

USINABILIDADE DE FERROS FUNDIDOS DE ALTA RESISTÊNCIA

Aline Elias da Silva, LEPU, aline_elias@hotmail.com.br

Alcione dos Reis, LEPU, alcionedossreis@yahoo.com.br

Armando Marques, LEPU, amarques@ifes.edu.br

Álison Rocha Machado, LEPU, alisonm@mecanica.ufu.br

Wilson Luiz Guesser, UDESC, wguesser@tupy.com.br

Resumo. A crescente demanda pela inclusão de equipamentos e acessórios que tragam melhorias aos automóveis, como o aumento do desempenho, segurança e conforto, contribuem, na maioria das vezes, para o aumento do peso do veículo, o que tende a deteriorar a sua performance no consumo de combustível fóssil. Desta forma, a indústria automobilística objetiva buscar materiais de alta resistência que possuam a capacidade de se adequarem à tendência de fabricação de veículos mais leves e de alto desempenho. A maior resistência mecânica dos materiais utilizados, por exemplo para confecção de blocos e cabeçotes de motores, possibilita suportarem maiores cargas na câmara de combustão. Assim, em função das menores espessuras de seções da peça, motores mais leves e menos poluentes podem ser fabricados. Entretanto, isto constitui um desafio para a usinagem, por provocarem maiores desgastes e reduções na vida das ferramentas. Nesse sentido, este trabalho objetiva avaliar a usinabilidade de ferros fundidos de alta resistência para aplicação em cabeçotes de motores por meio de ensaios de furação. A pesquisa consiste no estudo de quatro materiais, sendo estes o ferro fundido cinzento da classe FC 250, o ferro fundido cinzento FC 300 ligado ao molibdênio, o ferro fundido cinzento, também da classe FC 300 e ligado ao molibdênio, com refino de grafita e o ferro fundido vermicular da classe CGI 450. Como parâmetros de avaliação da usinabilidade serão utilizados o desgaste das brocas, a força de avanço e o momento torçor, além de análises da qualidade dos furos usinados. Ademais, características microestruturais dos materiais em questão, tais como distribuição das inclusões de sulfeto de manganês (MnS) na matriz, porcentagem de cementita na perlita, espaçamento interlamelar e microdureza da perlita serão levantadas e correlacionadas com a usinabilidade.

Palavras chave: ferros fundidos de alta resistência, usinabilidade, furação, características microestruturais.

1. INTRODUÇÃO

No intuito de se alcançar a melhoria na performance e emissão de poluentes do motor a diesel, o aumento do pico de pressão de queima na câmara de combustão se faz necessário. No entanto, este aumento dos esforços mecânicos pode resultar em falhas prematuras dos componentes do motor. Para tanto, os engenheiros de projeto devem escolher entre aumentar a espessura das seções da peça e, consequentemente, o peso ou utilizar materiais mais resistentes. Contudo, o peso dos motores influencia diretamente o consumo de combustível do veículo, aumentando o custo e tornando-o menos competitivo frente às exigências de redução da emissão de poluentes. Portanto, a alteração de material se torna uma opção defensável (Guesser *et al.*, 2001; Dawson e Indra, 2012).

O ferro fundido cinzento é um dos materiais mais utilizados na fabricação de cabeçotes de motores diesel. No entanto, um aumento nas taxas de compressão pode ocasionar trincas e deformações nestes componentes. Desta forma, estes materiais devem ser fabricados com altos valores de resistência, normalmente ligados ao cromo ou molibdênio, que aumentam a resistência mecânica, impactando de forma positiva na vida do cabeçote. Além disso, no processo de fundição, a velocidade de resfriamento, assim como a composição química, também pode influenciar de forma significativa as propriedades mecânicas desses materiais. Um aumento na taxa de resfriamento irá refinar tanto o tamanho da grafita quanto a estrutura da matriz (refinando e aumentando a quantidade de perlita), o que resultará em um aumento de dureza e resistência (Guesser, 2009; ASM, 1990).

