



ASPECTOS NEGATIVOS DO USO DE FLUIDO EMULSIONÁVEL NA FURAÇÃO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO-SILÍCIO HIPOEUTÉTICA

Durval Uchôas Braga

Fundação de Ensino Superior de São João del Rei (IFES) / FUNREI; Professor do Depto. de Mecânica; Praça Frei Orlando 170, Centro, 36307-352 - São João del Rei MG, Brasil;

Fax – 55 32 379 2306; e-mail - durval@funrei.br

(Correspondente Autor)

Anselmo Eduardo Diniz

Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP; Professor do Depto. de Engenharia de Fabricação; CP 6122, 13083-970 - Campinas SP, Brasil;

FAX – 55 19 289 3722; e-mail - anselmo@fem.unicamp.br

Gilberto W. A. Miranda - Universidade de Taubaté / UNITAU; Professor do Depto. de Engenharia Mecânica; Rua Daniel Danelli s/n, 12060-440 - Taubaté SP, Brasil;

FAX-55 12 232 7660; e-mail - gilware@iconet.com.br

Nivaldo Lemos Coppini - Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP; Professor do Depto. de Engenharia de Fabricação; CP 6122, 13083-970 - Campinas SP, Brasil,

FAX – 55 19 289 3722; e-mail - ncoppini@iepmail.unimep.br

Resumo. *Exigências técnicas e econômicas associadas às novas tecnologias dos materiais para ferramentas de usinagem, das máquinas-ferramentas, assim como a consciência ambiental, tem exigido o desenvolvimento de pesquisas que envolvem os processos de usinagem com racionalização de fluido de corte ou utilizando dos mesmos com mínima quantidade de lubrificante (MQL - mistura ar-óleo). Visando atender esta nova demanda, desenvolveu-se essa pesquisa com o objetivo de comparar o desempenho do processo de furação de uma liga de Alumínio-Silício hipoeutética (7,11% Si) quando utilizados fluido de corte emulsionado aplicado por jato e fluido de corte atomizado com mínima quantidade de lubrificante (10 ml/h). Alguns ensaios foram realizados em condições de corte majoradas pela duplicação do diâmetro da broca de 10 mm para 20 mm e pelo aumento simultâneo da velocidade de corte de 300 m/min para 450 m/min. Dos resultados obtidos destaca-se a impossibilidade de se usinar esta liga, quando os parâmetros de corte foram majorados no processo de furação em cheio, utilizando-se fluido de corte emulsionado. Por outro lado, quando se utilizou mínima quantidade de fluido, nas mesmas condições de corte, o processo se mostrou capaz, tanto com relação aos esforços de corte, quanto com relação à qualidade dos furos.*

Palavras-Chave: *MQL; Fluido de Corte; Processo de furação; Alumínio-Silício; Usinagem.*

1. INTRODUÇÃO

O uso de fluidos de corte em abundância é muito comum na indústria metal-mecânica em consequência de inúmeros benefícios fornecidos pelos mesmos, como refrigerar e lubrificar a região de corte, aumentar a vida da ferramenta, melhorar o acabamento superficial e reduzir a variação dimensional da peça, facilitar o transporte do cavaco bem como proteger a peça usinada contra a oxidação (Heisel e Lutz, 1998).

Mesmo considerando o estágio atual de desenvolvimento das máquinas cada vez mais automatizadas, bem como de novos materiais e geometria de ferramentas, há uma necessidade constante de se reduzir os custos envolvidos na produção metal-mecânica, permitindo maior competitividade em um mercado globalizado. Além da otimização das máquinas-ferramentas a racionalização do uso dos fluidos de corte tem contribuído muito para a redução desses custos, já que, aproximadamente 16% do custo total de usinagem são provenientes do uso dos mesmos, que supera em muito o custo com ferramentas que é cerca de 4% (Klocke e Fehrehnbacher, 1997; Diniz e Scandiffio, 2001).

Outra tendência mundial diz respeito à crescente preocupação, por parte das empresas envolvidas com processos de fabricação por usinagem, quanto aos aspectos da conservação ambiental. Para esse caso, o uso de fluidos de corte vêm sendo reavaliado em função de leis ambientais cada vez mais severas que induzem a racionalizar o uso, bem como, maiores cuidados com o descarte dos mesmos.

Outro problema gerado pelo uso de fluido de corte está relacionado à saúde do operador quando em contato com o mesmo, que pode ser pela pele ou através da inalação da névoa que se forma durante a usinagem, com conseqüentes dermatites ou, até mesmo, câncer (Kalhöfer, 1997).

Dentre outras, essas questões relacionadas ao uso de fluidos de corte justificam pesquisas que visam restringir ou, até mesmo, eliminá-los da usinagem. Portanto, a usinagem tanto sem fluido de corte, como com mínima quantidade de fluido de corte em forma líquida atomizado pelo ar comprimido (MQL), têm sido alvo de inúmeras pesquisas.

No processo de usinagem sem fluido de corte ocorre maior atrito com conseqüente aumento da temperatura na região de corte gerando forte tendência de adesão de material da peça na ferramenta. Assim sendo, tem sido impossível o uso do mesmo na usinagem de materiais de baixo ponto de fusão, como algumas ligas de alumínio (Kalhöfer, 1997; Braga *et al.*, 1999). Para o caso da usinagem sem fluido de corte de materiais metálicos ferrosos, Heisel *et al.*, (1998) citam a dificuldade de obtenção de tolerâncias dimensionais apertadas devido à dilatação tanto da peça, como dos componentes da máquina-ferramenta. Assim, o corte a seco não pode ser aplicado de forma generalizada.

A técnica de mínima quantidade de fluido de corte (MQL) vem contribuir para a redução do atrito e, conseqüentemente, da temperatura na interface entre a peça e a ferramenta, podendo atender esta lacuna em algum dos processo de produção, sem que se tenha de utilizar fluido de corte emulsificado em abundância aplicado por jato (Hummel *et al.*, 2001; Braga *et al.*, 1999). O termo MQL é usado quando uma vazão inferior a 100ml/h de óleo de corte é atomizada pelo ar comprimido e utilizada como fluido de corte em processos de usinagem. Essas mínimas quantidades de fluido de corte têm sido suficientes para garantir a continuidade do processo reduzindo os efeitos da aderência de material da peça na ferramenta com manutenção dos níveis dos esforços de corte e qualidade dimensional do produto dentro dos padrões esperados (Hummel *et al.* 2001).

Com o uso da MQL, comparativamente ao sistema tradicional de refrigeração/lubrificação por emulsão aplicada por jato em abundância, há um desenvolvimento maior da temperatura na região de corte devido ao baixo poder refrigerante que o ar comprimido proporciona ao sistema. Isto gera menor resistência do material ao corte e, conseqüentemente, menores esforços de corte (Heisel *et al.*, 1998; Braga, 2001). Porém, no corte a seco, a temperatura elevada não age de maneira benéfica, uma vez que essa temperatura é bem mais alta do que aquela desenvolvida quando utilizada MQL. Tem-se portanto, maior desgaste da ferramenta com conseqüente aumento dos esforços de corte (Silva *et al.*, 2001).

Dentre outros, os aspectos positivos relacionados ao uso de MQL, estão: a redução dos custos diretos e indiretos relacionados aos fluidos de corte emulsionáveis, eliminação de toda a manutenção e os problemas inerentes ao descarte dos mesmos, diminuição dos riscos à saúde do operador, melhora na visibilidade do processo por se tratar de uma operação mais limpa, além de evitar problemas de odores, bactérias e crescimento de fungos presentes no sistema de emulsão (Machado e Wallbank, 1997; Silva *et al.*, 2001).

Porém, para a adoção da MQL, deve-se implantar todo um sistema de exaustão e filtros para evitar o contato do operador com a névoa que se forma durante o processo. A emissão do fluido atomizado no ambiente (névoa) é regulamentada em alguns países como no máximo $5\text{mg}/\text{m}^3$ (Kalhöfer, 1997), sendo que alguns fabricantes de fluidos de corte tem desenvolvido fluidos com aditivos que inibem a formação de névoa durante a usinagem. Hummel *et al.* (2001), citam que ensaios de usinagem realizados em liga forjada de Alumínio (AlZnMg-Cu 1.5), em que se utilizou da técnica de mínima quantidade de fluido com vazão de 20 ml/h, apresentaram resultados tais que permitiram se evitar o uso de 3000 l/h de emulsão normalmente utilizadas no processo. Considerando ainda a produção em série de 20.000 peças, no processo de usinagem com MQL e 20ml/h, os mesmos acrescentam que obtiveram as qualidades dimensionais compatíveis com os padrões usuais exigidos pela empresa.

Outro detalhe importante acrescentado pelos mesmos autores, diz respeito aos lubrificantes utilizados pelas indústrias alimentícias, portanto, isentos de aditivos nocivos ecologicamente, poderem ser utilizados na mínima lubrificação da interface peça-ferramenta sem comprometimento para o processo de fabricação.

Assim, o uso da MQL vem se mostrando uma opção interessante e promissora para substituir, em alguns casos, o sistema tradicional de lubrificação/refrigeração usados nos processos de usinagem, tanto em aspectos econômicos quanto ecológicos.

2. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 Materiais

Peça. Para os corpos de prova utilizados nos ensaios de furação foi utilizada uma liga de Alumínio-Silício hipoeutética com 7,11% de Si. Os furos foram realizados em três tipos de corpos de prova. O primeiro era uma placa, com dimensões 315 x 432 x 34 mm, que recebeu a maioria dos furos de diâmetro igual 10 mm. O segundo, de dimensões 315 x 432 x 60 mm, foi utilizado para a usinagem dos furos de diâmetro 20 mm, permitindo a manutenção da relação entre o comprimento do furo (L) e o diâmetro da broca (D) próxima de 3. Depois de efetuarem-se uma série de furos nestes dois tipos de corpos de prova (em média 16 furos) era feito um furo no terceiro corpo de prova, de dimensões menores (42x42x34 mm) preso a um dinamômetro, onde era medida de forma indireta a potência de corte e diretamente o momento torçor, força de avanço, variação dimensional e rugosidade dos furos. Esses furos eram passantes e foram realizados utilizando-se de uma reversão do avanço da broca para cada corte efetivo e equivalente a um terço da profundidade do furo (corte tipo pica-pau).

Ferramenta. As ferramentas utilizadas foram as brocas inteiriças de metal duro K10 de diâmetros iguais a $D=10$ mm e $D=20$ mm, versão direita e sem revestimento, em conformidade com a norma DIN 338 (modelo A1263 - Titex).

2.2. Equipamentos e instrumentos

Os ensaios de furação foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC modelo SV-40 (MORI-SEIKI), comando Fanuc, com variação contínua de rotação da árvore, podendo atingir um máximo de 12.000 rpm, extrema rigidez, potência do motor principal de 22 kW (30cv) e três eixos acionados por servo-motores independentes.

As medições dos desgastes na superfície de folga da broca, assim como as fotos, foram obtidas em um analisador de imagem (Global Image Analyser) e software (Global Lab). O mesmo é constituído de um microscópio ótico com ampliação de 25 e 50 vezes, acoplado a uma câmara de vídeo e a um computador compatível.

As medidas de rugosidade das superfícies usinadas foram obtidas de um rugosímetro portátil Mitutoyo Surftest-211.

Os sinais provenientes do momento torçor (M_t) e da força de avanço (F_f) da broca foram obtidos durante a usinagem no terceiro tipo de corpo de prova fixo ao dinamômetro KISTLER, tipo 9272, acompanhado de software específico para este tipo de utilização. A taxa de amostragem do sinal era de 2,56 kHz para 0,4 segundos amostrados.

A potência de corte foi obtida indiretamente utilizando um transdutor analógico de potência projetado e construído no Departamento de Engenharia de Fabricação da UNICAMP. Com uma placa de conversão de sinais analógico para digital, modelo Lab-PC+ e os softwares NI-DAQ (versão 4.8) e LABVIEW (versão 3.11), da National Instrument, o sinal resultante foi adquirido a uma taxa de amostragem de 50 Hz. Para monitorar a potência consumida pela máquina em um terço do comprimento do furo são necessários aproximadamente 0,7s e 1,7s para as brocas de diâmetros 10mm e 20mm respectivamente, sendo menores que os dois segundos monitorados.

Um equipamento eletrônico e programável de medição (tipo coluna), para inspeção manual de uso em ambientes industriais, foi utilizado para a medição dos diâmetros dos furos. O mesmo possui as seguintes características: Coluna tipo E4N programável (MARPOSS), com resolução de 0,1 μ m e Ogivas projetadas para medirem diâmetro do furo iguais a 10mm e 20mm.

Nos ensaios utilizou-se fluido de corte em abundância, aplicado por jato, na forma de emulsão (1:35 de proporção óleo/água) do óleo mineral Cooledge B.

2.3. Condições de corte

Os ensaios de furação foram realizados conforme Tabela (1). Cada ensaio foi realizado 2 vezes.

Tabela 1. Relação de ensaios e condições de usinagem

| Ensaio | Broca MD K10 | f mm/rot | a_p mm | v_c m/min | Fluido de corte | Nº furos |
|--------|--------------|----------|----------|-------------|-----------------|----------|
| I | D = 10 mm | 0,1 | 5 | 300 | Emulsão 1:35 | 612 |
| II | D = 20 mm | | 10 | 450 | | 04 |

Os ensaios I e II foram replicados uma e quatro vezes respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas condições do ensaio I observou-se um cavaco de forma helicoidal e tipo compatível com a continuidade do processo de corte (Fig.1-A). Para este ensaio foi usinado um comprimento de avanço da ferramenta igual a $L_f = 20,8$ m, sendo considerado pelos autores mais que suficiente para a análise das variáveis do processo. Ainda, a superfície do furo também se mostrou compatível com o processo de usinagem com a conseqüente impressão da marca do avanço da ferramenta, mostrada na Fig.1-B.

As letras A e B nas figuras 2 e 3 estão relacionadas com dois ensaios sendo realizados nas mesmas condições de corte. Quanto aos esforços de corte, representados pela potência consumida no corte (P_c) (Fig.2) e pela força de avanço da ferramenta (F_f) (Fig.3) e a variação dimensional, representada pelo diâmetro (D) próximo da entrada do furo (Fig.4), observa-se boa repetitividade em função do comprimento de avanço da ferramenta. A curva que representa a potência de corte

apresenta maior dispersão quando comparada àquela da força de avanço da ferramenta. Este fato pode ser explicado pelo batimento do conjunto ferramenta-suporte que afeta diretamente a variação do momento torçor e, conseqüentemente, a potência de corte. A força de avanço tem uma dependência direta com o estado de empastamento da aresta transversal da broca, a qual não apresentou variação significativa do volume desse material durante o ensaio (Ver Fig.5). Tanto a força de avanço, quanto a potência de corte crescem com o comprimento furado e, portanto, são afetadas pelo desgaste da ferramenta.

Apesar de um maior valor de desvio padrão para as medidas de diâmetros obtidos no ensaio B, suas médias permaneceram constantes, permitindo a manutenção de uma qualidade ISO IT10 para os furos. Interessante notar que o desgaste da ferramenta, apesar de influenciar os esforços de corte, não influenciaram a qualidade do furo. Crê-se que isto é devido ao alisamento que as arestas secundárias de corte (guias da broca), proporcionam na superfície já usinada. Como estas guias não apresentaram desgaste, elas foram capazes de corrigir os erros que porventura as arestas principais desgastadas tenham causado.

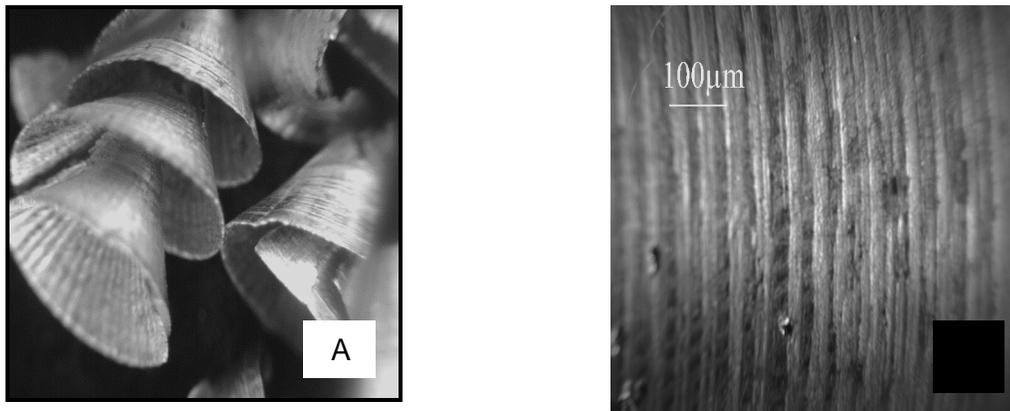


Figura 1- Forma do cavaco (A) e superfície da peça (B) para a condição do Ensaio I.

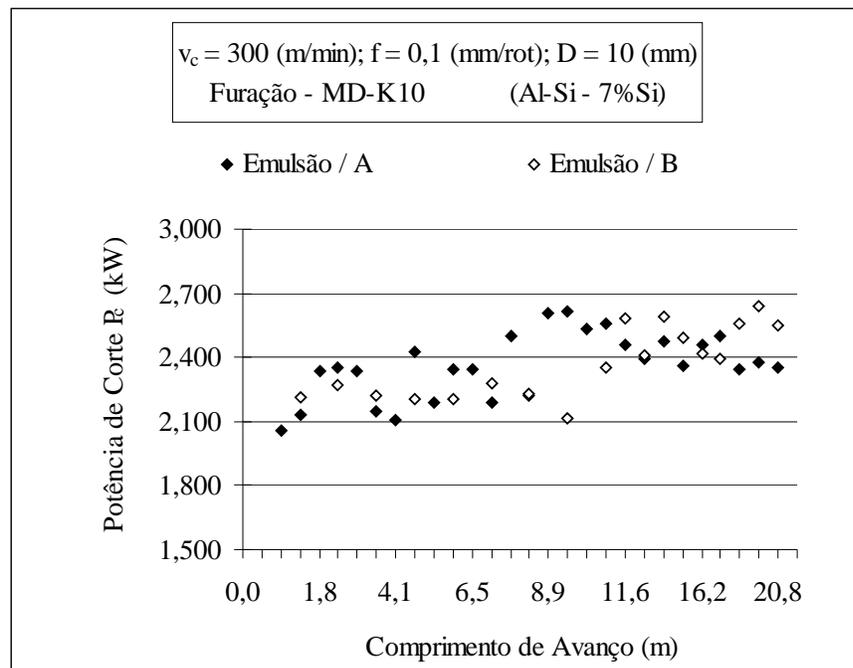


Figura 2- Réplica para a Potência de Corte contra comprimento de avanço da ferramenta

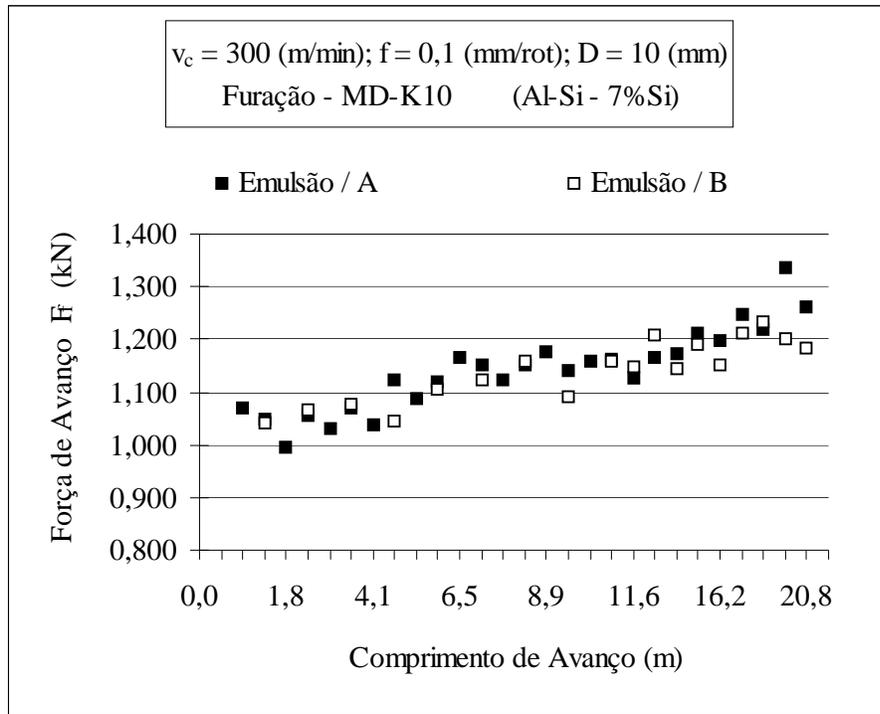


Figura 3- Réplica para a Força de Avanço contra comprimento de avanço da ferramenta

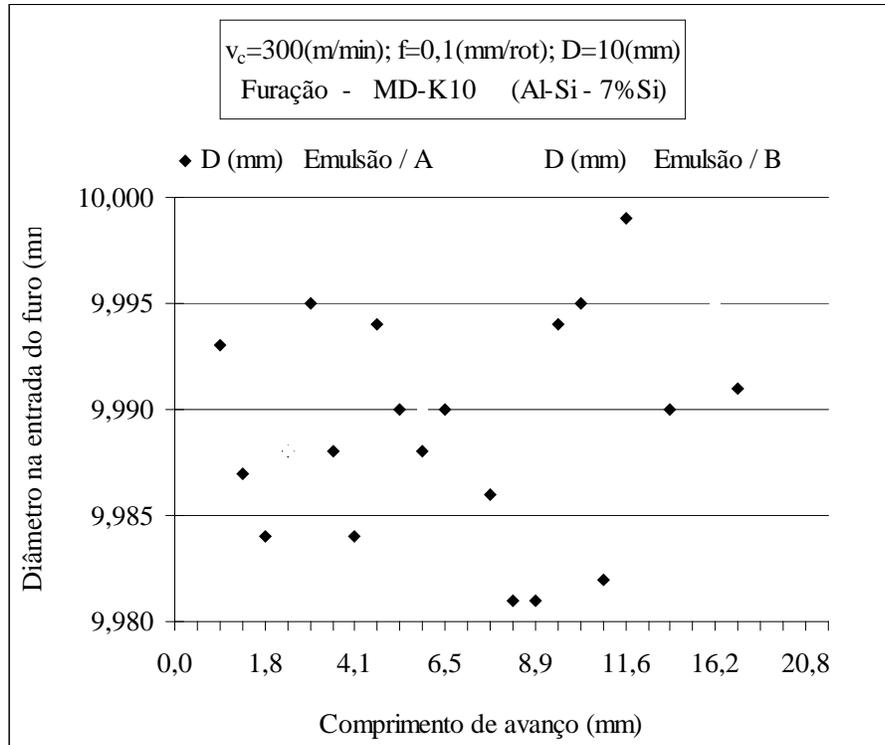


Figura 4- Réplica para os diâmetros obtidos próximos da entrada do furo (condição de usinagem I).

