



INVESTIGAÇÃO DO TORNEAMENTO DE FERRO FUNDIDO COM ALTA VELOCIDADE DE CORTE USANDO MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO.

Aldo Braghini Jr.¹; Leonardo R. Silva²; Alexandre A. Bezerra³; Reginaldo T. Coelho⁴

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica

(1) aldobj@sc.usp.br, (2) lrilva@sc.usp.br, (3) aab@sc.usp.br, (4) rcoelho@sc.usp.br, - São Carlos, SP, Brasil.

Resumo. *Os benefícios proporcionados pelos fluidos de corte à usinagem dos metais são evidentes. Entretanto, devido à sua formulação estes podem prejudicar a saúde de operadores de máquina devido ao longo tempo de exposição, além de poluírem o meio ambiente, caso não sejam devidamente tratados. Na tentativa de criar alternativas a estes fluidos tem-se estudado com mais afinco a usinagem completamente sem lubrificação/refrigeração (que possui suas vantagens e desvantagens) e a técnica de Mínima Quantidade de Fluido (MQF), cujo grande atrativo é a redução do volume de fluido de corte. Neste trabalho procura-se verificar a influência desta técnica no acabamento superficial da peça e na vida de ferramentas de metal duro, cerâmica e PCBN durante a operação de faceamento de ferro fundido cinzento com alta velocidade de corte. Várias condições de lubrificação/refrigeração foram usadas. Os resultados demonstram que a única ferramenta que obteve uma vida significativa maior com MQF foi a de PCBN. Quanto à rugosidade não foram detectadas melhorias significativas.*

Palavras-chave: Torneamento, MQF, Vida de ferramenta, Rugosidade

1. INTRODUÇÃO

O uso dos fluidos de corte tradicionais é muito difundido na indústria de fabricação metal-mecânica. Isto se deve aos benefícios proporcionados pelos mesmos, tais como: refrigerar a região de corte, lubrificar a mesma em baixas velocidades de corte e altas tensões, melhorar a vida da ferramenta, melhorar o acabamento superficial, a precisão dimensional da peça, auxiliar na quebra do cavaco, facilitar o transporte do cavaco, deixar uma camada protetora sobre a superfície usinada e proteger a máquina-ferramenta contra ataques químicos (Klocke *et al.*, 1997; Narutaki *et al.*, 1997; Kustas *et al.*, 1997; Trent, 1984; (Kalpakjian, 1991).

Apesar de seus aspectos positivos, os fluidos de corte podem provocar problemas de saúde nos operadores de máquinas-ferramenta e causar danos ao meio ambiente. Eles provocam doenças de pele, irritações oculares, doenças respiratórias e até câncer, como consequência de algum tipo de contato prolongado com os mesmos (Sahm *et al.*, 1996; EL Baradie, 1996a; Teixeira *et al.*, 2000). Deste modo, as empresas são obrigadas a enfrentar leis ambientais mais rigorosas que legislam sobre a compra, manutenção e principalmente o

descarte de resíduos dos fluidos; sendo também obrigadas a ter mais cuidado com a saúde e segurança dos funcionários (Aronson, 1995; Klocke *et al.*, 1997; Narutaki *et al.*, 1997; Heisel *et al.*, 1998a). Esta nova realidade pode resultar em aumento de custos para as empresas.

A usinagem a seco tem despertado a atenção de pesquisadores e técnicos da área de usinagem como alternativa aos fluidos tradicionais. Analisando-se tecnicamente o corte a seco, ele só é viável quando o tempo de usinagem, o tempo de vida da ferramenta e qualidade superficial da peça forem pelo menos semelhantes às conseguidas com a usinagem usando-se fluido de corte tradicionais. Do ponto de vista econômico o corte a seco será adotado como uma prática comum quando os custos de produção de uma peça, sem os benefícios dos fluidos de corte, forem equivalentes ao custo de compra, manutenção e descarte dos fluidos segundo as normas ambientais (Dunlap, 1997).

Entre os aspectos positivos do corte a seco estão a diminuição do choque térmico, diminuição das trincas e dos lascamentos principalmente no corte interrompido (Klocke *et al.*, 1997). O cavaco obtido já está seco pronto para ser vendido ou reciclado, ao contrário do cavaco molhado, que requer processamento e filtração (Klocke *et al.*, 1998).

