

ESTUDO PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE MANDRILAMENTO EM FERRO FUNDIDO VERMICULAR COM DIFERENTES CONCEPÇÕES DE FERRAMENTAS

João Henrique Bagetti (autor para correspondência)

GRUCON – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.

joabagetti@yahoo.com.br

Lourival Boehs

GRUCON – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.

boehs@emc.ufsc.br

Cássio Andrade

Tupy Fundições Ltda. Albano Schmitd, 3400 Joinville – SC Cep: 89227-901

047 3441-8194

cassio@tupy.com.br

Wilson Luiz Guesser

Tupy Fundições Ltda. Albano Schmitd, 3400 Joinville – SC Cep: 89227-901

(47) 3441-8265

wguesser@tupy.com.br

Resumo: *O ferro fundido vermicular, devido à maior relação resistência/peso, vem ganhando espaço na construção de blocos de motores diesel, pois proporciona redução do peso do bloco do motor e possibilita pressões maiores dentro da câmara de combustão. No entanto, o material em questão apresenta maior dificuldade na usinagem, o que acarreta custos maiores no processo de fabricação. Dentre os processos de usinagem, pelos quais deve passar um bloco de motor, está o mandrilamento do cilindro do bloco, que apresenta tempos de usinagem e desgaste da ferramenta superiores aos do cinzento. Levando-se em consideração esses dois pontos, o presente trabalho irá tratar de um estudo em uma linha de usinagem, de blocos de motores em vermicular, especificamente no mandrilamento dos cilindros, tendo como objetivo reduzir o tempo de usinagem e a redução dos custos desse processo, mantendo a qualidade e tolerâncias dimensionais requeridas pelo cliente. Para isso, foram testadas diferentes concepções de ferramentas, com parâmetros de corte distintos. Tais parâmetros foram especificados em função de cada concepção de ferramenta, visando o melhor desempenho de cada uma. Com os resultados obtidos, foi possível se fazer uma análise de custo-benefício de cada ferramenta, levando-se em consideração o tempo de usinagem, a vida útil da ferramenta, a produtividade alcançada e, os demais parâmetros necessários, fazendo-se, assim, um comparativo entre as ferramentas utilizadas.*

Palavras chaves: *CGI, mandrilamento, vermicular, cilindro do bloco.*

1 INTRODUÇÃO

A otimização dos processos de usinagem dentro das indústrias é algo permanente, principalmente nos dias de hoje, pois o mercado globalizado requer menores custos e rapidez na produção, ou seja, uma postura cada vez mais competitiva das indústrias.

Pode-se otimizar os processos de usinagem sob dois parâmetros: redução dos tempos não-produtivos, que envolvem os tempos secundários, como movimentação, troca de ferramenta, preparo da máquina, entre outros; e também na redução do tempo produtivo, que é o processo de usinagem propriamente dito (Baptista, 2000). Também se pode ver, através de uma análise, com base no processo de fabricação, isto é, se for uma operação de desbaste, o foco é a minimização dos custos e do tempo de fabricação; no acabamento, o foco já é, em relação à manutenção de tolerâncias dimensionais estreitas, a qualidade da superfície a ser obtida, entre outros fatores que se tornam mais relevantes (Weingaertner & Schroeter, 2002). O processo de otimização pode ser implementado de diversas maneiras, como a utilização de novas concepções de ferramentas, aplicação de novos dispositivos de fixação, simulação em computador para análise de diferentes situações do processo de usinagem, adequação de condições de corte, e ferramentas utilizadas dentro de limites técnicos, econômicos, e gerenciais existentes (restrições da máquina-ferramenta e condições econômicas de corte) (Baptista, 2000).

