

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS FLUIDOS EMULSIONÁVEL E INTEGRAL NO TORNEAMENTO DO AÇO ABNT 8640

*Wisley Falco Sales**

*Gilmar Guimarães***

*Álison Rocha Machado***

* Depto. de Eng. de Mecânica/Mecatrônica

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas

E-mail: wisley@pucminas.br

** Departamento de Eng. Mecânica

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

E-mail: alissonm@mecanica.ufu.br

Resumo

Este trabalho objetivou a verificação experimental da relação entre a capacidade refrigerante dos fluidos, a temperatura na interface cavaco-ferramenta, medido pelo método termopar peça-ferramenta, a força de corte, medido por meio de uma plataforma piezométrica Kistler e a rugosidade da superfície da peça, avaliada pelo parâmetro R_a . Para isto, a refrigeração foi quantificada utilizando-se de um método próprio. O teste foi realizado para os fluidos emulsionável, na concentração de 5% e integral. Também foi utilizado para efeito comparativo a condição a seco. As curvas de resfriamento ao longo do tempo, de um corpo de prova padrão foram utilizadas para classificação dos fluidos e por meio do método da capacitância foi determinado o coeficiente convectivo de troca de calor, h . Foram realizados testes experimentais de usinagem no torneamento do aço ABNT 8640. Os resultados mostraram que o melhor fluido refrigerante nem sempre gera menores temperaturas de corte e que o melhor lubrificante foi o integral.

Palavras-chave: Fluidos de corte, Refrigeração, Forças de corte, Rugosidade.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento preciso das temperaturas envolvidas na interface cavaco-ferramenta é essencial para o dimensionamento e/ou seleção das ferramentas de corte empregadas nos processos de usinagem. Os valores máximos da temperatura se situam em regiões específicas, próximos à aresta de corte, onde as tensões atuantes são extremamente elevadas (Trent, 1991).

Segundo Shaw (1984), como refrigerantes os fluidos de corte diminuem a temperatura de corte, tanto pelo aumento da dissipação de calor (refrigeração), como também pela redução da geração de calor (lubrificação).

Para caracterizar um fluido de corte quanto às suas capacidades refrigerantes, qualificá-lo relativamente, e ranqueá-lo dentro de um conjunto de fluidos testados experimentalmente, o melhor indicador é a temperatura de corte.

Acessar a interface cavaco-ferramenta para medir a temperatura ainda é objeto de diversos estudos. Vários métodos têm sido utilizados para se determinar a temperatura de usinagem, mas todos sem exceção apresentam limitações. Entre outros, pode-se citar os seguintes (Machado e Da Silva, 1993 e De Melo, 1998):

- termopar ferramenta-peça;
- mapeamento por inserção de diversos termopares no corpo da ferramenta, próximos à superfície de saída;
- Medição indireta por meio de vernizes térmicos;
- medição de calor por radiação;
- medição por técnicas metalográficas;
- Pós químicos e,
- Técnicas de problemas inversos.

A caracterização da capacidade lubrificante dos fluidos pode ser realizada em ensaios com ou sem usinagem. Entre os que não envolvem usinagem pode se destacar a esclerometria retilínea, uma potente ferramenta no estudo do comportamento dos materiais quanto ao desgaste mas a sua aplicação na usinagem ainda está em desenvolvimento. Enquanto entre os que envolvem usinagem destacam-se a esclerometria pendular e a medição da força de corte (Sales, 1999).

Atualmente existem diversos fabricantes de fluidos de corte disponíveis no mercado. Cada um possui a sua formulação, processo e faixa de aplicação recomendada. Avaliar a performance de um fluido e fazer com segurança a sua classificação em relação aos demais não é uma tarefa das mais fáceis. A grande dificuldade resulta do fato da usinagem ser extremamente sistêmica e de elevada sensibilidade. A pequena variação de um parâmetro pode promover elevadas alterações nos demais sob avaliação.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1. MEDIÇÃO DA CAPACIDADE REFRIGERANTE

Atualmente se faz a avaliação da capacidade refrigerante de fluidos de corte via teste colorimétrico que é um método realizado estaticamente. A primeira fase deste trabalho consistiu em propor e testar um ensaio de características dinâmicas, com objetivo de determinar a capacidade de refrigeração de cada fluido de corte.

Foram utilizados 2 tipos de fluidos: integral e emulsionável com as seguintes características:

- **Mineral Integral:** Apresenta boas propriedades lubrificantes e anticorrosivas, mas uma fraca condutividade térmica (baixo calor específico);
- **Emulsionável:** Apresenta elevado calor específico, com boa condutividade térmica, mas seu poder lubrificante é considerado fraco. Contém na sua formulação aditivos, à base de sódio, que reduzem a tensão superficial das bolhas de vapor que eventualmente se formam em elevadas temperaturas, tornando-as mais fáceis de serem rompidas.

A condição a seco foi também utilizada para efeitos comparativos.

Foi desenvolvido um método de medição da capacidade de refrigeração dos fluidos de corte. O aparato experimental é esquematizado na Figura 1.

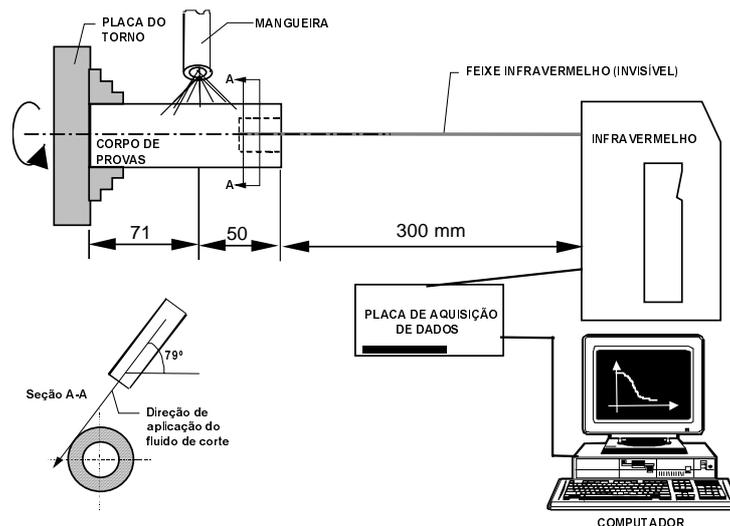


Figura 1 - Esquema da aquisição com fluido jogado tangencialmente à peça.

Consiste em aquecer um corpo de provas de aço ABNT NB 8640, por meio de um forno de resistências elétricas, até uma temperatura de 350°C, por 1 hora. Então o corpo é retirado do forno e fixado na placa de um torno mecânico. Para dar uma característica dinâmica ao ensaio, a árvore do torno foi colocada a girar a uma rotação de 150 rpm. O fluido de corte, por meio de um sistema forçado de alimentação, com vazão ajustada em 9 l/min é jogado sobre o corpo de provas.

A temperatura do corpo de provas é registrada por um termômetro infravermelho com diâmetro de foco de 21 mm e por meio de uma saída analógica/digital, o sinal é enviado a uma placa de aquisição, instalada em um microcomputador (ver Figura 1). A aquisição se iniciava quando a temperatura medida na superfície, no interior do furo no corpo de prova, atingisse 300°C e ela parava quando esta temperatura fosse inferior a 40°C.

A Figura 2 mostra o corpo de provas utilizado no ensaio.

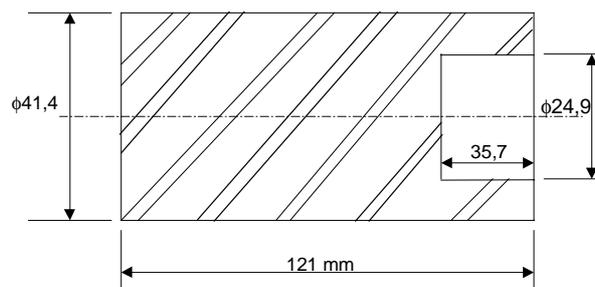


Figura 2 - Corpo de provas utilizado nos ensaios de capacidade refrigerante dos fluidos.

Aplicou-se o critério “Chauvenet” de rejeição de dados (Wonnacot e Wonnacot, 1985), com a finalidade de retirar os “pontos de pico e de vale” que aconteciam devido à erros presentes no processo tais como vibração, oscilação magnética e interferências eletromagnéticas externas. Um gráfico de variação da temperatura no tempo é obtido, para cada fluido em teste.

A técnica de medição por sensor infra vermelho usa a emissividade do corpo do qual a temperatura está sendo medida, e esta é variável com a temperatura (Siegel e Howel, 1972). Para levar em consideração esta variação foi feito uma calibração do sensor infra vermelho com a emissividade ajustada em 1 ($\epsilon = 1$).

2.2. TEMPERATURA NA INTERFACE CAVACO-FERRAMENTA

Novamente com o objetivo de investigar a capacidade de refrigeração dos fluidos de corte, agora durante o processo de usinagem, foram realizados ensaios de medição de temperatura média na interface cavaco-ferramenta, no torneamento.

O objetivo dessa etapa é verificar a existência de uma relação entre a classificação dos fluidos, determinada pelo método do infravermelho descrita anteriormente, sem usinagem, com a classificação determinada pelo método do termopar ferramenta-peça, com usinagem.

Empregou-se um medidor de temperatura desenvolvido por Fernandes (1993), que está fundamentado no princípio de funcionamento dos termopares. A junta quente do termopar está localizada na interface cavaco-ferramenta. Durante a usinagem, o calor gerado promove elevação local da temperatura, o que gera uma força eletro-motriz, *fem*, proporcional à diferença entre as temperaturas da junta quente e a ambiente. Este sistema de medição é conhecido com o método do termopar ferramenta-peça. Os materiais da peça e da ferramenta devem ser condutores de eletricidade.

Torneou-se o aço ABNT NB 8640. Utilizou-se para isto um cilindro de 82 mm sob quatro velocidades de corte diferentes (24, 61, 154 e 244 m/min). O avanço foi de 0,079 mm/rev e a profundidade de corte de 1 mm. Utilizou-se ferramentas de metal duro, da classe P35. O fluido de corte foi aplicado na posição sobre cabeça, sobre o plano de cisalhamento primário, conforme mostrado na Figura 3. Utilizando-se do método termopar peça-ferramenta previamente calibrado, fez-se a aquisição do valor médio de temperatura medido durante a usinagem.

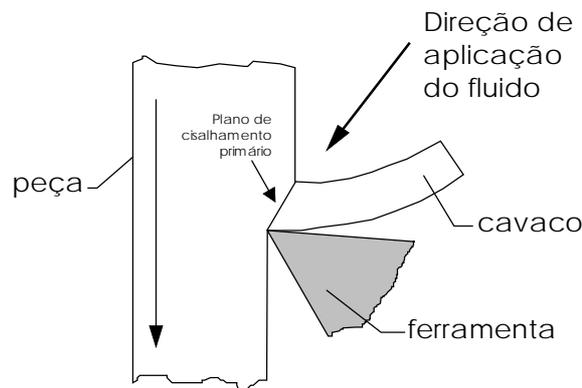


Figura 3 - