling Process”, *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.* Vol. XXVI, No. 1, pp 22-27.

FORCE AND TORQUE WHEN DRILLING DUCTILE CAST IRON AND COMPACTED GRAPHITE IRON

Patrícia Alves Barbosa, patricia026_eng@hotmail.com¹
Guilherme Boaventura Rabelo, guilhermefemec@yahoo.com.br¹
Wilson Luiz Guesser, wguesser@tupy.com.br²
Éder Silva Costa, eder@div.cefetmg.br¹
Álison Rocha Machado, alisonm@mecanica.ufu.br¹

¹ Department of Mechanical Engineering – Federal University of Uberlândia, Campus Santa Mônica, CEP 38408-902

² Tupy S.A., Joinville/SC – Brazil, CEP: 89206-900 and FEJ/ UDESC, Faculty of Mechanical Engineering, University Campus Prof. Avelino Marcante, CEP 89223-100

Abstract. *The ductile cast iron history is marked for the good castability, damping capacity and mechanical properties (ductility, toughness and strength) and appropriate machinability. The compacted graphite iron, material from recent production, can be considered as an intermediary material between the gray cast iron and the ductile cast iron. It has found increasing applications in crankcases and heads of diesel engines, however, showing poorer machinability when compared to grey cast iron, traditional material in these applications. The aim of the present work is to compare the machinability, in drilling process, of the compacted graphite iron (grade FV 450) with ductile cast iron (grade FE 70003) in respect to the machinability index relating to thrust force (F_z) and torque (M_z), and to show the effects of the cutting conditions on these output variables. Drilling tests were carried out using high speed steel drills coated with TiN, following a factorial planning 2^4 , consisting of two quantitative variable: cutting speed (V_c) and feed rate (f) and two qualitative variable: work material and cutting fluid application technique. The results showed that there is no significant difference between the compacted graphite iron and the ductile cast iron for the cutting conditions studied, and that the feed rate and the cutting fluid application technique have significant influence on the force F_z , however, the torque M_z is significantly influenced only by the feed rate.*

Keywords: *machinability, drilling process, ductile cast iron, compacted graphite iron force and torque.*