Um meio bastante empregado dentro das indústrias é a otimização, com foco na ferramenta de corte. Para tanto, é necessário a experimentação com diferentes ferramentas de corte, com algum avanço tecnológico em relação à ferramenta atual, onde se utilizam parâmetros de corte diferentes dos utilizados normalmente no processo, visando a redução de tempo e, principalmente, do custo de usinagem. Esse estudo de otimização, que será apresentado a seguir, foi realizado na prática, onde foram testadas diferentes concepções de ferramentas, de diferentes fabricantes, com foco na redução do tempo e dos custos do processo de mandrilamento dos cilindros dos blocos de motores. Para tanto, foram analisados os parâmetros de corte, o custo de cada ferramenta, e o custo de usinagem, para verificar qual a ferramenta traria a melhor relação custo-benefício para o processo e para a empresa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ferro fundido vermicular ou CGI (*Compacted Graphite Iron*) é conhecido desde a década de 40; porém, a sua utilização em escala industrial teve início na década de 90, quando a empresa *SinterCast* passou a comercializar a tecnologia e equipamentos necessários para romper a principal barreira para sua utilização na indústria: a falta de um processo confiável de controle aplicável a uma produção em larga escala (Mocellin, 2002; Xavier, 2003).

Vencida essa barreira, o CGI vem ganhando espaço, principalmente na indústria automobilística, devido as suas propriedades mecânicas maiores que as do ferro fundido cinzento, sendo empregado na fabricação de peças que, normalmente, são em cinzento, tais como os discos de freios, coletores de escapamento, cabeçotes e, principalmente, em blocos de motores diesel (Guesser e Guedes, 1997 citados por Mocellin, 2002), pois esse material, com resistência maior, possibilita fazer motores mais potentes, do mesmo tamanho, ou então motores mais compactos, com a mesma potência, e com a vantagem adicional de que proporcionam combustão mais eficiente e, portanto, são menos poluentes. Entretanto, as melhores propriedades mecânicas do CGI, em relação ao cinzento (Tabela 1), refletem diretamente no custo de usinagem, podendo limitar a sua aplicação; diante disso, a sua usinabilidade vem sendo investigada intensamente, desde 1995 (Mocellin, 2002).

Tabela 1. Propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular comparado com o cinzento e nodular (Modificada de *Technical Articles*, 2000; ASM, 1996; Guesser, 1997; Hick, 2000 citados por Xavier, 2003).

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

2.1 Usinabilidade do ferro fundido vermicular

O CGI é visto como um material que apresenta inúmeras possibilidades de aplicação em diversos setores da indústria, por combinar características mecânicas e físicas, situadas entre o ferro fundido cinzento e o nodular (Tabela 1), principalmente, na construção de blocos de motores a diesel (Phillips, 1982 citado por Xavier, 2003). Entretanto, o que impede a maior utilização do CGI em blocos de motores, é a sua maior dificuldade em ser usinado, por alguns processos de corte, quando comparado com o ferro fundido cinzento. Atualmente um dos grandes desafios é introduzir o CGI nas linhas “transfer”, existentes para a usinagem de ferro fundido cinzento, buscando-se o mesmo desempenho das ferramentas e custos por peças, tentando evitar investimento adicional em máquinas e ferramentas, sendo que os primeiros resultados, obtidos em testes, para implantar peças de vermicular em linhas “transfer”, foram realizados pelo Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen Technische Universität Darmstadt (PTW Darmstadt) (Xavier, 2003). Na Figura 1 estão expostos os resultados obtidos nos testes comparando o CGI e o cinzento nos processos de usinagem mais empregados na fabricação de blocos de motores.

