

XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica -13 a 17/08/2012–São Carlos-SP
Artigo CREEM2012

FLUIDOS DE CORTE PARA USINAGEM: MENOR VISCOSIDADE PREJUDICA A LUBRIFICAÇÃO?

Daniel de Carvalho Secco⁽¹⁾, Afonso Carlos Oliver⁽²⁾, André Nozomu Sodoyama Barrios⁽³⁾ e Alessandro Roger Rodrigues⁽⁴⁾

^{(1), (2), (3)} UNESP – Universidade Estadual Paulista, Curso de Engenharia Mecânica
Campus de Ilha Solteira – Centro – CEP 15385-000 – Ilha Solteira – São Paulo

⁽⁴⁾ USP – Universidade de São Paulo, Curso de Engenharia Mecânica
Campus de São Carlos – Centro – CEP 13566-590 – São Carlos – São Paulo
E-mail para correspondência: danielseccosdj@gmail.com

Introdução

Todo processo de usinagem gera calor devido à energia decorrente do atrito interno (formação do cavaco) e externo (interface ferramenta-peça-cavaco). Cerca de 97% da energia consumida em um processo de usinagem dos metais é transformado em calor (Shaw, 2004). Este calor gerado precisa ser minimizado a fim de evitar alguns inconvenientes, como desgaste da ferramenta, dilatação térmica da peça e dano térmico à estrutura superficial do produto. Com a utilização de fluidos de corte, pode-se diminuir os atritos externos na zona de corte, reduzindo assim a quantidade de calor gerada no processo em até 30% (Alves, 2005). A quebra da ferramenta ou formação de aresta postiça de corte são processos que ocorrem com frequência sempre que temperaturas acima de 1000°C são alcançadas na região de corte.

As principais funções dos fluidos de corte são lubrificação e refrigeração, mas também outras funções podem ser oferecidas como:

- Prevenção contra soldagem cavaco-ferramenta (formação de arestas postiças)
- Retirada do cavaco da região de corte
- Proteção contra corrosão
- Redução ou eliminação da dilatação térmica da peça
- Eliminação ou minimização de tensões residuais na superfície da peça usinada
- Redução do custo de ferramental na operação

Apesar de não terem uma classificação padronizada, os fluidos de corte podem ser divididos em sólidos, líquidos e gasosos. Os sólidos e gasosos ainda são restritos e pouco utilizados na prática, tais como bissulfeto de molibdênio e ar comprimido, respectivamente (Machado *et al.*, 2009).

Segundo Fernandes (2007), os líquidos são subdivididos em óleos integrais e fluidos a base de água. Os óleos integrais são capazes de formar películas oleosas, lubrificantes e aderentes e tem origem mineral, vegetal e sintético. São exemplos os óleos minerais e graxos. As desvantagens dos óleos integrais são rápida deterioração, altos custos, riscos de incêndio, baixo poder de refrigeração e formação de fumos prejudiciais à saúde do operador.

Os fluidos solúveis dividem-se em emulsões de óleo em água (óleos emulsionáveis), fluidos semissintéticos e sintéticos. As emulsões apresentam estruturas tensoativas e consistem primariamente de um óleo mineral em suspensão coloidal, estabilizado por um agente emulsificante, como um ácido graxo. Os fluidos sintéticos (soluções) são obtidos a partir de uma composição de sais orgânicos e inorgânicos, aditivos lubrificantes, biocidas e outros, adicionado à água. Foram desenvolvidos para combinar o alto calor específico e condutividade térmica da água com aditivos anti-corrosivos, lubrificantes e de extrema pressão, para compensar o baixo poder de lubrificação e corrosão da água (Fernandes, 2007).

Os fluidos semissintéticos combinam características dos fluidos sintéticos e das emulsões, visando obter um desempenho mais eficiente que as próprias emulsões, principalmente no que diz respeito a um melhor controle de oxidação e melhor estabilidade microbiológica. Atualmente, estes fluidos são compostos majoritariamente por compostos sintéticos, complementados por óleos emulsionáveis numa proporção que varia entre 5 e 30% do total do fluido (Fernandes, 2007).

