

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MEIOS LUBRI-REFRIGERANTES NA FURAÇÃO DE FERRO FUNDIDO VERMICULAR COM BROCAS DE METAL-DURO REVESTIDAS COM TiAIN

Júlio Celso dos Santos Bossardi, julio@tupy.com.br¹
Cássio Luiz Francisco de Andrade, cassio@tupy.com.br¹
Rolf Bertrand Schroeter, rolf@emc.ufsc.br²
Salette Martins Alves, salete.martins@sociesc.com.br³

¹Tupy Fundições S.A., Rua Albano Schmidt, 3400, Joinville/SC, Brasil

²Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), UFSC, Caixa Postal-476 EMC, 88010-970, Florianópolis/SC, Brasil

³Sociedade Educacional de Santa Catarina (SOCIESC), Rua Albano Schmidt, 3333, 89206-001, Joinville/SC, Brasil

Resumo: O aumento da eficiência térmica, aliado à redução do peso do motor, caracteriza o bloco de motor a diesel, em cuja fabricação cada vez mais é utilizado o ferro fundido vermicular. O emprego desse material viabiliza a construção de veículos com motores mais eficientes, no sentido de diminuir tanto o consumo de combustível quanto a emissão de poluentes, como monóxido de carbono e hidrocarbonetos, se comparado ao ferro fundido cinzento. Porém, apesar de extremamente vantajoso no que tange à funcionalidade do produto final, o ferro fundido vermicular se apresenta um dos piores candidatos se analisado em termos de usinabilidade. Devido à utilização relativamente recente deste material, ainda não se dispõem de informações suficientes sobre as condições mais adequadas na sua usinagem. Considerando que a lubri-refrigeração exerce um papel importante nos processos de usinagem, o estudo e a correta seleção dos meios lubri-refrigerantes é essencial para melhorar o desempenho do processo. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar e selecionar o meio lubri-refrigerante mais adequado à furação do ferro fundido vermicular. É analisado o comportamento de brocas helicoidais na furação com diferentes meios lubri-refrigerantes, avaliando-se a influência do meio lubri-refrigerante sobre o desgaste da ferramenta. Os parâmetros de saídas analisados são, além do desgaste da ferramenta, a qualidade dos furos, avaliada através dos diâmetros, conicidades, cilindridades, circularidades e rugosidades R_a e R_z . A caracterização dos mecanismos de desgaste atuantes na usinagem foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por espectrometria (EDS). Os resultados mostraram que o meio lubri-refrigerante que proporciona melhor desempenho é um fluido semi-sintético que contém aditivos EP, sendo formulado à base de óleo mineral e éster.

Palavras-chave: Ferro fundido vermicular (CGI), broca helicoidal, fluidos de corte.

1. INTRODUÇÃO

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 (ASM, 1996). O CGI tem sido produzido em componentes de geometria relativamente simples há mais de trinta anos, no entanto apenas nos últimos anos as fundições têm empregado essa tecnologia em componentes mais complexos (Dawson, 2000).

Atualmente os materiais mais comuns para fabricação de blocos de motores são o ferro fundido cinzento, ferro fundido vermicular (CGI) e ligas de alumínio (Marquard, Helfried e McDonald, 1998). Embora a demanda pelo CGI ainda seja relativamente baixa em comparação aos outros ferros, o crescimento potencial da utilização desse material é considerado alto. Para a primeira década do século XXI a previsão é que haja um aumento de cinquenta por cento da demanda de ferro fundido vermicular (Powell e Levering, 2002).

Segundo Guesser e Guedes (1997) o grande indicador desta tendência é a própria indústria automotiva, que demonstra grande aceitação por este material para a produção dos mais diversos componentes. Dentre esses componentes, pode-se citar coletores de escapamento, discos de freio, cabeçotes de motor e principalmente blocos de motor a óleo diesel, normalmente fabricados em ferro fundido cinzento, Fig. (1).

O ferro fundido vermicular possui boas características de resistência mecânica, resistência a choques térmicos, condutividade térmica, amortecimento, tenacidade e ductilidade. A junção de características tão importantes, tanto do

ferro fundido cinzento quanto do ferro fundido nodular, atribui ao ferro fundido vermicular uma grande importância para aplicação industrial (Marquard, Helfried e MacDonald, 1998; Jaszezak, 2004).

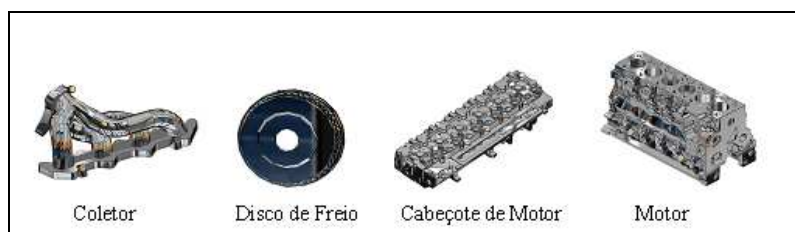


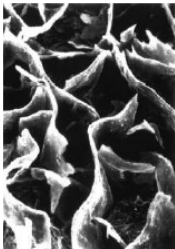
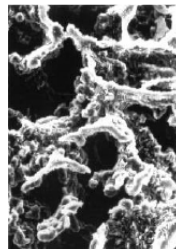
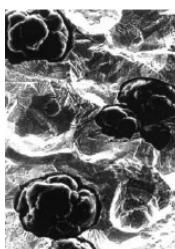
Figura 1. Componentes da indústria automotiva fabricados em ferro fundido cinzento.