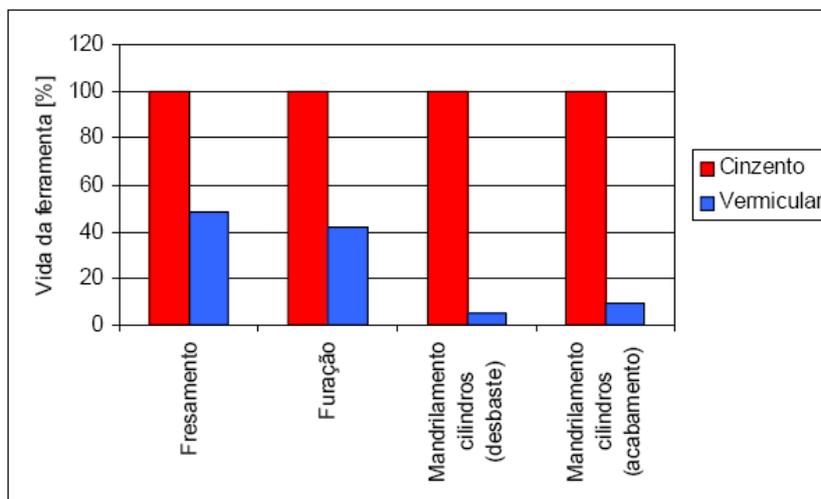


Figura 1. Comparação entre a usinabilidade do CGI e ferro fundido cinzento em operações de usinagem e linhas “transfer” (Reuter et al, 2000 citado por Xavier, 2003).

Esses resultados mostram que, em todas as operações, as ferramentas utilizadas na usinagem do CGI apresentam desempenho inferior em relação ao cinzento. Nos processos de fresamento e furação, a diminuição da vida da ferramenta se deve à maior resistência mecânica do CGI; porém, em processos de corte contínuo, como no caso do mandrilamento, a vida da ferramenta chega a apenas 5% da vida do cinzento, constituindo um grande desafio para o entendimento dessa enorme diferença e, conseqüentemente, desses resultados.

2.2 Análise econômica

Para esse estudo foi calculado o tempo de corte (t_c) e tempo total de usinagem (t_t), sendo esse último, calculado conforme Equação 1 (Machado et al, 2004) que é a soma do tempo de corte com o tempo improdutivo (t_i) padrão do processo que engloba, troca de ferramenta, de operador, da peça, *Pre-set* e outros tempos secundários. O tempo de corte por bloco é calculado em função da velocidade de avanço (v_f) e do percurso de avanço (l_f) (Equação 2). Quanto ao custo da ferramenta por vida (K_{ft}) e custo da ferramenta por bloco (K_{uf}), foram calculados conforme Equação 3 e Equação 4 (Diniz et al, 1999). Com o K_{uf} e o custo operacional da operação de mandrilamento (CO) calcula-se o custo de usinagem por bloco desta operação.

$$t_t = t_i + t_c \quad (1)$$

Onde:

t_t – tempo total de usinagem [min];

t_i – tempo improdutivo [min];

t_c – tempo de corte [min].

$$t_c = \left(\frac{l_f}{v_f} \right) * 6 \quad (2)$$

Onde:

l_f – percurso de avanço [mm];

v_f – velocidade de avanço [mm/min].

$$K_{ft} = \frac{V_{si}}{N_{fp}} + \frac{K_{pi}}{N_s} \quad (3)$$

Onde:

K_{ft} – custo da ferramenta por vida [R\$].

V_{si} - custo de aquisição do suporte [R\$].

k_{pi} - custo médio de aquisição do inserto [R\$].

N_s - número de arestas por inserto.

N_{fp} - vida média do suporte em arestas de corte.

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z_t} \quad (4)$$

Onde:

K_{uf} – custo da ferramenta por bloco [R\$].

Z_t – quantidade de blocos produzidos durante a vida T (vida em min) da ferramenta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Testes realizados

Os testes foram realizados em condições reais de trabalho, utilizando o mesmo tipo de máquina utilizada numa linha de produção na empresa com parceria no estudo. As ferramentas utilizadas nos testes foram fornecidas por fabricantes distintos, e, assim sendo, apresentam diferenças na sua concepção e construção. Conforme acordo firmado entre as partes, os nomes não serão divulgados nesse artigo, que serão denominados por códigos; no caso, são: A1, A2, A3. No caso das ferramentas A1 e A2 essas foram testadas em duas condições; portanto, estão sendo denominadas como A1.1, A1.2 e A2.1 e A2.2.

Os corpos de prova utilizados foram blocos de motor, provenientes de um mesmo lote de fundição, visando diminuir possíveis variações em relação às propriedades mecânicas entre os blocos, visto que, estas variações, podem influenciar os resultados.