Como os benefícios dos fluidos de corte não estão disponíveis no corte a seco, existe mais fricção e adesão entre a ferramenta e a peça, principalmente na usinagem de alumínio e aços dúcteis. Ferramenta e peça são submetidas a uma carga térmica maior, resultando em um maior nível de desgaste. A temperatura de corte mais elevada no corte a seco pode afetar a precisão de forma e dimensional e a microestrutura da subsuperfície da peça usinada (Klocke *et al.*, 1997a; Dörr, 1999; Klocke *et al.*, 1998; Novaski *et al.*, 1999b). A máquina-ferramenta também pode dilatar-se com a variação da temperatura, pelo acúmulo de cavaco quente. Estas dilatações são fatores de desvios de medida da peça, os quais podem atingir níveis intoleráveis (Sahm *et al.*, 1996; Heisel *et al.*, 1998a; Dörr, 1999).

Do ponto de vista da ferramenta de corte as novas exigências estão basicamente relacionadas com o aumento da temperatura de corte na usinagem a seco, sendo necessário observar duas características essenciais dos materiais de corte: a dureza a quente e a tenacidade. Os revestimentos de ferramentas também desempenham um papel importante. Segundo Kalhöfer (1997) e Schulz (1999) as modificações da geometria da ferramenta e a aplicação de revestimentos resistente a altas temperaturas, tal como TiAlN podem reduzir os efeitos de temperatura sobre a ferramenta, melhorando a conveniência das ferramentas para a usinagem a seco.

As limitações das operações a seco podem ser diminuídas através da técnica Mínima Quantidade de Fluido (MQF) que age com base no princípio de utilização total do óleo de corte, sem resíduos. De maneira geral o fluxo de lubrificante varia de 10 até no máximo 100ml/h a uma pressão de 4 – 6 Kgf/cm² (Klocke *et al.*, 1997; Young *et al.*, 1997; Schulz, 1999; Dörr, 1999; Diniz, 1999). Dependendo da aplicação o fluxo de fluido pode variar de 10 a 1000 ml/h segundo SAHM *et al.* (1996). E a aplicação pode ser feita por meio de névoa (fluido mais ar comprimido) ou um pequeno fluxo de óleo através da ferramenta (Aronson, 1995).

Nesta tecnologia a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração (mesmo que pequena) pelo ar comprimido. Esta pequena quantidade de fluido é suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em materiais com tais características. De sua comparação com a refrigeração convencional resultam numerosas vantagens: baixo consumo de lubrificantes e eliminação de um sistema de circulação entre outras (Klocke *et al.*, 1997; Klocke *et al.* 1998; Heisel *et al.* 1998; Dörr, 1999).

Klocke *et al.* (1997) constataram os benefícios da técnica MQF na formação da aresta postiça de corte (APC). Observou-se uma redução substancial na formação da APC. Aumentando o volume de fluxo de 10ml/h para 40ml/h não foi verificado nenhum benefício, demonstrando que pequenos volumes de fluxo são suficientes para suprimir a aresta postiça

de corte completamente. Wakabayashi *et al.* (1998) demonstram resultados semelhantes no torneamento do aço S45C utilizando diversas quantidades de lubrificante a uma pressão de 6 kgf/cm². A aresta postiça de corte foi totalmente eliminada com a técnica MQF comparado com o corte a seco e com fluido em abundância (emulsão 5%). Obteve-se melhor rugosidade superficial com a técnica $R_a \cong 0.4\mu\text{m}$ contra $R_a \cong 0.8\mu\text{m}$ na condição a seco e com fluido em abundância. O desgaste de flanco variou conforme a quantidade de lubrificante, sendo que o maior volume de lubrificante proporcionou menor nível de desgaste.

Schulz (1999) afirma que no processo de furação de aço, a técnica de quantidade mínima de fluido também forneceu excelentes vantagens. O efeito lubrificante reduz a força de atrito e deste modo prolonga a vida da ferramenta consideravelmente.

Diniz (1999) revelou resultados significativos na viabilidade da utilização da técnica MQF no processo de furação da liga alumínio-silício (7% Si) comparado com um fluido de corte emulsionável, no que refere-se a qualidade do furo, desgaste de flanco, potência consumida e força de corte utilizando brocas de metal duro e com cobertura de diamante.

Este trabalho procura verificar a influência da lubrificação/refrigeração proporcionada pela técnica MQF do desgaste de ferramentas de metal duro, cerâmica e PCBN na operação de faceamento de ferro fundido cinzento com alta velocidade de corte.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Equipamentos e materiais

A usinagem foi realizada em um torno Index CNC, modelo GU600, com uma potência do motor do eixo árvore de 22 KW.

O desgaste das ferramentas foi medido através de um microscópio E. Leitz Wetzlar, com sistema de medição na lente ocular do microscópio, com resolução de 2.78 μm .

Um rugosímetro portátil Taylor-Hobson, modelo Surtronic 3P, foi usado na avaliação do acabamento superficial das peças usinas. Os valores de rugosidade R_a medidos são com “cut off” de 0,8 mm.

Para promover a aspensão do óleo na região de corte foi usado o equipamento de Mínima Quantidade de Fluido (Accu-Lube). O qual permitia a regulagem da vazão de ar comprimido e óleo de maneiras separadas.

A vazão do ar comprimido foi monitorada com auxílio de um rotâmetro modelo K12V com campo de medição entre 6 e 60 m³/h.

As peças torneadas são volantes de ferro fundido cinzento (GG25) usados em motores 1000cm³ de automóveis de passeio.

As ferramentas escolhidas para a experimentação são descritas na tabela 1. As quatro primeiras ferramentas da tabela 1 não possuem quebra cavacos. A última ferramenta possui quebra cavacos para uma condição de usinagem média. O mesmo suporte foi usado para todos os insertos, tendo um ângulo de posição de 45° (CSSNL 2525M 12-IC).

Tabela 1 – Descrição das ferramentas

Código dos insertos	Descrição dos insertos	Nomeclatura dos insertos neste artigo
SNGN 12 04 08 T01020 7050	PCBN	PCBN
SNGA 12 04 08 T01020 650	Cerâmica mista à base de óxido de alumínio	C _{OA}
SNGN 12 04 08 T01020 670	Cerâmica a base de óxido de alumínio reforçada com “whisker” de carboneto de silício	C ^{“whisker”}
SNMA 12 04 08 KR 3015	Metal duro com cobertura de nitreto de titânio (sem quebra cavacos)	MD _{s/qc}
SNMG 12 04 08 KM 3015	Metal duro com cobertura de nitreto de titânio (com quebra cavacos)	MD _{c/qc}

2.2 Montagem do banco de ensaios

A fixação da peça no torno foi realizada através de três furos roscados equidistantes 120° entre si, conforme mostra a Fig. 1a. Na Fig. 1b nota-se como o bico aspersor foi posicionado próximo a região de corte.

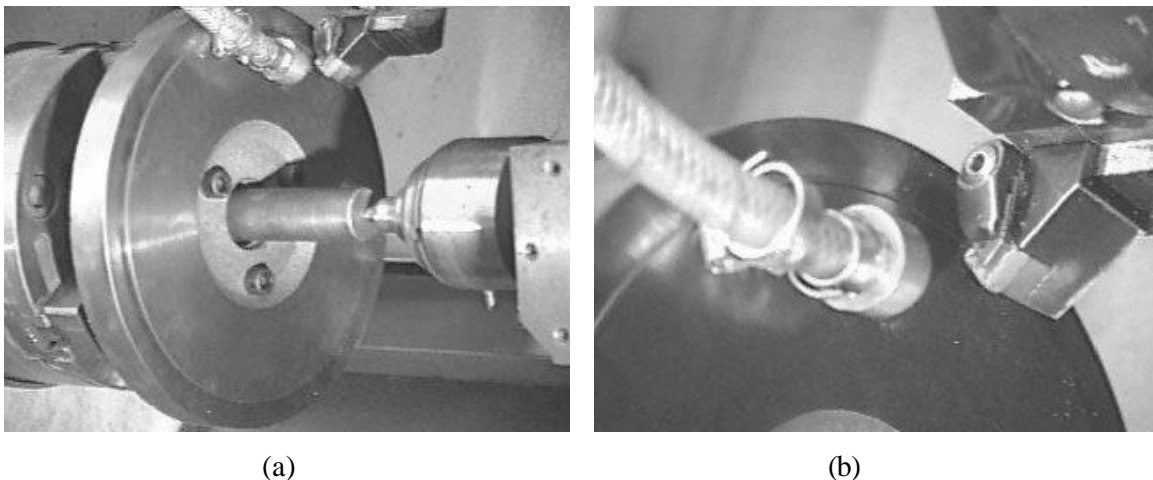


Figura 1 – Banco de ensaio utilizado na experimentação.