A diferença entre os três tipos de ferro fundido – Cinzento, Vermicular e Nodular – consiste na forma da grafita. Ferro cinzento é caracterizado pela grafita na forma lamelar, enquanto no nodular a mesma ocorre em forma de nódulos (Dawson, 2000). As partículas em grafita de CGI, por sua vez, aparecem individualmente em forma de vermes, ou partículas vermiculares. As partículas são alongadas e orientadas aleatoriamente como no ferro cinzento. Entretanto, elas são menores e mais espessas e contêm pontos arredondados. Enquanto as partículas de CGI aparecem em forma de vermes, vistas em duas dimensões, uma análise mais profunda mostra que os vermes individuais são conectados entre si em uma célula eutética (Dawson, 1999; Guessier, Schroeder e Dawson, 2001; Sintercast, 2001).

Esta morfologia de grafita se assemelha a um coral complexo, que juntamente com os cantos arredondados e superfícies irregulares resulta em uma fonte de adesão entre a grafita e a matriz do ferro. A morfologia da grafita compactada inibe o início e o crescimento de trincas, sendo esta característica a fonte de melhoramento das propriedades mecânicas em relação ao ferro cinzento, juntamente com sua ancoragem na matriz metálica (Dawson, 1999; Sintercast, 2001).

As principais propriedades e características que diferenciam o ferro fundido cinzento, ferro fundido vermicular e ferro fundido nodular estão ilustradas na Tab. (1).

Tabela 1. Propriedades da Grafita: Ferro Fundido Cinzento; Ferro Fundido Vermicular; Ferro Fundido Nodular (David, 2001; Queiroz, Boehs e Sant’anna, 1999; Sahm, Abele e Schulz, 1994).

Propriedade	Cinzento	CGI	Nodular
Resistência à Tração (Mpa)	250	450	750
Módulo de Elasticidade (Gpa)	105	145	160
Elongação (%)	0	1,5	5
Condutividade Térmica (W/mK)	48	37	28
Dureza (BHN 10/3000)	179 – 202	217 – 241	217 – 255
Resistência à Fadiga (Mpa)	110	200	250
Formas Ilustradas de Grafita			

Por apresentar maior resistência à tração (75%) e maior tenacidade (30 – 40%) em relação ao ferro fundido cinzento, o ferro fundido vermicular é mais difícil de ser usinado (Dawson, 1995). Na usinagem em alta velocidade (cerca de 1000 m/min), o quadro se agrava ainda mais; somente na região de baixa velocidade de corte (aproximadamente 300 m/min) é possível obter um acabamento similar ao ferro fundido cinzento (Luempic e Henkel, 2000).

Dois pontos críticos para a usinabilidade do CGI são a consistência da microestrutura e o controle da nodularidade. Além disso, a maior dificuldade na usinabilidade em comparação ao ferro fundido cinzento consiste no tratamento com magnésio que recebe o ferro fundido vermicular e na quantidade reduzida de enxofre que possui. A quantidade menor desse elemento justifica a ausência da camada de Sulfeto de Manganês (MnS_2) na usinagem do CGI. Tal camada, cuja espessura é diretamente proporcional ao aumento da velocidade de corte e, desta forma, ao aumento da temperatura de corte, age como uma proteção às ferramentas. Portanto, com o aumento da tecnologia das máquinas-ferramentas, das ferramentas de corte e do desenvolvimento dos materiais a serem usinados, são necessários meios lubri-refrigerantes com um desempenho cada vez maior (Stemmer, 1993).

Os meios lubri-refrigerantes têm como função melhorar o processo de usinagem dos metais, e as melhorias podem ser subdivididas em melhorias de caráter funcional ou de caráter econômico (König e Klocke, 1997; Ferraresi, 2003; Teixeira, 2001). As de caráter funcional são as melhorias que facilitam o processo de usinagem focando no desempenho do processo, como refrigeração da máquina-ferramenta, refrigeração da ferramenta, refrigeração da peça durante a usinagem, redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco, retirada do cavaco da região de corte e melhor acabamento superficial da peça em usinagem, entre outras. Já as melhorias de caráter econômico têm por objetivo uma usinagem mais econômica, como por exemplo menor consumo de energia de corte, menor custo da ferramenta na operação e diminuição da corrosão da peça em usinagem.

A seleção correta de um meio lubri-refrigerante dependerá de uma série de fatores, tais como aspectos econômicos, tipo de máquina-ferramenta, custos devido ao descarte, tipo de sistema de circulação, saúde humana e contaminação, controle, método de aplicação, severidade da operação, tipos de operação, materiais usados e compatibilidade do metal com o fluido, entre outros. Quanto à classificação, os meios lubri-refrigerantes são usualmente classificados em sintéticos (soluções químicas constituídas por sais e isentas de óleo), semi-sintéticos (pequenas quantidades de óleo), óleos emulsionáveis (emulsões, óleo disperso em água) e óleos de corte (óleos básicos aditivados ou não).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar e comparar diferentes meios lubri-refrigerantes utilizados na furação do ferro fundido vermicular, empregado na fabricação de blocos de motores. Os principais aspectos que influenciam o desempenho do meio lubri-refrigerante são apresentados neste artigo. Os parâmetros de avaliação são o desgaste da ferramenta, diâmetro, circularidade, retilidade, cilindridade e rugosidades R_a e R_z .