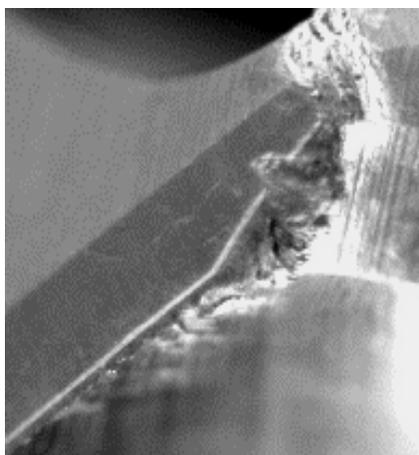


Figura 5- Empastamento da região central da broca para as condições do Ensaio I

Quando se passou da velocidade de corte de 300 m/min para 450 m/min (com a duplicação do diâmetro da broca ($D=20\text{mm}$) (Ensaio II), o volume de cavaco removido por unidade de tempo e comprimento de aresta principal de corte aumentou em 200%. Também para esses ensaios foram realizadas três reversões do avanço da ferramenta durante a usinagem do furo (corte do tipo pica-pau). Mesmo assim, após três tentativas de se usinar a liga, nas condições de corte do ensaio II (com emulsão), observou-se um empastamento no canal da broca com conseqüente quebra da mesma quando decorridos não mais do que 240mm de comprimento de avanço da broca (4 furos).

Os autores comprovaram que, nas mesmas condições desse ensaio, porém, quando substituído a emulsão por fluido de corte atomizado (MQL com vazão de 10ml/h), em que o efeito refrigerante era menor, não ocorreu empastamento do material da peça na broca até o corte chegar em 8,6 metros de comprimento de avanço da broca (Braga, 2001). Portanto, pode-se dizer que a impossibilidade do processo de furação, quando utilizada emulsão aplicada por jato e na condição de esforços de corte majorados, seja devido a esse maior fluxo de material removido, dificultando um mínimo de lubrificação necessária na interface ferramenta-peça. Em outras palavras, quando se utilizou emulsão em abundância, a lubrificação não foi suficiente para fazer com que todo o volume de cavaco pudesse escoar livremente. Deve-se aqui lembrar que um fluido emulsionável tem boa capacidade de refrigeração e pouca capacidade de lubrificação. Já, com fluido de corte atomizado com mínima quantidade de óleo mineral que tem boa capacidade de lubrificação, essa fez com que o coeficiente de atrito cavaco-superfície de saída da broca fosse menor que na outra condição de refrigeração /lubrificação, o que viabilizou a continuidade do processo.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos responsáveis pelo PIBIC/CAPES/CNPq pela concessão da bolsa de estudos; à FAPESP, FUNCAMP e FAEP pelo financiamento de algumas das etapas do trabalho e à Diretoria da TITEX PLUS do grupo Sandvik pelo favorecimento na aquisição das ferramentas.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados parciais obtidos no trabalho de furação da liga de Alumínio-Silício Hipoeutética, com ferramenta inteiriça de metal duro, pode-se concluir:

- 1- Não foi possível realizar o corte utilizando-se fluido de corte em abundância quando se desejou retirar um valor de volume de cavaco removido por minuto alto, porém a utilização da MQL viabilizou o corte nestas condições. Assim, para a usinagem em condições de corte severas, em que o volume de material removido seja significativo, recomenda-se não utilizar fluido de corte emulsionável e sim atomizado;
- 2- A lubrificação se mostrou mais eficiente para o processo de furação quando comparada a refrigeração;
- 3- Para a relação $L/D = 3$, foi necessário utilizar reversão do avanço da broca a cada $1/3$ do comprimento de avanço da mesma para que pudesse ocorrer extração do cavaco;
- 4- Quando o volume de material removido por minuto não é alto, a furação da liga de alumínio-silício utilizada nos ensaios se torna possível independentemente do tipo de fluido de corte utilizado;
- 5- O desgaste da ferramenta, apesar de influenciar os esforços de corte, não influenciaram a qualidade dos furos obtidos.