Os tensoativos das emulsões (Fig. 1) são moléculas cuja estrutura química contém grupos com afinidades distintas e interligadas, ou seja, uma cabeça polar ou hidrofílica ligada a uma cauda apolar ou hidrofóbica. A fase oleosa reduz o atrito na interface peça-cavaco-ferramenta. A fase aquosa, normalmente na faixa de 95%, contribui para a dissipação do calor a uma taxa duas a três vezes mais rápida do que o óleo, devido ao seu elevado calor específico (Cambiella *et al.*, 2006). A interface fluido-metal é um complexo sistema tribológico em que um fluido de duas fases (água e óleo) e uma fase sólida (a superfície do metal) se relacionam em processos severos de lubrificação, umedecimento, adsorção, dessorção, coalescência e inanição (Pegado, 2004).

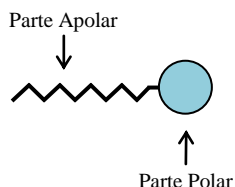


Figura 1 – Representação esquemática de uma molécula tensoativa (Pegado, 2004).

Tem-se normalmente admitido que emulsões de óleo em água (O/A) possuem um comportamento similar ao óleo como componente em operações brandas de usinagem, devido à formação de “piscinas” na interface peça-ferramenta. No entanto, sob altas pressões ou velocidades, estas “piscinas” deixam de existir e as emulsões perdem seu efeito lubrificante (Ratoi-Salagean *et al.*, 1997). A performance das emulsões nestas condições tem sido eficientemente comparada com o fenômeno de inanição do filme de óleo em contato com a peça (Barker *et al.*, 1993). Inanição ocorre sempre que há limitada quantidade de lubrificante na interface peça-ferramenta e a espessura do filme lubrificante é muito menor do que em condições de superfície totalmente inundada. Como resultado, maiores desgastes e formação de arestas postiças surgirão.

O início do fenômeno de inanição está correlacionado com as propriedades físico-químicas das emulsões. Chen *et al.*, (2002) cita que as emulsões O/A devem “molhar” a superfície do metal formando o filme lubrificante. O tamanho das gotas de óleo, estabilidade, viscosidade e tensão superficial podem também afetar a eficiência do processo de lubrificação. Todas estas propriedades dependem em grande parte do tipo e concentração do emulsificador usado na formulação. Além do mais, estas propriedades interagem entre si, complicando a análise do mecanismo de lubrificação. A formulação adequada do fluido de corte aumenta a vida da ferramenta, melhora a qualidade superficial e reduz o consumo de energia (Schmid, 1996). Uma formulação apropriada do fluido de corte é também mais facilmente regenerável, eficiente e menos oneroso para posterior descarte.

Outro fenômeno também de grande importância no que se refere ao sistema tribológico observado na interface peça-ferramenta é o fenômeno da adsorção. Este se relaciona intimamente com a tensão superficial dos fluidos e com o grupo de moléculas tensoativas do fluido, e corresponde ao processo de adesão das moléculas de um fluido (adsorvido) na superfície sólida (adsorvente). Uma vez que os tensoativos possuem grupos solúveis e insolúveis em água, eles tendem a adsorver na interface, tal como ar-água ou óleo-água. Esta adsorção leva a uma diminuição na tensão superficial (ou interfacial) até que a interface seja efetivamente saturada com moléculas de tensoativos, como é mostrado na Fig. 2 (Pegado, 2004).

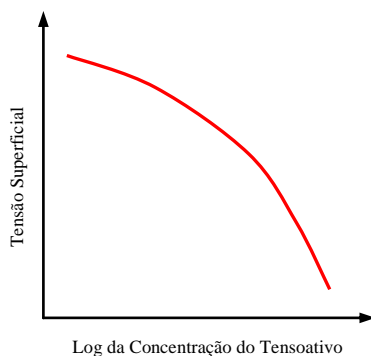


Figura 2 – Tensão superficial *versus* concentração do tensoativo (Modificado de Pegado, 2004).

Sob o enfoque mercadológico, quando se aborda o problema do calor gerado na usinagem, os fabricantes de ferramentas defendem que a usinagem do futuro será realizada a seco, dadas as constantes inovações em substratos, revestimentos e geometrias das arestas, pois minimizam a energia despendida no processo de formação de cavaco. Por outro lado, os fornecedores de fluidos de corte declaram que em diversas situações a usinagem sem fluido de corte será sempre impraticável, dado o calor inerente ao processo, como é o caso de retificação. Mesmo em processos que usam ferramentas com geometria definida, como torneamento e fresamento, a usinagem a seco é possível, mas improdutiva, pois a vida da ferramenta é muito curta. Nesse sentido, tem-se assumido que os fluidos de corte sempre serão indispensáveis, ao ponto de serem entendidos na usinagem como “ferramenta líquida”, tal como registra a Blaser Swisslube, uma das empresas líderes mundiais na fabricação de fluidos de corte.

Se não bastassem as questões tecnológicas e mercadológicas supracitadas, há as exigências ambientais, muitas das quais já regulamentadas por leis, que visam o desenvolvimento sustentável através da preservação da saúde humana e do meio ambiente. Assim, tem-se buscado elaborar fluidos de corte ditos “ecologicamente corretos”, com agressão mínima ou nula ao meio ambiente. Além disso, cada vez mais os fluidos de corte usados são adequadamente coletados, reprocessados para reestabelecer suas propriedades e permitir seu reaproveitamento ou reciclagem. Por fim, a redução da quantidade e a forma de aplicação dos fluidos têm sido alvo de constantes inovações, como é o caso da técnica denominada Mínima Quantidade de Fluido (MQF). Nessa técnica, pequenos volumes de fluido (até 100 ml) são pulverizadas em ar comprimido (~600 kPa) e direcionados na zona de corte, formando uma névoa, cuja dispersão é retirada por um sistema de exaustão (Bezerra, 2003). Montadoras automotivas como a Ford em Camaçari/BA e Volkswagen em São Carlos/SP implementarão em 2012 o sistema MQF na usinagem dos blocos dos motores de ferro fundido (Usinagem-Brasil, 2012; Cruz, 2012).

Visando acompanhar as mais recentes pesquisas em fluidos de corte para usinagem, este trabalho mediu a viscosidade e a tensão superficial de fluidos sintéticos e semissintéticos, e correlacionou os resultados ao desempenho lubrificante, recorrendo ao ensaio de desgaste “Pino-no-Disco”. Para tanto, como inovação do trabalho, substituiu-se o par tribológico original pelo encontrado na usinagem (peça-ferramenta), sendo o inserto de carboneto de tungstênio (pino) e o aço VP100 para moldes e matrizes (disco). A modificação metodológica proposta neste trabalho permite avaliar o desempenho lubrificante de fluidos de corte em condições mais próximas das ocorridas na usinagem em rotações e forças de usinagem baixas a moderadas, como em operações de sangramento, alargamento, mandrilamento de acabamento.

Materiais e Métodos

Os fluidos de corte utilizados neste trabalho são fluidos semissintéticos e sintético fornecidos pela empresa Blaser Swisslube do Brasil Ltda, tal como mostra a Fig. 3.



Figura 3 – Fluidos avaliados na pesquisa (semissintéticos opacos e sintético translúcido).

O fluido 1 é um fluido semissintético Blasocut BC 20. O fluido 2 é um fluido semissintético Blaser universal 2000, enquanto o fluido 3 é um fluido sintético recém-desenvolvido pela Blaser. Os fluidos 1, 2 e 3 foram diluídos em água na proporção de 8%, 8% e 3%, respectivamente, conforme recomendação do fabricante.

Para o ensaio de viscosidade, utilizou-se um viscosímetro rotacional Brookfield Dv II.Pro, munido de uma cuba térmica acoplada, que permite variar a temperatura do fluido ensaiado (Fig. 4). O ensaio foi realizado de acordo com a norma ANSI DIN 53019.

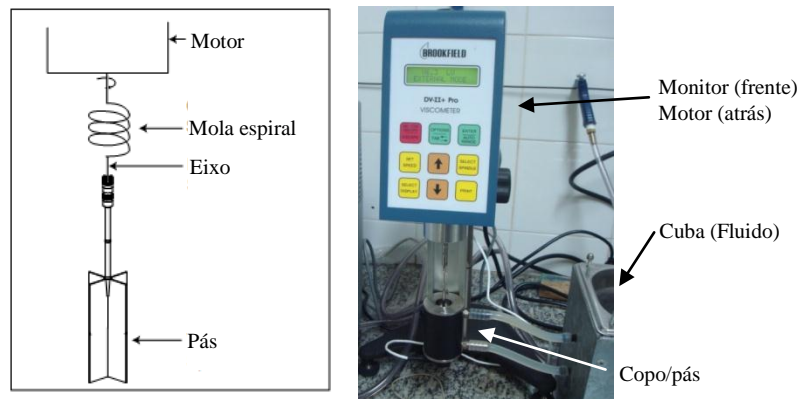


Figura 4 – Viscosímetro rotacional utilizado nos ensaios de viscosidade (Brookfield, 2009).

O ensaio de tensão superficial foi feito de forma indireta comparando-se os valores de tensão superficial do fluido com a capacidade de um fluido molhar uma superfície. A relação entre essas duas propriedades são inversamente proporcionais, logo quanto maior a tensão superficial de um fluido, menor é a sua molhabilidade.

Para obter a tensão superficial dos fluidos em teste, utilizou-se o método do anel, regulamentado pela norma DIN 53914. Para tal, empregou-se o tensiômetro Du-Nouy apresentado na Fig. 5. O equipamento consiste de uma haste de alumínio em que uma de suas extremidades é fixa em um fino fio de aço e a outra extremidade suporta um anel construído de fio de platina.

O anel do tensiômetro deve passar paralelamente através da superfície livre do líquido, sendo necessário exercer uma força que exceda a tensão superficial. A partir da força e do diâmetro do anel, obtém-se o coeficiente de tensão superficial.

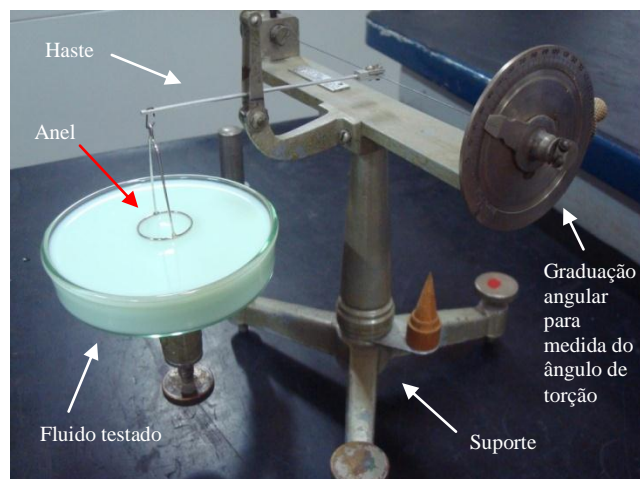


Figura 5 – Tensiômetro Du-Nouy empregado nos ensaios de tensão superficial.

O teste de lubricidade foi baseado na norma ASTM G99-05. Este método de ensaio abrange um processo de laboratório para determinação do desgaste dos materiais e lubricidade de fluidos em análise durante um processo deslizante. Os materiais são testados em pares. Para o teste de desgaste “Pino-no-Disco”, dois corpos de prova são necessários. Um deles, um pino com uma extremidade plana, é posicionado perpendicularmente a outro, normalmente um disco circular plano. O disco de ensaio é fixado ao eixo de um motor que o faz girar em torno do seu centro, e o pino fixo a um suporte atrita contra a superfície do disco imerso em um fluido teste (Fig. 6).

A trajetória de deslizamento é um círculo sobre a superfície do disco. O pino é pressionado contra o disco sob uma carga especificada, geralmente por meio de um braço ou alavanca e anexado a pesos.

O desgaste causado devido ao atrito e, por conseguinte, o poder de lubrificação dos fluidos é obtido por meio de comparações da perda de massa. No caso desta pesquisa, em particular, o disco foi fabricado com o aço VP100, cedido pela Villares Metals S/A, e na ponta do pino, foi soldado um pequeno disco de metal duro (inserto de carboneto de tungstênio) buscando simular mais fielmente o processo de usinagem.