O sistema MQF é composto de: compressor, regulador de pressão, rotâmetro, dosador e bico aspersor. Ar e óleo são conduzidos separadamente até o bico, podendo ser ajustados independentemente.

Na Fig. 2 encontra-se o bico aspersor desenvolvido e utilizado na experimentação em corte. O modelo permite um ajuste fino da velocidade do ar para a formação de névoa com diferentes valores de vazão.

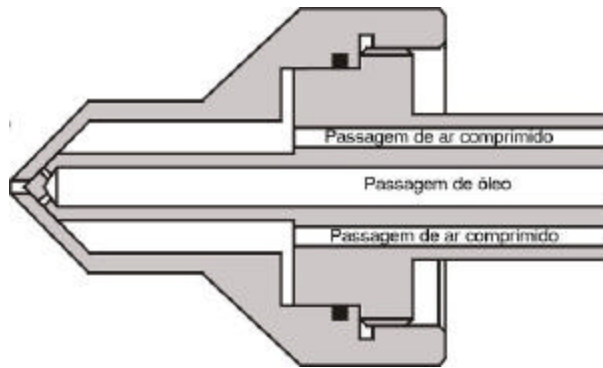


Figura 2 – Bico aspersor desenvolvido para a experimentação

2.3 Planejamento dos experimentos

A velocidade de corte foi definida como sendo a máxima possível levando-se em consideração dois fatores: rotação máxima do torno e o menor diâmetro de faceamento. Chegou-se a 1700 m/min. No caso das ferramentas de metal duro utilizou-se duas outras velocidades de corte (1350 e 1000 m/min) para verificar a influência da velocidade de corte neste material de ferramenta. As velocidades de corte foram mantidas constantes através da variação da rotação do eixo árvore. A profundidade de usinagem adotada foi de 0.5 mm e o avanço de 0.1 mm/volta. A tabela 2 mostra os parâmetros de corte adotados.

A experimentação foi dividida em duas partes: na primeira foi realizada a usinagem a seco usando-se todas as ferramentas; a segunda foi utilizada a técnica MQF na usinagem com as três ferramentas que tiveram melhor desempenho no corte sem refrigeração. Nesta segunda parte usou-se duas vazões de óleo (10 e 20 ml/h) e duas vazões de ar comprimido (9 e 18 m³/h). O óleo usado (LB 1000) foi fornecido pelo mesmo fabricante do equipamento MQF. Tal óleo possuía a indicação para materiais ferrosos.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados na experimentação

	Ferramentas	Parâmetros de Corte	Condições de Lubrificação / Refrigeração
1ª Parte da Experimentação	MD _{s/qc} MD _{c/qc}	$v_c = 1000/1350/1700$ m/min $f = 0.1$ mm/rev $a_p = 0.5$ mm	Seco
	C _{OA} C ^{“whisker”} PCBN	$v_c = 1700$ m/min $f = 0.1$ mm/rev $a_p = 0.5$ mm	
2ª Parte da Experimentação	MD _{c/qc} C _{OA} PCBN	$v_c = 1700$ m/min $f = 0.1$ mm/rev $a_p = 0.5$ mm	MQF $V_{\text{óleo}} = 10 / 20$ ml/h $V_{\text{ar comprimido}} = 9 / 18$ m ³ /h

Nas duas partes dos testes o procedimento experimental consistiu de três passes seguidos, ao final dos quais a ferramenta era retirada para medição do desgaste de flanco e a peça para

medição de rugosidade (em três pontos distintos da peça). Este procedimento foi repetido até o desgaste de flanco na ferramenta atingir valores acima de 0,25 mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através dos resultados da primeira parte da experimentação observou-se que a maior vida foi obtida com a ferramenta C_{OA} e na seqüência decrescente as ferramentas $MD_{c/qc}$, $MD_{s/qc}$, PCBN, $C_{\text{“whisker”}}$ para a velocidade de corte de 1700 m/min. No caso específico das duas ferramentas de metal duro com velocidades de corte de 1000 e 1350 m/min, a ferramenta $MD_{c/qc}$ continuou superior em relação ao outro metal duro $MD_{s/qc}$ e ambas com maior vida nessas velocidades menores que na velocidade de maior de 1700 m/min. Quanto à rugosidade, todas as ferramentas obtiveram resultados semelhantes com alta dispersão (1.5 a 3 μm), com exceção da ferramenta de PCBN que proporcionou uma rugosidade sensivelmente menor (0.5 μm) e com menor dispersão.