6. REFERÊNCIAS

- Braga, D. U., Diniz, A. E., Miranda, G. W. A. e Coppini, N. L., "Utilização da Técnica de Mínima Lubrificação por Névoa na Furação da Liga de Alumínio-Silício (A356)", IV Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica - CIDIM'99, Universidad de Santiago de Chile - Chile – Noviembre 1999.
- Braga, D. U., "A técnica de mínima quantidade de fluido de corte aplicada no processo de furação de uma liga de alumínio-silício", Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. - Campinas, SP, 200p, 2001, Tese (doutorado).
- Diniz, A. E., Scandiffio, I., "Uma contribuição ao corte a seco e do corte com mínima quantidade de lubrificante em torneamento de aço". 1º COBEF, 02 a 04 de abril de 2001, Curitiba, Paraná.
- Heisel, U., Lutz, M., "Pesquisa de fluido de refrigeração e de lubrificação." Máquinas e Metais, maio / 1998, pp 40 - 49.
- Heisel, U., Lutz, M., Spath, D., Wassmer, R., Walter, U. A técnica da quantidade mínima de fluido e sua aplicação nos processos de corte. Máquinas e Metais, p.22-38, fevereiro-1998.
- Hummel P. M., Lilla A., Berky E., " A usinagem do Alumínio sem fluido refrigerante" , Máquinas e Metais, Agosto de 2001, pp. 22-31.
- Kalhöfer, E. , "Dry Machinig – Principles and Applications" 2º Seminário Internacional de Alta Tecnologia, UNIMEP, Santa Barbara d'Oeste – SP, julho de 1997.
- Klocke , F. M., Fehrehnbacher, G., 1997, "Dry Cutting". Annals of the CIRP, v. 46, n.2, p. 519-526.
- Machado, A. R., Wallbank, J., "The effect of extremely low lubricant volumes in machining" , WEAR 210 , 1997, p. 76-82.
- Silva L. R., da, Coelho R. T., Júnior A. B., Bezerra A. A., Mendonça W. G. " Estudo da Geometria da Corte para Torneamento de Inconel", Máquinas e Metais, Agosto de 2001, pp. 32-55.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo desse trabalho.

NEGATIVE ASPECTS OF SOLUBLE CUTTING FLUID IN THE DRILLING OF A HYPOEUTECTIC ALUMINUM-SILICON ALLOY

Durval Uchôas Braga

Fundação de Ensino Superior de São João del Rei (IFES) / FUNREI; Professor do Depto. de Mecânica; Praça Frei Orlando 170, Centro, 36307-352 - São João del Rei MG, Brasil;
Fax – 55 32 379 2306; e-mail - durval@funrei.br

(Correspondente Autor)

Anselmo Eduardo Diniz

Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP; Professor do Depto. de Engenharia de Fabricação; CP 6122, 13083-970 - Campinas SP, Brasil;
FAX – 55 19 289 3722; e-mail - anselmo@fem.unicamp.br

Gilberto W. A. Miranda - Universidade de Taubaté / UNITAU; Professor do Depto. de Engenharia Mecânica; Rua Daniel Danelli s/n, 12060-440 - Taubaté SP, Brasil;
FAX–55 12 232 7660; e-mail - gilware@iconet.com.br

Nivaldo Lemos Coppini - Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP; Professor do Depto. de Engenharia de Fabricação; CP 6122, 13083-970 - Campinas SP, Brasil,
FAX – 55 19 289 3722; e-mail - ncoppini@iepmail.unimep.br

Abstract. *Technical and economical demands together with new technologies applied to tool materials and machine tools, as well as the environmental conscience, has forced the development of researches aiming to either, avoid or minimize the use of cutting fluid in machining processes. To reach these demands this work was carried out. Its main objective is to compare the performance of the application of abundant soluble oil and minimum quantity of lubricant (MQL – 10 ml/h of neat oil in a flow of compressed air) in the drilling of a hypoeutectic aluminum-silicon alloy. The experiments were carried out in two different cutting conditions: the first one with drill diameter $D = 10$ mm and cutting speed $v_c = 300$ m/min and the second one with $D = 20$ mm and $v_c = 450$ m/min. One of the most important result shows that is impossible to drill this alloy with the highest cutting speed and drill diameter using abundant soluble oil. In the other hand, when MQL was used in the same cutting conditions, the process became capable related to both cutting forces and hole quality.*

Keywords: *MQL; Cutting Fluid; Drilling Process; Aluminum-Silicon Alloy; Machining.*