A temperatura do fluido em teste foi ajustada através de um controlador de temperatura acoplado ao viscosímetro (precisão de 0,1°C). A quantidade de fluido utilizada foi de 100 ml. Foram realizadas três medições para cada fluido nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C.

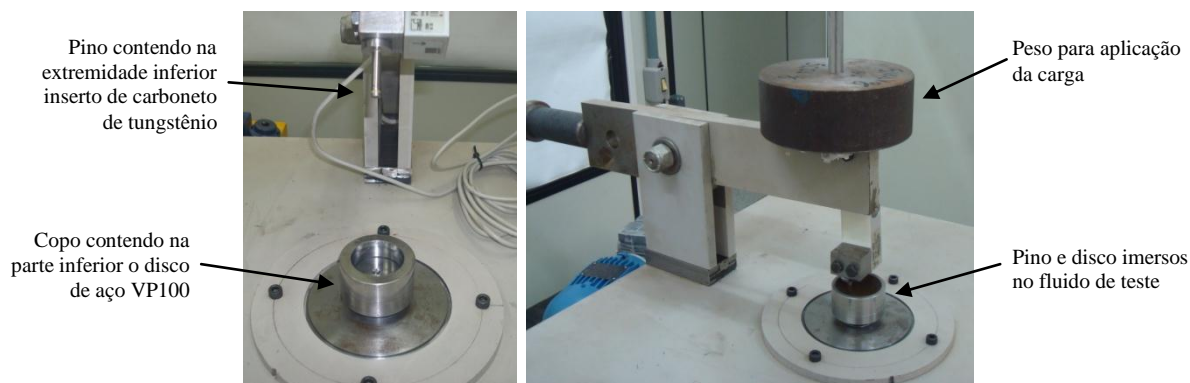


Figura 6 – Montagem experimental do ensaio “Pino-no-Disco” para avaliação da lubrificidade dos fluidos.

Resultados e Discussão

Observa-se na Tabela 1 que a viscosidade de todos os fluidos, incluindo a da água adotada como referência, diminuiu com o aumento da temperatura em 20° (+67%). As reduções foram de 19%, 11% e 4%, respectivamente para os fluidos semissintéticos, sintético (3) e água. Isso ocorreu devido ao aumento da temperatura, que eleva o grau de mobilidade atômica dos fluidos. Comparando-se os fluidos ao fixar a temperatura, nota-se que os fluidos semissintéticos (1 e 2) apresentaram maior viscosidade, devido à menor diluição em água. A diferença entre os fluidos semissintéticos e o sintético alcançou ficou entre 20 e 35%.

Tabela 1 – Viscosidade dinâmica (centiPoise).

Fluido	Temperatura (°C)		
	30	40	50
Água	1,44	1,41	1,38
Fluido 1	1,71	1,47	1,38
Fluido 2	1,83	1,55	1,50
Fluido 3	1,35	1,29	1,20

A Tabela 2 mostra que o fluido sintético apresentou a menor tensão superficial (39% menor que a da água), indicando que o fluido tem maior capacidade de molhabilidade por possuir maior concentração de tensoativos, o que confere também maiores características adsorptivas.

Tabela 2 – Tensão superficial dos fluidos a 25°C.

Fluido	Ângulo de torção (°)	Tensão superficial (N/m)
Água	41	0,0756
Fluido 1	28	0,0515
Fluido 2	27	0,0496
Fluido 3	25	0,0459

Nota-se na Tabela 3 que o fluido sintético (3) apresentou-se como melhor lubrificante, pois teve uma perda de massa do disco ~55% menor se comparado aos fluidos semissintéticos. A perda de massa do pino foi reduzida (5 a 15% da perda de massa do disco) e esperada, já que simula a ferramenta de corte durante a usinagem no par tribológico peça-ferramenta. Apesar disso, pode-se inferir que a ferramenta também se desgasta, acarretando em perda de revestimento e até de substrato.

Tabela 3 – Perdas de massa devido ao desgaste do pino e do disco (Variabilidade entre 0,2 e 13,7%).

	Diferença de massas [g]		
	Fluido 1	Fluido 2	Fluido 3
Disco	0,0097	0,0110	0,0046
Pino	0,0006	0,0006	0,0007

O fluido sintético, menos viscoso, apresentou-se como melhor lubrificante se comparado aos fluidos semissintéticos, mais viscosos. Este efeito pode ser explicado pela menor tensão superficial do fluido sintético, o que indica melhor molhabilidade, adsortividade e, portanto, menor frequência do fenômeno de inanição. Assim, pode ter sido gerado um filme de fluido entre o pino e o disco que dificultou o processo de desgaste, mesmo contendo menor viscosidade em relação aos outros fluidos analisados.

Conclusões

A viscosidade dos fluidos semissintéticos apresentou grande sensibilidade ao aumento de temperatura, podendo ocasionar variações de comportamento em operações de usinagem que atinjam elevadas temperaturas.

A tensão superficial pode ser decisiva no desempenho lubrificante de fluidos de corte, sobrepondo-se inclusive ao efeito da viscosidade, pois menores tensões geram melhor molhabilidade e adsortividade, formando filmes fluídicos na interface do par tribológico.

Estudos das propriedades físico-químicas dos fluidos de corte no processo de usinagem, em que elevadas temperaturas e pressões estão presentes, são essenciais ao desenvolvimento de novas formulações de novos fluidos, sobretudo para atender aos novos requisitos de sustentabilidade sem detrimento da produtividade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao GPU, Grupo de Pesquisa em Usinagem, da UNESP Campus de Ilha Solteira por todo suporte, à Blaser Swisslube do Brasil Ltda pelo fornecimento dos fluidos de corte e à Villares Metals S/A pelo fornecimento do material para os corpos-de-prova.

Referências Bibliográficas

- Alves, S.M., “Adequação ambiental do processo de retificação através de um novo conceito de fluido de corte”, Tese de Doutorado, USP-Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP, 200p., 2005.
- Barker, D.C., Johnston, G.J., Spikes, H.A., Bünemann, T.F., “EHD film formation and starvation of oil-in-water emulsions”, *Tribology Transactions*, Vol.36, pp.565–572, 1993.
- Bezerra, A.A., “Estudo do desgaste no roscamento com alta velocidade em ferro fundido”, Tese de Doutorado, USP-Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP, 188p., 2003.
- Cambiella, A., Benito, J.M., Pazos, C., Coca, J., Hernández, A., Fernández, J.E., “Formulation of emulsifiable cutting fluids and extreme pressure behavior”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.184, pp.139-145, 2007.
- Chen, U.C., Liu, Y.S., Chang, C., Lin, J.F., “The effect of the additive concentration in emulsions to the tribological behavior of a cold rolling tube under sliding contact”, *Tribology International*, Vol.35, pp.309–320, 2002.
- Cruz, T., “Com investimentos de R\$ 90 milhões, fábrica da Volkswagen em São Carlos inaugura nova usinagem”, [S.I.: s.n., 2012], Disponível em: <<http://www.omundodausinagem.com.br>>, Acesso em: 10 jul. 2012.
- Fernandes, U.B., “Análise de métodos de lubri-refrigeração aplicados no processo de retificação cilíndrica interna de mergulho em aços endurecidos”, Tese de Doutorado, UNESP-Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru-SP, 163p., 2007.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., Silva, M.B., “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Editora Blucher, São Paulo-SP, 371p., 2009.
- Pegado, R.M., “Novas formulações de lubrificantes a partir de óleos básicos regionais”, Monografia, UFRN-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 93p., 2004.
- Ratoi-Salagean, M., Spikes, H.A., Hoogendoorn, R., “The design of lubricious oil-in-water emulsions”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol.211, pp.195–208, 1997.
- Schmid, S.R., Wilson, W.R.D., “Lubrication mechanisms for oil-in-water emulsions”, *Lubricant Engineering*, Vol.52, pp.168–175, 1996.
- Shaw, M.C., “Metal Cutting Principles”, Editora Oxford University Press, Estados Unidos, 672p., 2004.
- Usinagem-Brasil: Novos motores Ford e VW serão usinados no sistema MQL, Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br>>, Acesso em: 10 jul. 2012.