Para a segunda parte da experimentação, com 1700 m/min, optou-se por usar a melhor ferramenta cerâmica e o melhor metal duro quanto ao desgaste. O PCBN foi escolhido por apresentar uma rugosidade muito baixa, em relação às outras ferramentas.

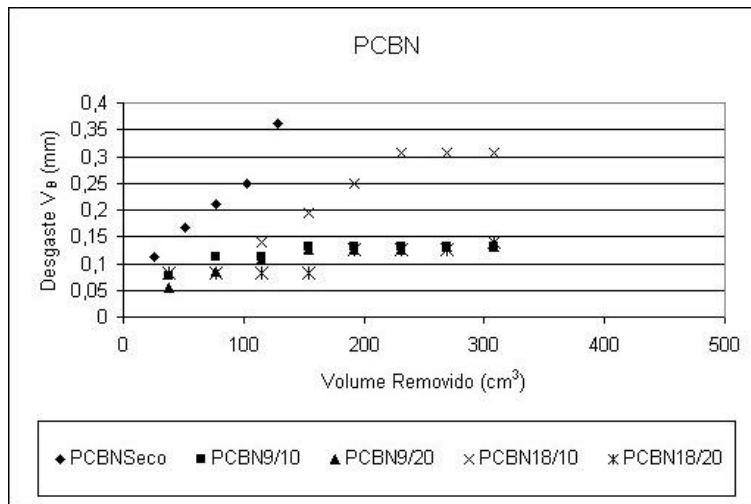
Nas figuras 3a, 3b, 3c pode-se observar a influência da variação da vazão de óleo e de ar comprimido na vida da ferramenta. As legendas dos gráficos abaixo apresentam-se da seguinte forma nome da ferramenta vazão de ar comprimido / vazão de óleo.

A condição a seco produziu um desgaste de flanco crescente e elevado na ferramenta de PCBN, como mostra a Fig. 3a. Observa-se também que ocorreu uma diminuição no desgaste de todas arestas de PCBN sujeitas a alguma condição de lubrificação/refrigeração, sendo menos acentuada na condição PCBN18/10, onde ocorreu uma falha de posicionamento do bico aspersor; tendo como conseqüência um desgaste elevado. O teste não foi repetido devido ao número limitado de peças.

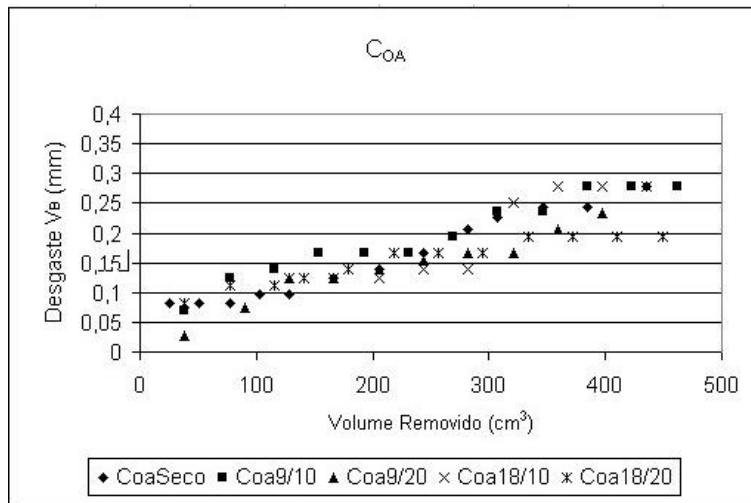
O comportamento do desgaste foi similar em todas as condições de lubrificação/refrigeração para a cerâmica C_{OA} (Fig. 3b). Nota-se que o desgaste para as condições onde usou-se maior volume de óleo foi ligeiramente menor quando comparado com as outras condições, embora os experimentos não tenham sido repetidos.

Para a ferramenta de metal duro (Fig. 3c) o comportamento do desgaste foi semelhante em todas as condições testadas. O desgaste mantém-se abaixo por um certo tempo seguido de uma elevação repentina. Observou-se que esta elevação ocorre após o desgaste das camadas de cobertura quando, o substrato das ferramentas fica exposto.