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no laboratório de Sistema Flexível de Manufatura (FMS), do Instituto Superior Tupy (IST) e da Sociedade Educacional de Santa Catarina (SOCIESC), e a qualidade dos furos foi avaliada na Tupy S.A. Foram realizados ensaios de furação em corpos-de-prova de ferro fundido vermicular (CGI). Durante os ensaios foram avaliadas quais características dos fluidos de corte são importantes para a furação do ferro fundido vermicular. As condições de corte aplicadas foram mantidas constantes para todos os fluidos testados e estão apresentadas na Tab. (2), sendo que a composição química do material é mostrada na Tab. (3).

Tabela 2. Condições de corte aplicadas nos testes de furação do ferro fundido vermicular.


Descrição	Característica
Corpos-de-prova	Ferro fundido vermicular com 236 HB de dureza média Dimensões dos corpos de prova: 400 mm x 250 mm x 40 mm
Ferramenta de corte	Brocas de metal duro, revestimento TiAlN. Broca com 10 mm de diâmetro, 
Condições de corte	Velocidade de corte (V_c) = 110 m/min Profundidade de corte (a_p) = 30 mm Velocidade de avanço (V_f) = 350 mm/min
Parâmetros de análise	Desgaste de flanco (VB_b), (R_a) final e cilindridade.
Refrigeração	Externa

Tabela 3. Composição Química (% peso) do CGI.

Elemento(%)	Si	Mn	P	Sn	Cr	Mg	Cu	Ti	Ni
Placa	2,30	0,34	0,038	0,041	0,044	0,004	0,82	0,021	0,021

Com relação aos testes, foram adotados os seguintes procedimentos:

- 1) Medição de dureza dos corpos de prova;
- 2) Remoção de 2 mm do sobremetal dos corpos de prova a fim de eliminar a zona coquilhada, sendo essa a camada de maior dureza;
- 3) Medição do desgaste de flanco máximo (VB_{max}) a cada 0,15 metros de furação em um microscópio óptico com aumento de 20 vezes e resolução de 0,01 mm;
- 4) Troca da ferramenta quando VB_{max} atingia o desgaste de 0,3 mm;
- 5) Avaliação da rugosidade média (R_a) e (R_z) da superfície com um rugosímetro Mitutoyo SJ.
- 6) Medição do diâmetro com um micrômetro de três pontas Mitutoyo e avaliações de circularidade, retilidade e cilindridade na máquina tridimensional Zeiss Prismo Navigator.

Os meios lubri-refrigerantes utilizados nos testes de furação são apresentados na Tab. (4). Informações sobre o óleo base, aditivos e algumas características químicas estão descritas também nesta tabela. Todos os meios lubri-refrigerantes avaliados são semi-sintéticos.

Tabela 4. Descrição dos fluidos utilizados na furação do ferro fundido vermicular.

Meio Lubri-Refrigerante	Óleo Base	Aditivos	Densidade (g/cm ³)	PH	Concentração
A	Óleo mineral (35%) + éster (10%)	Aditivo EP (10%)	0,978	9,0-9,5	8%
B	Óleo mineral (50%)	Aditivo EP (5%)	1,020	9,0	8%
C	Polímero (20%)	Sem aditivo EP	1,011	9,0-9,4	8%

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de avaliar o meio lubri-refrigerante com melhor desempenho durante a furação do ferro fundido vermicular, alguns parâmetros de saída foram analisados, tais como desgaste da ferramenta, vida da ferramenta, rugosidade dos furos, qualidade dimensional, cilindricidade, retineidade e circularidade.

3.1. Desgaste da Ferramenta

O desgaste de ferramenta foi analisado através de um microscópio óptico, sendo considerado como critério de fim de vida o valor de 0,3 mm para o desgaste de flanco máximo.

O desgaste de flanco foi medido a cada 0,15 m de furação. A Fig. (2) mostra as brocas utilizadas nos testes experimentais para os diferentes meios lubri-refrigerantes testados. Foi possível observar o desgaste de flanco, identificado nas regiões claras das imagens. Também foi possível verificar alguns sinais de oxidação nas brocas, fato este que se deve às altas temperaturas atingidas durante a furação. Embora alguns sinais de adesão tenham sido observados, o principal mecanismo de desgaste observado foi a abrasão, concordando com os resultados obtidos por Andrade (2005). Tanto o desgaste quanto os fenômenos de adesão apresentaram-se mais críticos para a furação a seco.