Outra alternativa, para a confecção de cabeçotes, é o uso de ferros fundidos vermiculares, cuja a alta resistência mecânica permite o alcance de maiores taxas de compressão nos motores, o que pode resultar em reduções na espessura dos seus componentes. Segundo Dawson *et al.* (2014), os ferros vermiculares apresentam limite de resistência e módulo de elasticidade 75% e 40% maiores, respectivamente, que o ferro cinzento, além de ter o dobro de resistência à fadiga. Ademais, a complexa morfologia de sua grafita atua de forma a inibir a propagação de trincas, sendo estas as razões das melhores propriedades mecânicas em relação ao ferro fundido cinzento. Em contrapartida, tais características tornam os custos dos processos de usinagem mais elevados, pois estes materiais aceleram o desgaste da ferramenta.

Sendo assim, justificam-se estudos que permitam avaliar o comportamento dos materiais frente aos processos de fabricação, possibilitando decisões maduras quanto à substituição ou não dos materiais já disponíveis no mercado para a indústria automobilística, observadas as características de peso, resistência mecânica, custo de usinagem, possíveis impactos ambientais, entre outras.

Neste trabalho o objetivo é avaliar a usinabilidade de um ferro fundido de alta resistência classe FC 300 (FC300_(RG)), com adição de molibdênio e refino de grafita, para aplicação em cabeçotes de motor, em comparação com materiais já utilizados para este fim: ferro fundido cinzento FC 250 (FC250), ferro fundido cinzento FC 300 ligado ao molibdênio (FC300_(Mo)) e o ferro fundido vermicular da classe 450 (CGI450).

2. MÉTODO PROPOSTO

No intuito de se atingir os objetivos desta pesquisa foi programado uma série de ensaios que estão divididos em quatro etapas principais e oito sub-etapas, esquematizadas na Fig. (1):

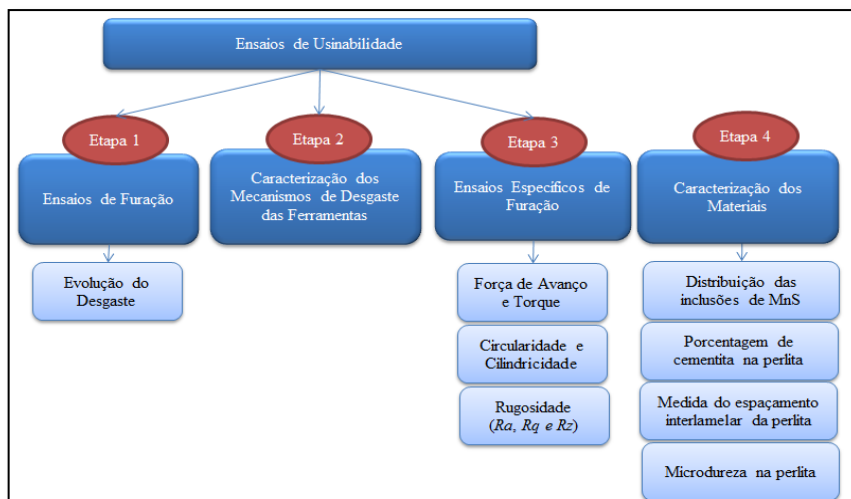


Figura 1. Esquema para realização das medições e ensaios propostos

2.1. Corpos de prova e ferramentas utilizadas

Os corpos de prova foram fornecidos pela empresa TUPY S.A em forma de barras retangulares, cujas dimensões, ilustradas na Fig. (2), foram de, aproximadamente, 400 mm de comprimento, 240 mm de largura e 40 mm de espessura. Cada barra comporta 589 furos de 10 mm de diâmetro. Estes corpos de prova serão pré-usinados (faceados) de forma a manter uma espessura padronizada de 36 mm.

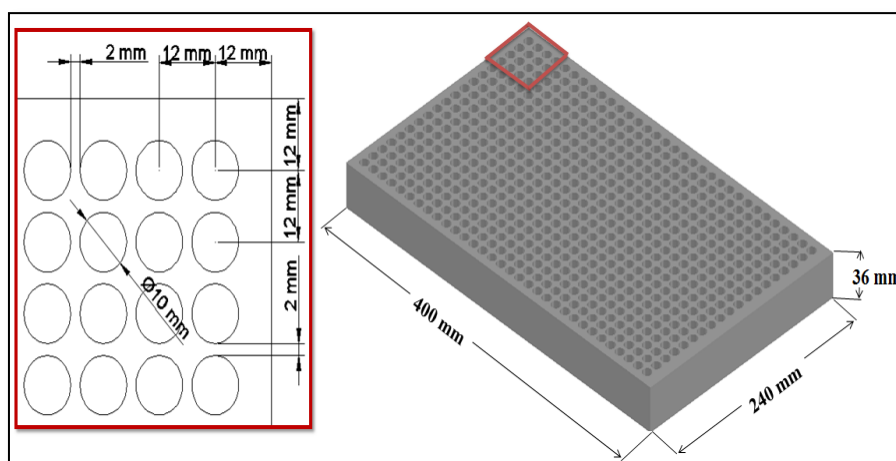


Figura 2. Geometria dos corpos de prova dos materiais usinados

Serão usinados furos não passantes com um comprimento de penetração fixo (L_f) de 16 mm, realizados no centro de Usinagem Vertical CNC linha DISCOVERY modelo 760 da marca ROMI do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU).

As ferramentas utilizadas serão, no total, 60 pontas de brocas intercambiáveis (10 mm de diâmetro) de metal duro SUMOCHAN com cobertura multicamada de TiN/TiAlN. As ferramentas serão mantidas como uma constante, sendo estas fabricadas pela ISCAR Ltda.

2.2. Ensaios de furação

Nesta etapa serão realizados testes de vida da ferramenta, onde será acompanhada a evolução do desgaste da broca. Os ensaios de vida serão desenvolvidos utilizando um critério de fim de vida baseado no desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax}) igual a 0,40 mm ou um número de furos máximo de 500, caso a taxa de desgaste seja muito pequena. Isto para evitar a utilização de excessiva quantidade de material. Todos os testes serão repetidos duas vezes, totalizando 3 testes em cada condição (teste, réplica e tréplica), garantindo assim confiabilidade estatística nos resultados.

Estes ensaios serão desenvolvidos segundo um planejamento fatorial completo 2^3 , consistindo de duas variáveis quantitativas, velocidade de corte (v_c) e avanço (f), e uma variável qualitativa, que é o material. As Tabs. (1) e (2) mostram, respectivamente, as variáveis de entrada à dois níveis e o planejamento fatorial 2^3 :

Tabela 1. Variável de entrada a dois níveis.

Variável	Nível (-1)	Nível (+1)
v_c (m/min)	70	140
f (mm/rot)	0,15	0,25
Material	FC250	FC300 _(Mo) ; FC300 _(RG) ; CGI450

Tabela 2. Planejamento fatorial 2^3 .

Ensaios	Velocidade de corte	Avanço	Material
01	- 1	- 1	- 1
02	+ 1	- 1	- 1
03	- 1	+ 1	- 1
04	+ 1	+ 1	- 1
05	- 1	- 1	+ 1
06	+ 1	- 1	+ 1
07	- 1	+ 1	+ 1
08	+ 1	+ 1	+ 1

2.3. Caracterização dos mecanismos de desgaste da ferramenta

As ferramentas utilizadas nos ensaios de vida, ao final dos testes, serão levadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV *Hitashi* TM3000) para análise criteriosa dos desgastes e identificação de seus mecanismos.

2.4. Ensaios específicos de furação

Ensaios específicos serão realizados a fim de se monitorar a força de avanço e o torque, bem como para medição da rugosidade, circularidade e cilindridade, sem a influência do desgaste da ferramenta. Estes testes serão realizados utilizando a metodologia univariada em que será avaliada uma variável de cada vez, ou seja, entre a velocidade de corte e o avanço fixa-se uma e varia-se a outra. A Tab. (3) mostra as condições de corte que serão utilizadas para a realização desta etapa. Para cada teste serão executados 3 furos.

Tabela 3. Dados das condições de corte para os ensaios específicos.

Ensaios	V_c [m/min]	f [mm/rot]
Ensaio 1	110 - 140	0,27
Ensaio 2	135	0,20 - 0,32

No que se refere ao monitoramento da força de avanço e do momento torçor será utilizado um sistema constituído pelos seguintes componentes: dinamômetro rotativo modelo 9124B, condicionador de sinais, modelo 5223B, ambos fabricados pela *Kistler Instruments*, placa de aquisição de sinais (USB) e o *software Signal Express 14.0®*, estes últimos fabricados pela *National Instrument*.

As medições referentes aos desvios de circularidade e cilindridade serão realizadas em uma máquina de medir tridimensional, modelo BR M443, fabricante Mitutoyo, resolução de 0,001 mm e volume de trabalho, respectivamente para os eixos x, y e z, de 400 x 400 x 300 mm³. Todas as medições serão realizadas à temperatura ambiente de 20±1°C,

sendo esta monitorada através de um termohigrômetro digital, com resolução de 0,1 °C e faixa de medição de (-20 a 60) ° C.

Por fim, para a medição dos parâmetros de rugosidade (R_a , R_q e R_z) será utilizado o rugosímetro Taylor Robson Surftest 201. Este instrumento possui agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 5 μm , resolução de 0,1 μm e trabalha com carga de 150 a 300 mg.

2.5. Caracterização dos materiais

Análises metalográficas serão realizadas a fim de se levantar algumas características microestruturais dos materiais em questão, tais como, distribuição das partículas de MnS, porcentagem de cementita na perlita, espaçamento interlamelar e microdureza da perlita.

As Tabs. 4, 5 e 6 mostram, respectivamente, a caracterização da grafita dos ferros fundidos, os valores da dureza Brinell e da resistência mecânica e, por fim, os valores médios da composição química para os quatro materiais. Na Fig. (3) encontram-se as micrografias dos ferros fundidos. Tais informações foram cedidas, por meio de relatórios, pela TUPY S.A.

Tabela 4. Características da grafita e da matriz dos materiais analisados.

Material	Matriz	Grafita		
		Forma	% Carboneto	% nodular
FC250	100% Perlítica	I	-	-
FC300 _(Mo)	100% Perlítica	I	-	-
FC300 _(RG)	100% Perlítica	I	-	-
CGI450	~1% de Ferrita	III - VI	0	9

Tabela 5. Dureza e resistência mecânica dos quatro ferros fundidos.

Propriedades	FC250	FC300 _(Mo)	FC 300 _(RG)	CGI450
Dureza [HB]	187	207	217	229
LE [MPa]	-	-	-	379
LR [MPa]	259	278	283	524
Alongamento [%]	-	-	-	1,54

Tabela 6. Composição química dos ferros fundidos.

Material	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ti [%]	Sn [%]	Cu [%]	Mo [%]	Ni [%]
FC250	1,900	0,500	0,020	0,100	0,270	-	0,130	0,280	0,020	-
FC300 _(Mo)	-	-	-		0,220		0,050	0,700	0,250	
FC300 _(RG)	2,000	0,600	0,030					0,200		
CGI450	2,210	0,320	-	0,003	0,031	0,007	0,070	0,990	-	0,016

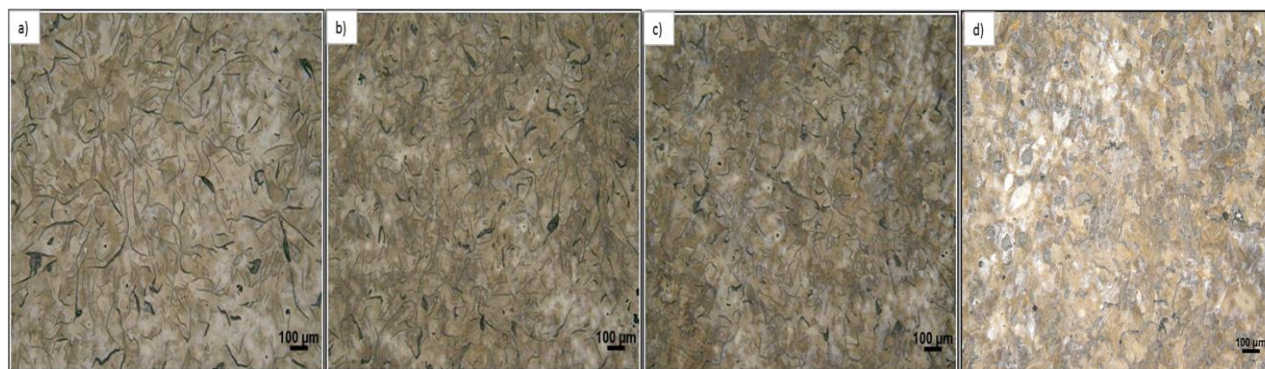


Figura 3. Micrografias do a) FC250; b) FC300_(Mo); c) FC300_(RG); CGI450. Ataque em Nital 3%

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa tem previsão de conclusão em fevereiro de 2016. As etapas 1, 2 e 3, evidenciadas na Fig. (1), já foram realizadas. Os resultados obtidos ainda estão sendo discutidos e, após o término da etapa 4, será possível obter uma correlação entre as características microestruturais dos ferros fundidos e a usinabilidade. Desta forma, os resultados deverão ser melhores explicados em futuras publicações.

4. REFERÊNCIAS

- ASM Handbook Committee - Properties and selection, 1990 "Irons, Steels, and High-Performance Alloys". 10 ed. USA: ASM International, v. 01. 1063p.
- Dawson, S.; Hollinger, I.; Robbins, M.; Daeth, J.; Reuter, U.; Schulz, H., 2014 "The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron". Sintercast. 22 p. Publicação Técnica.
- Dawson, S; Indra, F., 2012 "Compacted Graphite Iron – A New Material for Highly Stressed Cylinder Blocks and Cylinder Heads". Sintercast, 13p. Publicação Técnica.
- Guesser, W. L., 2009, "Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos". 1. ed. Ed: Blüsher, S. Paulo 336p.
- Guesser, W.; Schroeder, T.; Dawson, S., 2001 "Production experience with compacted graphite iron automotive components". AFS Transaction, pp. 1-11.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem à CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo financiamento obtido, à Tupy S.A, fornecedora dos materiais usinados, e à ISCAR Ltda, fornecedora das ferramentas utilizadas.

6. ABSTRACT

Abstract. *The increasing demand for adding equipment and accessories that bring improvements to the cars, such as higher performance, safety and comfort, contributing, in most cases, to augment the vehicle weight, which tends to deteriorate its performance in terms of fuel consumption. Thus, the automotive industries seek for high-strength materials to adequate to the trend of making lighter and higher-performance vehicles. For example, the mechanical strength of the materials used for making engine blocks and heads allows withstand higher loads in the combustion chamber. Thus, due to the smaller cross sections of workpieces, lighter and cleaner engines can be manufactured. On the other hand, this is a challenge for machining, because of the greater wear and reductions in tool lives. Thus, this study aims to evaluate the machinability of high-strength cast irons used in the manufacturing of motor heads, through drilling tests. The research consists of studying four materials: gray cast iron class FC 250, gray cast iron FC 300 with addition of molybdenum, gray cast iron, also the FC 300 and addition of molybdenum, with refining of the graphite and compact graphite iron CGI 450. Wear of the drill, the thrust force and torque, and analyzes the quality of the drilled holes will be the machinability evaluating parameters. Moreover, microstructural characteristics of the materials in question, such as distribution of manganese sulfide inclusions (MnS) in the matrix, percentage of cementite in the pearlite, interlamellar spacing and micro hardness of the pearlite will be raised and correlated with the machinability.*

Keywords: *high strength cast iron, machinability, drilling, microstructural characteristics.*

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.