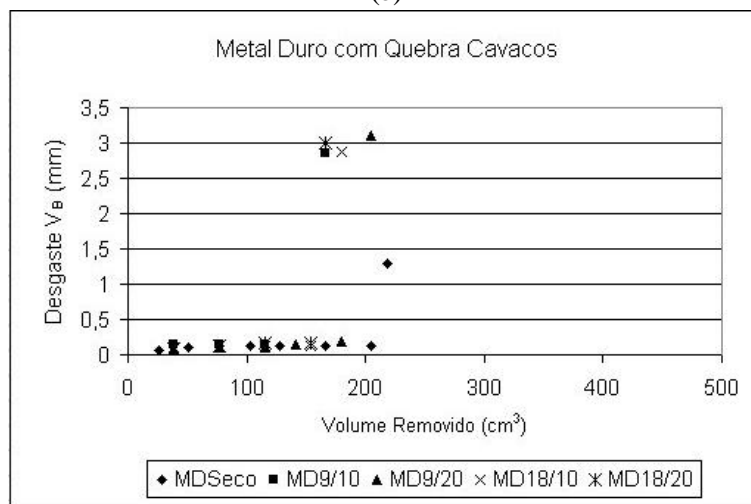
O alto desgaste do PCBN no corte sem refrigeração pode ser atribuído à deterioração provocada pelas reações químicas que ocorrem em alta temperatura, uma vez que ferramenta e peça se aquecem na região de formação de cavacos. Quando usou-se MQF provavelmente a temperatura não atingiu níveis suficientes para que o ferro contido na liga da peça pudesse prejudicar a integridade da ferramenta, através do mecanismo de desgaste químico. No caso das ferramentas cerâmicas, a adição de refrigerantes pode não afetar a temperatura na região de formação de cavacos, devido à característica de isolante térmico próprio das cerâmicas. Para as ferramentas de metal duro, pode-se dizer que somente as coberturas são capazes de suportar as condições de temperatura e abrasão exigidas durante o corte com alta velocidade. Quando as coberturas se desgastam o substrato não resiste muito tempo mais. Essas hipóteses, no entanto, requerem a continuidade das investigações para maior entendimento dos fenômenos ocorridos.



(a)



(b)



(c)

Figura 3 – Vida das ferramentas em função das condições de lubrificação/refrigeração.

A rugosidade apresentou um comportamento parecido para as três ferramentas: uma dispersão moderada dentro de limites de variação. Limites esses característicos para cada ferramenta (PCBN 0.4 a 0.7 μm ; COA 1 a 3 μm e MD_{c/qc} 1.4 a 2.5 μm). Não se observou

nenhuma tendência clara para a rugosidade em função da variação das condições de lubrificação/refrigeração.

4. CONCLUSÕES

Analisando os dados de experimentação deste trabalho pode-se concluir:

- ❑ Para os parâmetros de corte e lubrificação/refrigeração adotados neste trabalho a única ferramenta que obteve uma melhoria de vida significativa foi a de PCBN.
- ❑ A ferramenta de PCBN foi a que apresentou o melhor acabamento superficial, independentemente do sistema de refrigeração/lubrificação.
- ❑ Devido à pequena área de atuação do fluxo de ar/óleo no sistema MQF, o posicionamento do bico aspersor pode afetar significativamente o desgaste das ferramentas.
- ❑ O bico aspersor desenvolvido para essa experimentação apresentou boa capacidade de produção de névoa nos dois valores de vazão de ar.
- ❑ As variações nos valores de vazão de ar e óleo para o sistema MQF não apresentaram influência significativa sobre a rugosidade, dentro dos valores usados nesse trabalho.

Agradecimentos

FAPESP pelo apoio financeiro.

Auto Pira S/A Indústria e Comércio de Peças pelo fornecimento das peças.

ITW – Chemical Products Ltda pelo equipamento de MQF e pelo fluido de corte usado nos ensaios.

Sandvik Coromant pelo fornecimento das ferramentas cerâmicas.