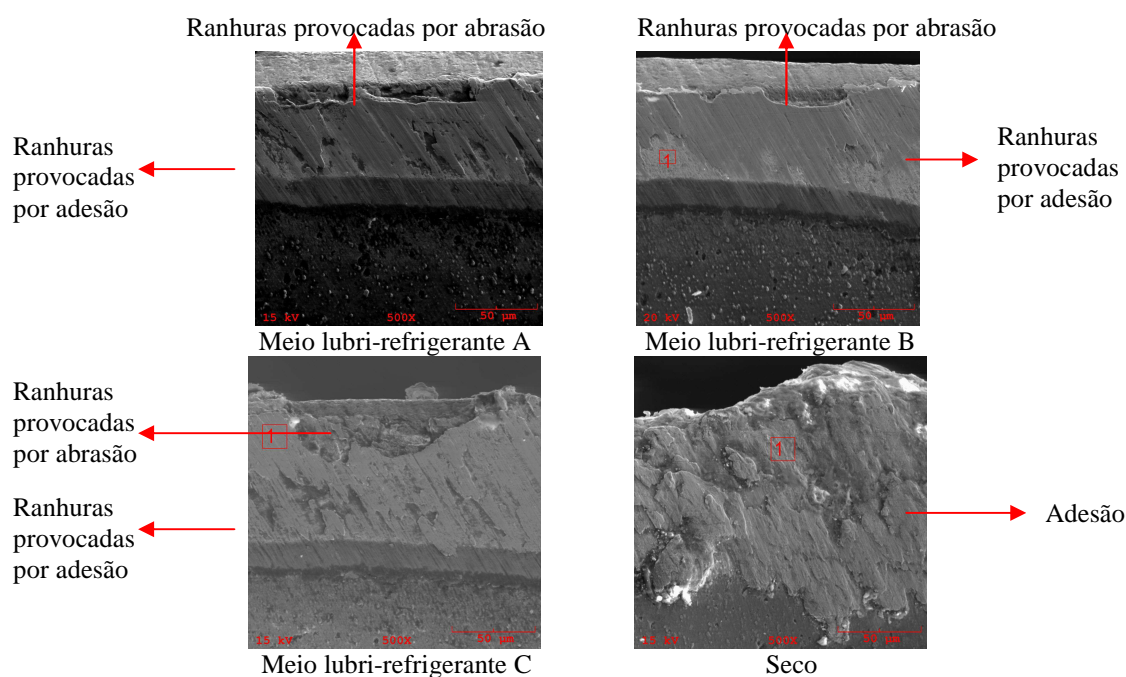


Figura 2. Caracterização dos desgastes das brocas para as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. Velocidade de Corte = 110 m/min. Aumento da imagem igual a 500 x.

Conforme Lin e Ting (1994), o desgaste abrasivo ocorre quando uma superfície dura desliza sobre uma superfície de menor dureza, com a conseqüente produção de ranhuras na superfície de dureza inferior. Esse fenômeno também ocorre em superfícies que apresentam concomitantemente uma dureza menor com partículas duras. Segundo Abele, Sahn e Shulz (2002) o ferro fundido vermicular é aproximadamente de 15% a 33% mais abrasivo que o ferro fundido cinzento. Já o desgaste por adesão é oriundo da ruptura de microcaldeamentos gerados na face da ferramenta, sendo esses caldeamentos advindos da interação das superfícies do cavaco com a face da ferramenta ou em função de forças elevadas (König e Klocke, 1997).

3.2. Ensaio de vida

A curva de vida da ferramenta foi construída em função do número de furos, como apresentado na Fig. (3). Através desta figura pode-se verificar que quando os meios lubri-refrigerantes são usados, observa-se um aumento na produtividade, ou seja, uma maior quantidade de furos pode ser feita, e conseqüentemente há um aumento na vida da ferramenta.

Quando a evolução do desgaste é comparada para os diferentes meios lubri-refrigerantes estudados, verifica-se que o desgaste quando se usou o meio lubri-refrigerante A foi sempre menor que o desgaste para os outros meios lubri-refrigerantes, seguido pelo meio lubri-refrigerante B. As ferramentas usadas durante a furação com o meio lubri-refrigerante C apresentaram maior desgaste e praticamente o mesmo comportamento. Também, quando a furação foi realizada na ausência de lubrificantes, altos desgastes foram observados nas brocas.

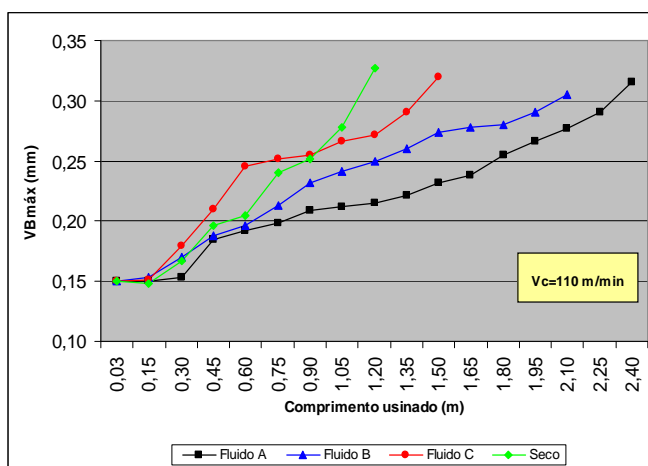


Figura 3. Curva da vida da ferramenta para os diferentes meios lubri-refrigerantes na furação do CGI.

Comparando todos os meios lubri-refrigerantes testados é possível verificar que o meio lubri-refrigerante A permitiu a obtenção dos melhores resultados em termos de vida da ferramenta, com 80 furos produzidos até que o critério de fim de vida fosse alcançado. A Fig. (4) mostra a quantidade de furos realizados para cada meio lubri-refrigerante estudado.

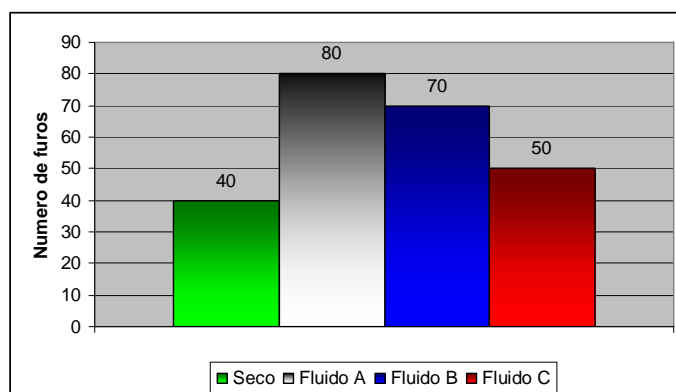


Figura 4. Comparação da produtividade dos diferentes meios lubri-refrigerantes estudados.