A vida das ferramentas foi determinada seguindo os seguintes critérios: diâmetro do cilindro, além do valor da tolerância; potência de corte excessiva; presença de riscos profundos na parede do cilindro, normalmente ocorridos durante a saída da ferramenta; e qualquer irregularidade na superfície usinada, como presença de rebarbas e outros defeitos.

Para a realização dos testes foram seguidos os seguintes passos:

1. Existência de dois parâmetros de corte: o escolhido para o teste (mais agressivo) e o parâmetro normal de produção;
2. Usina-se um bloco (início de vida); confirmada a ausência de problemas, a ferramenta é liberada para produzir, até a ferramenta atingir um dos critérios de final de vida;
3. Acompanhar o teste através de inspeção visual da máquina e ferramenta, e efetuar medições do diâmetro.

Os parâmetros de corte, que foram modificados para cada ferramenta, foram: a velocidades de corte (v_c) e de avanço (v_f). Tendo como base a situação atual da operação, para determinar os parâmetros para os testes, na Tabela 2 estão expostas as porcentagens de aumento da v_c e v_f para as ferramentas testadas em relação à condição atual.

Tabela 2. Porcentagem de aumento da v_c e v_f para as ferramentas testadas em relação a condição atual.

Ferramentas	% de aumento da v_c	% de aumento da v_f
Produção	Valor base	Valor base
Ferramenta A1.1	20%	122%
Ferramenta A1.2	35%	145%
Ferramenta A2.1	20%	122%
Ferramenta A2.2	40%	145%
Ferramenta A3	0%	0%

3.2 Análise de custo-benefício

A análise de custo-benefício foi feita com base nas equações expostas no item 2.2 deste artigo e dos demais resultados obtidos nos testes, onde serão abordados os aspectos relativos à redução do tempo de usinagem, vida das ferramentas, produtividade, e custos envolvidos na operação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram analisadas três ferramentas de fabricantes distintos, mais a ferramenta que já vinha sendo utilizada na produção. A análise de custo-benefício feita com base nos resultados obtidos nos testes, foi feita de forma comparativa, com foco no principal objetivo, que é a redução do tempo de usinagem, aliado ao custo-benefício.

4.1 Custo-benefício das ferramentas testadas

A partir dos parâmetros de corte especificados para cada uma das ferramentas, foram realizados os testes para verificar o desempenho, principalmente, com relação ao tempo de usinagem. Na Figura 2, estão expostos, o tempo total de usinagem por bloco e vida em minutos de cada ferramenta.

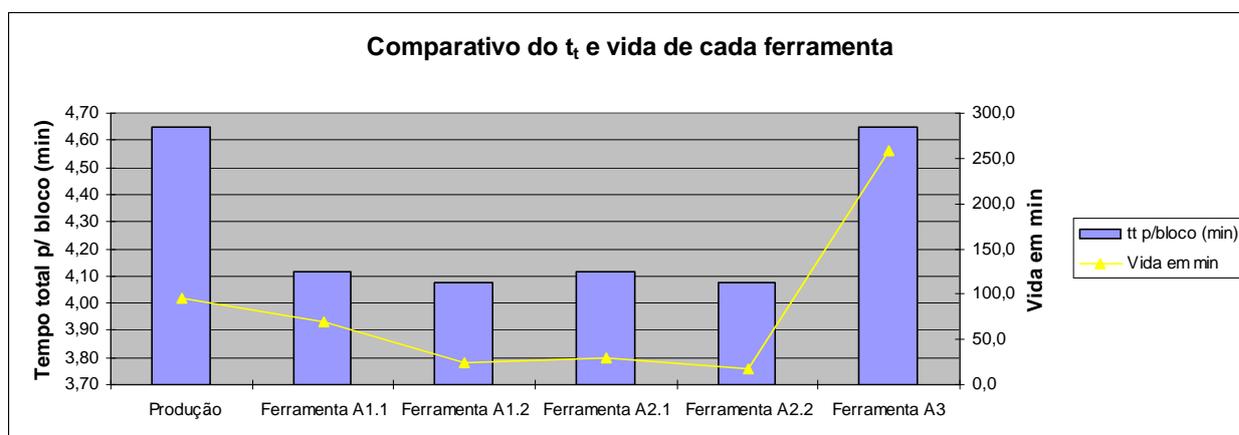


Figura 2. Comparativo, t_t e vida de cada ferramenta.

Pode-se observar na Figura 2 que, tanto a ferramenta A1 quanto a A2, nas duas situações em que foram testadas, apresentaram uma redução no tempo total de usinagem; porém, tiveram redução na vida, o que influencia diretamente no aumento do custo com ferramenta por peça. A ferramenta A3, por sua vez, apresentou o mesmo tempo total em relação à ferramenta produção, devido a utilizar os

mesmos parâmetros, mas apresentou a maior vida em relação às ferramentas A1, A2 e produção, revelando maior resistência ao desgaste, comparando diretamente com a situação atual.

Analisando a Figura 3 observa-se que, as ferramentas A1 e A2, por apresentarem tempos de usinagem menores, obtiveram ganho no volume de produção em relação a A3, tomando como base os valores de produção atuais da operação de mandrilamento. Isso indica uma diluição do custo de usinagem da operação para A1 e A2; pois, observando-se os gráficos da Figura 2 e Figura 3, pode-se deduzir que a ferramenta A3 tem uma redução do custo com ferramenta, em relação as outras, devido a sua maior vida; porém, seu custo operacional não tem uma redução em relação à situação atual.

Quanto às outras duas ferramentas testadas, subentende-se que terão um custo maior com ferramentas, pois apresentaram menor vida; mas, como utilizaram parâmetros de corte superiores aos utilizados atualmente no processo, obtiveram maior volume de produção, compensando o aumento do custo com ferramenta com a redução do custo operacional.

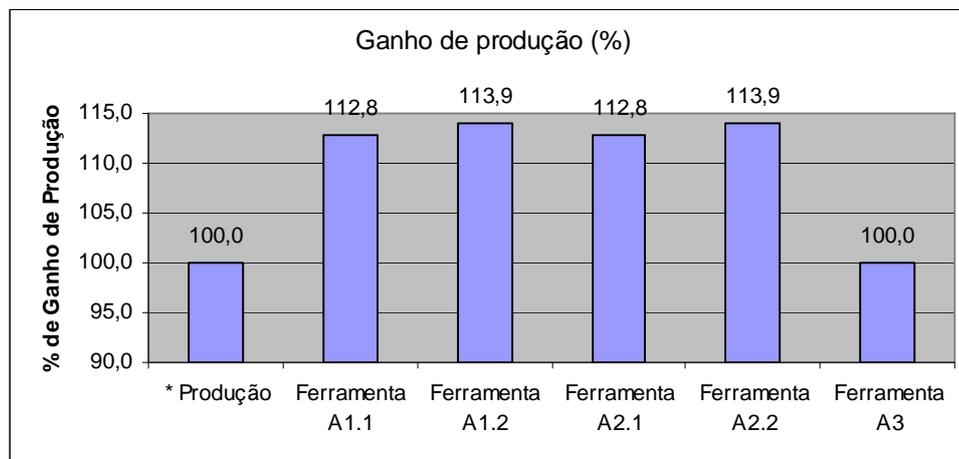


Figura 3. Porcentagem de ganho de produção de cada ferramenta.

Observa-se na Figura 4 um comparativo da porcentagem de redução do custo de usinagem da operação entre as ferramentas A1, A2 e A3. Tomando-se como valor de referência a ferramenta A3, que apresentou a maior vida das três ferramentas testadas, conseqüentemente, irá apresentar um menor custo com ferramenta.

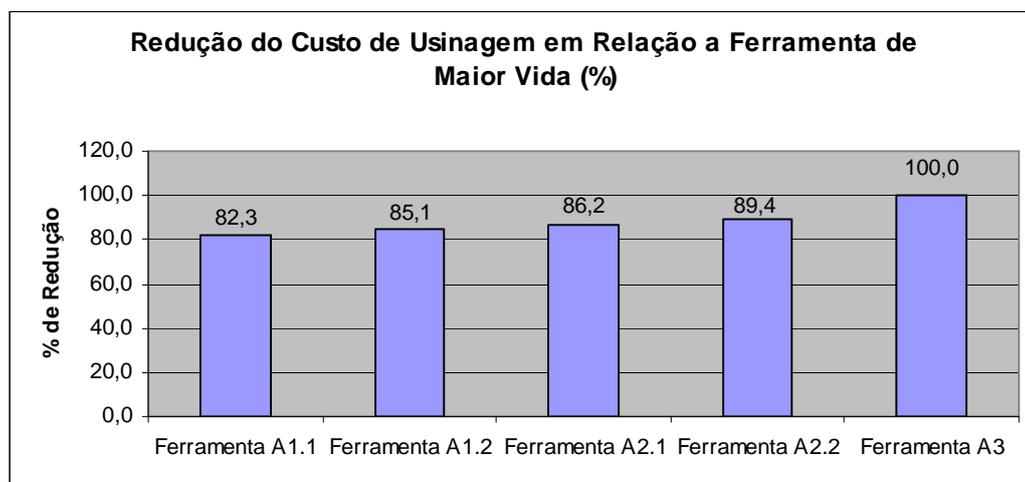


Figura 4. % redução do custo de usinagem em relação a ferramenta de maior vida.

Analisando esse ultimo gráfico, nota-se que, nessa operação, a influência do custo com ferramentas é menor do que o custo operacional; no custo final de usinagem, ou seja, o volume de produção a mais, nesse caso específico, compensou o maior desgaste. Deve-se lembrar que, devido

à ferramenta A3 ter sido testada com os parâmetros utilizados no processo, atualmente, pode-se dizer que, em relação à situação atual, a sua maior resistência ao desgaste teve influência no custo final de usinagem, pois subentende-se que tenha um menor custo com ferramenta.

5 CONCLUSÕES

Observando os resultados dos testes feitos com essas três ferramentas, de concepções distintas, visando a melhoria do processo de mandrilamento dos cilindros dos blocos de motores em vermicular, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- As ferramentas analisadas apresentaram bons resultados para a melhoria do mandrilamento dos cilindros do bloco, onde se ressaltam os desempenhos das ferramentas A1 e A2, devido ao fato de terem sido utilizadas velocidades de avanço bem acima das utilizadas normalmente no processo, o que mostra uma boa produtividade, indo na direção dos objetivos do trabalho, que é a redução do tempo de usinagem e dos custos.
- A ferramenta A3 mostrou alta resistência ao desgaste; porém, trabalhou com os parâmetros do processo atual, o que impossibilita fazer uma comparação direta com as outras duas, pois seu tempo de usinagem foi igual ao do processo atual, assim como sua produtividade.
- Houve um avanço com relação à concepção das ferramentas utilizadas neste processo. A alta resistência ao desgaste da ferramenta A3 é um indicativo dessa melhoria, pois, trabalhando nas mesmas condições da ferramenta atual, apresentou um ganho de vida e, conseqüentemente, redução no custo com ferramenta para o processo.
- As ferramentas A1 e A2 apresentaram redução do tempo de usinagem; porém, ainda é alto para o processo, sendo necessária a continuação dos estudos para uma melhoria contínua, utilizando essas três ferramentas, nessas concepções. ou com melhorias e se, possível, utilizando os mesmos parâmetros, viabilizando uma comparação direta entre as mesmas.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à empresa parceira pelo interesse em desenvolvimento tecnológico, e por disponibilizar equipamentos, matéria-prima, pessoal, e esforços para a realização desse trabalho;

Aos fabricantes de ferramentas, que abraçaram a idéia, disponibilizaram as ferramentas e o pessoal para a realização do trabalho;

Ao projeto REMAUSME, pelo financiamento da minha bolsa de pesquisa e das demais despesas arroladas neste trabalho.