REFERÊNCIAS

- Aronson, R. B. (1995). Why dry machining? *Manufacturing Engineering*, v. 114, n. 1, p. 33 – 36, Jan.
- Diniz, A. E. (1999). Minimal lubrication in the drilling process of aluminum silicon alloy. In: 3rd INTERNATIONAL MACHINING & GRINDING CONFERENCE, 3., Cincinnati, 1999. Proceedings. Cincinnati, SME. v. 1, p. 683 – 697.
- Dörr, J. (1999). New perspectives in dry machining. In: 4^o SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA, 4., Santa Bárbara D'Oeste, Brasil, 1999. Anais. Santa Bárbara D'Oeste, Universidade Metodista de Piracicaba, p. 29 – 39.
- Dunlap, C. (1997). Should you try dry? *Cutting Tool Engineering*, v. 49, n.1, p. 22 – 33, Feb.
- EL Baradie, M. A. (1996a). Cutting fluids: part II - recycling and clean machining. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 56, n. 1-4, p. 798 – 806, Jan.
- Heisel, U.; Lutz, D.; Wassmer, R.; Walter, U. (1998). A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte. *Máquinas e Metais*, n.386, p.22-38, fev.
- Heisel, U.; Lutz, M. (1998a). Pesquisa de fluidos de refrigeração e de lubrificação. *Máquinas e Metais*, n. 388, p. 40 – 49, maio.
- Kalhöfer, E. (1997). Dry machining – Principles and applications. 2^o Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Usinagem com altíssima velocidade de corte e alta precisão. Unimep, July.
- Kalpakjian, S. (1991). *Manufacturing processes for engineering materials*. 2. ed. New York, Addison-Wesley.
- Klocke, F.; Eisenblätter, G. (1997). Dry Cutting. *CIRP Annals*, v. 46, n. 2, p. 519 – 526.

- Klocke, F.; Eisenblätter, G. (1997a). Machinability investigation of the drilling process using minimal cooling lubrication techniques. *Production Engineering*, v. 4, n.1, p. 19 - 24.
- Klocke, F.; Schulz, A.; Gerschwiler, K.; Rehse, M. (1998). Clean manufacturing technologies – the competitive edge of tomorrow? *The International Journal for Manufacturing Science & Production*, v. 1, n. 2, p. 77 – 86.
- Kustas, F. M.; Fehrenbacher, L. L.; Komanduri, R. (1997). Nanocoatings on cutting tools for dry machining. *CIRP Annals*, v. 46, n. 1, p. 39 – 42.
- Mosley, S. (1994). Cutting costs. *Engineering*, v. 235, n. 5, p. 25 – 28, July/Aug.
- Narutaki, N.; Yamane, Y.; Tashima, S.; Kuroki, H. (1997). A new advanced ceramic for dry machining. *CIRP Annals*, v. 46, n. 1, p. 43 – 48.
- Novaski, O.; Dörr, J. (1999b). Usinagem quase a seco. *Máquinas e Metais*, n. 406, p. 34 – 41, nov.
- Sahm, D.; Schneider, T. (1996). A produção sem refrigerante é interessante e deve ser mais conhecida. *Máquinas e Metais*, n. 367, p. 38 - 55, ago.
- Schulz, H. (1999). Trends in manufacturing technology at the threshold of the millennium. 4º Seminário Internacional de alta tecnologia – Inovações tecnológicas na manufatura para o ano 2000. Unimep, ago.
- Teixeira, C. R., Schroeter, R. B., Weingaertner, W. L. (2000). Aspectos ecológicos nos processos de usinagem. <http://cimm.uol.com.br/curiosidades/cur10.htm>. (11/03/2000).
- Trent, E. M. (1984). *Metal cutting*. 2. ed. London, Butterworths.
- Young, P.; Byrne, G.; Cotterell, M. (1997). Manufacturing and the environment. *The international Journal of advanced Manufacturing Technology*, v.13, p.488-493.
- Wakabayashi, T.; Sato, H.; Inasaki, I. (1998). Turning using extremely small amounts of cutting fluids. *JSME International Journal*. v.41, n.1, p.143-148.

INVESTIGATION OF THE HIGH SPEED TURNING OF CAST IRON USING MINIMUM QUANTITY OF FLUID

Abstract. *The benefits created by the application of cutting fluids in machining are well known. However, these fluids can cause health problems to machine operators after long time contact. Additionally, such chemical products usually cause environment pollution, if not adequately discharged. In the way of finding alternatives, researchers have been investigating metal cutting completely without fluids, technique which has its advantages, and the Minimal Quantity of Fluid (MQF) technique. This last one has the attractive of being environmentally correct, for not leaving waste. The present work investigates the influence of the MQF technique on surface finishing and tool life of tungsten carbide, ceramic and PCBN tool materials. Face turning operations on gray cast iron using high speed cutting is made without fluid and with MQF. The results demonstrate that only PCBN tools can have benefits with the new cutting fluid application technique.*

Keywords: *Turning, Cast Iron, HSC, MQL*