A Tab. (5) mostra que a produtividade aumenta quando se usa o meio lubri-refrigerante A. A produtividade aumentou 50% em comparação com a furação a seco (sem meio lubri-refrigerante).

Segundo ASM (1991) e Aronson (1994), os meios lubri-refrigerantes emulsionáveis, como é o caso dos meios A e B, apresentam um moderado poder lubrificante em virtude de sua formulação, ou seja, com base de óleo mineral. Outro

fator relevante que propiciou o melhor desempenho das brocas foi o aditivo EP que também está presente na formulação dos meios lubri-refrigerantes A e B, como se observa adiante. Já uma análise com a referência, no caso a condição a seco, os meios lubri-refrigerantes obtiveram vantagens significativas, tal fato também foi observado por Sales (1999) onde verifica-se o melhor rendimento da furação com emulsão em relação à furação a seco.

Tabela 5. Aumento da produtividade com o uso do meio lubri-refrigerante A em relação aos outros meios lubri-refrigerantes testados.

	Fluido de Corte B	Fluido de Corte C	Furação a seco
Fluido de Corte A	12,5%	37,5	50%

3.3. Diâmetro

A Fig.(5) apresenta o gráfico das médias dos diâmetros nas condições de início e final de vida das brocas para usinagem com cada meio lubri-refrigerante e a seco.

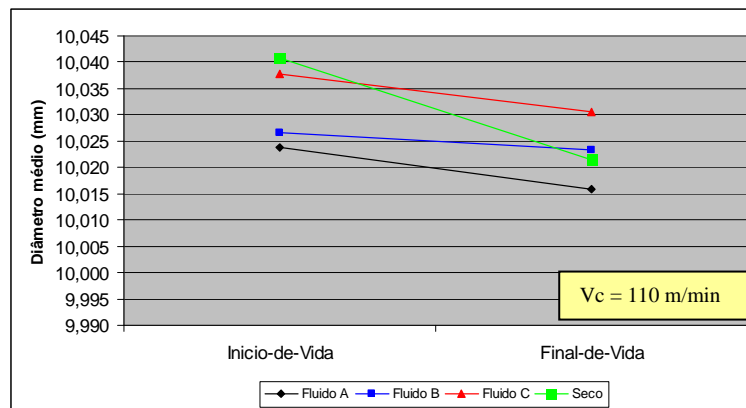


Figura 5. Diâmetro médio no início e fim de vida das condições utilizadas no experimento, $v_c = 110$ m/min.

Observou-se uma diminuição do diâmetro do início ao final do furo para as condições de usinagem a seco e com os meios lubri-refrigerantes A, B e C. Isso pode ocorrer devido ao desgaste progressivo da broca ao longo de sua vida (Teixeira, 2001; Wang, 1997). Andrade (2005) comprovou tal fato em seu experimento, relatando que o diâmetro do furo geralmente reduz-se proporcionalmente ao desgaste da broca em função da abrasividade do ferro fundido vermicular. Também foi observada por Castillo (2005) uma tendência de leve redução na dimensão do diâmetro dos furos na usinagem de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos.

3.4. Circularidade

A circularidade foi medida em três profundidades, 3 mm, 14 mm e 26 mm. A Fig. (6) apresenta os resultados obtidos no início de vida da broca e mostra semelhanças entre as condições utilizadas, com valores de circularidade entre 0,010 e 0,012 mm.

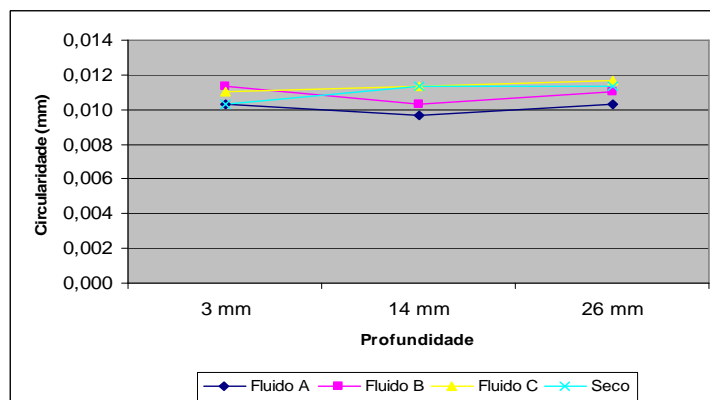


Figura 6. Circularidade média obtida no início de vida das condições utilizadas no experimento, $v_c = 110$ m/min.

Já na Fig. (7), que mostra os resultados de circularidade no final de vida da broca, pode-se inferir que houve variações nos valores de circularidade, sendo que para os meios lubri-refrigerante A e B os valores resultantes estão entre 0,011 e 0,013 mm e, nas condições a seco e com o meio lubri-refrigerante C, os valores situam-se entre 0,012 e 0,014 mm.

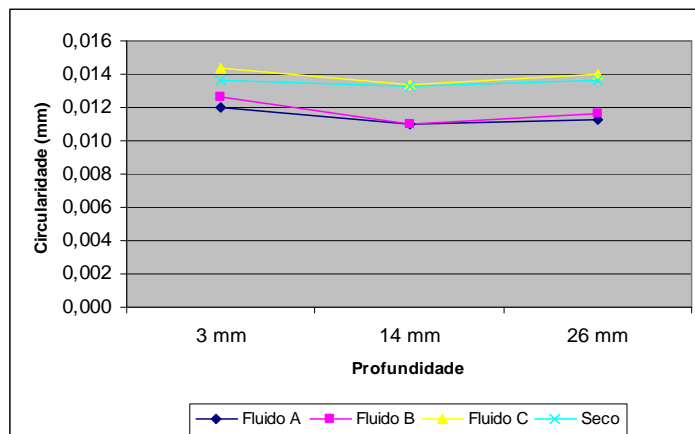


Figura 7. Circularidade média no fim de vida das condições utilizadas no experimento, $v_c = 110$ m/min.