7 REFERÊNCIAS

1. BAPTISTA, E. A. **Desenvolvimento de um sistema especialista para otimização de processos de usinagem**. Santa Bárbara d'Oeste, 2000. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba.
2. SCHROETER, R. B., WEINGAERTNER, W. L. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – parte 1**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório Mecânica de Precisão, Florianópolis. Apostila. 2002.
3. MOCELLIN, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação**. Florianópolis, 2002a. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

4. XAVIER, F. A. **Aspéctos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN.** Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
5. MACHADO, A. R., SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais.** Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 8ª versão, abril de 2004.
6. DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** Editora MM, São Paulo, SP, 1999.
7. COPPINI, N. L. e BAPTISTA, E. A. **Influência dos Parâmetros no Processo de Usinagem.** Revista Máquinas e Metais, Setembro de 2005. p. 172.
8. COPPINI, N. L. e BAPTISTA, E. A. **Alternativas de Otimização dos Parâmetros de Corte para Cenários de Fabricação em Usinagem.** Encontro Nacional de Engenharia de Produção, anais da associação Brasileira de Engenharia de Produção, Niterói, 1998.
9. XAVIER, A. F. ; BOEHS, L. ; GUESSER, W. L. ; ANDRADE, C. L. **Estudo da Viabilidade Técnica e Econômica para a Utilização de Inseto de Metal-Duro no Torneamento do Ferro Fundido Vermicular.** In: II COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2003, Uberlândia - MG. IN: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO - II COBEF. Uberlândia : ABCM - Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2003.
10. MOCELLIN, F. ; MELLERAS, E. ; GUESSER, W. L. ; BOEHS, L. **Study of the Machinability of Compact Graphite Iron for Drilling Process.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering ABCM, ABCM - Rio de Janeiro, v. XXVI, n. N. 1, p. 22-27, 2004.
11. MOCELLIN, F.; BOEHS, L.; GUESSER, W. L. . **Estudo da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaio de Furação.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2002, João Pessoa - Paraíba. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2. João Pessoa : ABCM - Associação brasileira de Engenharia Mecânica, 2002.

STUDY TO OPTIMIZATION OF THE BORING PROCESS ON COMPACT GRAPHITE IRON WITH DIFFERENT TOOLS' CONCEPTIONS

João Henrique Bagetti (author to mailing)

GRUCON – Mechanical Engineering Department. Federal University of Santa Catarina.

joabagetti@yahoo.com.br

Lourival Boehs

GRUCON – Mechanical Engineering Department. Federal University of Santa Catarina.

boehs@emc.ufsc.br

Cássio Andrade

Tupy Casting Ltda. Albano Schimidt, 3400 Joinville – SC Cep: 89227-901

(47) 3441-8194

cassio@tupy.com.br

Wilson Luiz Guesser

Tupy Casting Ltda. Albano Schimidt, 3400 Joinville – SC Cep: 89227-901

(47) 3441-8295

wguesser@tupy.com.br

Abstract: *The compact graphite iron (CGI) due its larger resistance/weight relation has gained place on the manufacture of diesel's engine blocks, because it provides the engine block a weight reduction and allows higher pressures inside the combustion chamber. How ever, the material in question presents bigger machining difficulties, which cause higher costs on the manufacture process. Within the machining process, through the ones the engine block must pass through, there is the boring of the block cylinders, which provides longer machining times and larger tool wears than the gray cast iron. Considering these two points, this paper will show a study in a machining engine blocks manufacture line with CGI, specifically the cylinders boring process, having as target to reduce the machining times and the costs on this process keeping the quality and the dimensional tolerances required by the client. Therefore different tool conceptions were tested with distinct cutting parameters. Such parameters were specified as functions of each tool conception, aiming better performances of each one. With the achieved results a cost analysis of each tool could be made, considering machining times, tool life, achieved productivity and other needed parameters, therefore being able to make a compare among the tools used.*

Keywords: *CGI – compact graphite iron, boring, block cylinder.*