Os resultados observados estão associados ao desgaste da ferramenta, que é o maior responsável pela dispersão nos valores de circularidade do furo. Em geral, brocas em início de vida apresentam melhores resultados de circularidade se comparados aos em final de vida, uma vez que brocas novas apresentam maior estabilidade no corte (Andrade, 2005; El-Khabeery M. *et al*, 1990; Wick, 1988).

3.5. Retilidade

O gráfico Boxplot, mostrado na Fig. (8), confirma que os melhores resultados de retilidade foram alcançados com emprego dos meios lubri-refrigerantes A e B, com a média de retilidade situando-se em torno de 0,004 mm e a dispersão dos valores entre 0,004 e 0,005 mm. Já o meio lubri-refrigerante C apresentou resultados intermediários, com média de 0,005 e dispersão entre 0,005 e 0,006 mm. A condição a seco, por sua vez, com uma média de 0,005 mm, acarretou a maior dispersão de resultados de retilidade, com valores entre 0,003 e 0,007 mm.

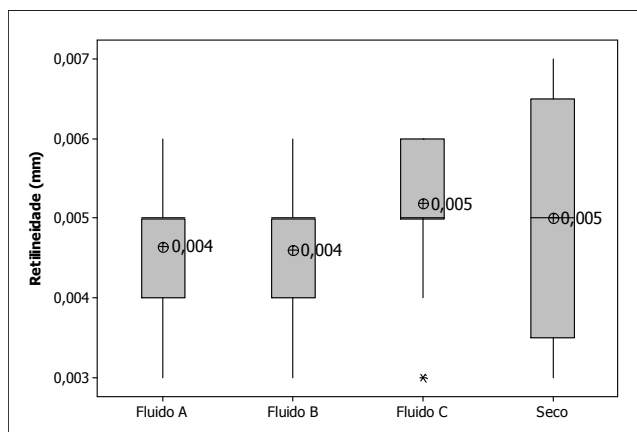


Figura 8. Gráfico Boxplot de retilidade entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. $v_c = 110$ m/min.

O erro de retilidade é proveniente do desgaste progressivo da broca ao longo de sua vida, além de oscilações e instabilidade da ferramenta no início do furo (Wang, 1997). Assim, concluiu-se que, com menores índices de atrito e de aquecimento da peça, a maior capacidade de lubrificação dos meios A e B conduziu a melhores resultados de retilidade.

Conforme Andrade (2005), quando na indústria a retilidade representa fator de rejeição do produto ou no processamento, geralmente se aplicam operações posteriores de usinagem de acabamento. Por isso, os valores atingidos neste estudo podem ser desprezados. Entretanto, se os furos possuem boa qualidade, podem ser utilizados como furos-guias para próximas operações.

3.6. Cilindricidade

Sendo o erro de cilindridade o resultado da sobreposição dos erros de circularidade e de retilidade, é compreensível que os meios lubri-refrigerantes A e B tenham apresentado resultados melhores em relação às condições de usinagem com o meio lubri-refrigerante C e a seco. A melhor capacidade de lubrificação dos meios lubri-refrigerante A e B, que permitiu melhores resultados de circularidade e de retilidade, reflete-se nos resultados de cilindridade obtidos.

Através do gráfico Boxplot, apresentado na Fig. (9), pode-se confirmar o melhor desempenho dos meios lubri-refrigerantes A e B com a média de 0,012 mm e a dispersão de valores entre 0,011 e 0,013 mm, quando comparados às outras condições utilizadas nesse experimento: meio lubri-refrigerante C, média de 0,012 mm com valores entre 0,011 e 0,014 mm; e a seco, com a média de 0,013 mm e dispersão de valores entre 0,011 e 0,015 mm.

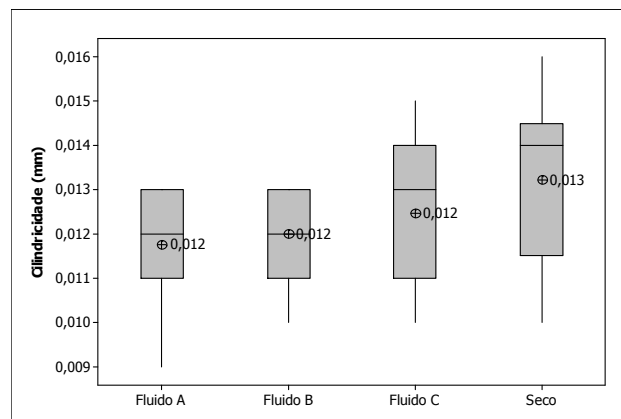


Figura 9. Gráfico Boxplot de Cilindridade entre as condições utilizadas para o experimento: meios lubri-refrigerantes A, B, C e Seco. $v_c = 110$ m/min.

Os resultados de cilindridade obtidos indicam o desempenho de cada tipo de meio lubri-refrigerante. O erro de cilindridade está associado às forças de corte, que causam deformação e aquecimento da peça durante o processo de usinagem, e também aos altos esforços gerados pela remoção dos cavacos. Os meios lubri-refrigerantes A e B, que apresentaram melhores propriedades de lubrificação e conseqüentemente menor atrito da ferramenta com a peça, acarretaram menores erros de cilindridade. O menor atrito, por sua vez, está associado diretamente ao menor aquecimento da peça durante a usinagem, gerando, dessa forma, redução dos desgastes das ferramentas empregadas.

Segundo Coldwell (2004), os altos esforços de usinagem em furação estão associados aos altos valores de cilindridade, provenientes dos problemas da evacuação de cavacos. Dessa forma, presume-se que os maiores valores de cilindridade obtidos na condição a seco estejam relacionados a esse fenômeno. Em contrapartida, os meios lubri-refrigerantes auxiliaram na obtenção dos melhores valores de cilindridade, pois conforme Aronson (1994) e Yushiro (2007) eles contribuem para uma melhor qualidade dos furos usinados, por facilitarem a remoção dos cavacos.

3.7. Rugosidade dos Furos

Conforme Haan *et al* (1997) o emprego dos meios lubri-refrigerantes é significativo na qualidade de acabamento da superfície do furo, pois favorece a formação do cavaco, auxilia no arraste do cavaco, diminui o calor gerado pelo atrito, reduz o desgaste da ferramenta e do consumo de energia e proporciona o fornecimento de refrigeração que reduz o calor, minimizando assim as alterações dimensionais nas peças.

A Fig. (10) ilustra que as dispersões dos resultados de rugosidades R_z para a superfície são maiores no final de vida da ferramenta do que no início de vida, principalmente na usinagem a seco. Isso evidencia o fato de que a perda do revestimento e/ou uma simples deterioração do gume da ferramenta está diretamente relacionada aos resultados de texturas das superfícies, devido ao maior coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta. Portanto, conforme já comentado anteriormente, os meios lubri-refrigerantes são cruciais para a conservação do revestimento da ferramenta e a qualidade da superfície usinada.

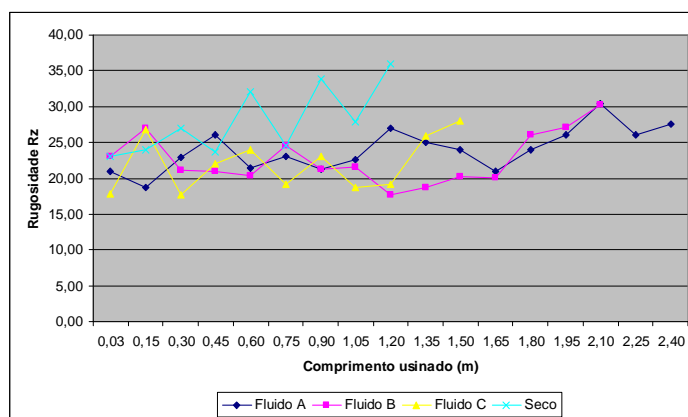


Figura 10. Rugosidade R_z média das condições utilizadas no experimento. $v_c = 110$ m/min.

4. CONCLUSÕES

A utilização do meio lubri-refrigerante na furação do CGI resulta num aumento de produtividade e redução de custos com ferramentas, pois a quantidade de furos realizados com uma mesma broca aumenta no mínimo em 50% quando comparado com a furação a seco. Verifica-se também que o principal mecanismo de desgaste na furação do CGI é a abrasão, porém alguns sinais de adesão do material usinado foram observados nas ferramentas.

Avaliando-se os resultados anteriormente descritos, pode-se selecionar o meio lubri-refrigerante mais adequado à furação do ferro fundido vermicular. Os meios lubri-refrigerantes avaliados diferiam um do outro em termos do óleo base e aditivação EP. De acordo com os resultados experimentais o fluido de corte mais apropriado e com melhor desempenho foi o meio lubri-refrigerante A. Este fluido é uma mistura de óleo mineral (35%) e éster (10%) com aditivo EP (5%). Maior quantidade de furos, menores desgastes e melhor qualidade superficial foram obtidos com este meio lubri-refrigerante. Quanto se retira o aditivo EP e muda-se o óleo base, como por exemplo, de óleo mineral por polímero, um pior desempenho é observado.

Considerando que o meio lubri-refrigerante B tem composição semelhante, onde há apenas um acréscimo da quantidade de óleo mineral (45%) e aditivo EP (15%), pode-se concluir que para o processo estudado tanto a lubrificação (obtida através do óleo) e a refrigeração (obtida através da água) são muito importantes. Assim, aumentando-se a quantidade de óleo e consequentemente a lubrificação não há melhorias no desempenho do meio lubri-refrigerante, pois mesmo que o atrito seja diminuído um pouco, ainda assim há aquecimento, geração de calor, que precisa se dissipado pelo meio lubri-refrigerante.

Desta forma, para uma melhor escolha do meio lubri-refrigerante para furação do CGI devem ser observadas as características lubrificantes (advindas do tipo de óleo base usado), refrigeração e a presença de aditivos EP que ajuda na redução do atrito devido à formação de um filme.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Tupy S.A., a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Sociedade Educacional de Santa Catarina (SOCIESC) apoio na realização do projeto. Estas colaborações foram de fundamental importância para a realização do trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Bordalo, S.N., Ferziger, J.H. and Kline, S.J., 1989, "The Development of Zonal Models for Turbulence", Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Vol. 1, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 41-44.
- Andrade, C. L. F., 2005, "Avaliação do Comportamento de Revestimentos em Brocas de Canal Reto na Furação de Ferro Fundido Vermicular", Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 134f.
- Aronson, R.B., 1994, "Machine Tool 101: Part 6", Machine Servers, Manufacturing Engineering, 6/94, pp. 47-52.
- ASM, 1996, "Speciality Handbook: cast irons", Estados Unidos: ASM International, pp. 33-267.
- ASM, 1991, "International Handbook Committee", Metal Handbook. 6ª edição, Cap. 27, 5/91, pp. 14-20.
- Castillo, W.J.G., 2005, "Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-duro com Canais Retos", Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 128f.
- El-Khabeery, M. et. al., 1990, "Some observations of surface integrity of deep drilling holes", Elsevier, Cairo, Egypt, v. 142, pp. 331-349.
- Dawson, S., 1995, "Propriedades Operacionais do Ferro Fundido Vermicular (CGI): Feedback de Programas de Testes em Andamento", Publicação Sintercast, Tradução para Português.
- Dawson, S., 2000, "Compacted Graphite Iron Offers a Viable Design Alternative. Engineer Casting Solutions".

- Dawson, S., Guesser, W., Schroeder, T., 2001, "Production Experience With Compacted Graphite Iron Automotive Components", American foundry society, pp. 1-11.
- David, E., 2001, "Developing In-the-Mold Treatment for CGI", *Tecnology in Progress*, 3/2001.
- Ferraresi, D., 2003, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", São Paulo, Editora Edgard Blucher, pp. 512.
- Guesser, L.W., Guedes, L.C., 1997, "Desenvolvimentos Recentes em Ferros Fundidos Aplicados à Indústria Automobilística", In: IX Simpósio de Engenharia Automotiva, AEA, São Paulo.
- Haan, D.M. et al., 1997, "An experimental study of cutting fluid effects in drilling", Elsevier, *Journal of materials processing technology*, v. 71, pp. 304-313.
- Jaszczak, J.A., 2005, Michigan Technological University, Department of Physics at the A. E. Seama Mineral Museum. The graphite page. Availableat: <http://www.phy.mtu.edu>. Access nov. 11.
- König, W., Klocke, F., 1997, "Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren". 5 ed. Berlin: Springer, 471p.
- Laempic, M., Henkel, H., 2000, "Características do Motor BMW V8 Diesel feito em Ferro Fundido Vermicular", *Fundação e Serviços*, São Paulo, 12/2000, pp. 42-49.
- Lin, S.C., Ting, C.J., 1994, "Tool wear monitoring indrilling using force signals", Elsevier, *Wear*, v. 180, pp.53-60.
- Marquard, R.E., Helfried, S., McDonald, M., 1998, "Crank' it up: New materials create new possibilities", *Engine technology international*, v. 2, pp.58-60.
- Powell, W., Levering, P., 2002, "CGI: The Little Cast Iron That Could Engineered Casting Solutions".
- Queiroz, J. L. L., Boehs, L., Sant'anna, F., 1999, "Proposta para aprimorar o manejo dos fluidos de corte", *Revista Máquinas e Metais*, 4/ 1999, pp. 250-255.
- Stemmer, C. E., 1993, "Ferramentas de corte I", 3ª ed., Florianópolis: Editora da UFSC.
- Sales, W.F., 1999, "Determinação das Características Refrigerantes e Lubrificantes de Fluidos de Corte", Tese de Doutorado em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 169f.
- Sahm, A., Abele, E., Schulz, H., 1994, "State of the art in CGI machining", Institute of Production Management, Technology and Machine Tools, University of Technology, Darmstadt, Germany.
- Teixeira, C.R., 2001, "Redução e Eliminação de Fluidos de Corte nos Processos de Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida", Tese de Doutorado em Eng. Mecânica, UFSC.
- Wang, Z.M. et al., 1997, "Advances in precision machining of small deep holes", *Journal of Materials and Processing Technology*, v. 68, pp. 257-261.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

ANALYSIS OF DRILLING COMPACTED GRAPHITE IRON WITH COATED CARBIDE HELICAL DRILLS USING DIFFERENT CUTTING FLUIDS

Júlio Celso dos Santos Bossardi, julio@tupy.com.br¹

Cássio Luiz Francisco de Andrade, cassio@tupy.com.br¹

Rolf Bertrand Schroeter, rolf@emc.ufsc.br²

Salete Martins Alves, salete.martins@sociesc.com.br³

¹Tupy Fundições S.A., Rua Albano Schmidt, 3400, Joinville/SC, Brasil

²Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), UFSC, Caixa Postal-476 EMC, 88010-970, Florianópolis/SC, Brasil

³Sociedade Educacional de Santa Catarina (SOCIESC), Rua Albano Schmidt, 3333, 89206-001, Joinville/SC, Brasil

Abstract: *The thermal efficiency increase associated to the reduction of the engine weight, characterizes the engine block diesel, in whose manufacture the use of Compacted Graphite Iron is increasing. The CGI utilization makes possible the construction of vehicles with more efficient engines, in terms of decreasing both fuel consumption and pollutants emission, as carbon monoxide and hydro-carbons, once compared with Gray Cast Iron. However, despite of being extremely advantageous regarding the functionality of its final product, CGI is a difficult material by means of machining to be used in blocks. Considering that drilling is one of the most used machining processes, including CGI machining, helical drills behavior with different cutting fluid utilization will be observed in this study, beholding the fluid influence over the tool wear. This research focused on the behavior of helical drills for three different cutting fluid managed, in what was used the cutting speed of 110 m/min under one feed rate. It was evaluated wear, diameter, roughness and holes form errors for the holes obtained. EDS analysis of chemical elements present on drills different areas were also realized, in order to understand the wearing mechanisms for each tool.*

Keywords: *Compacted Graphite Iron (CGI), helical drill, cutting fluids.*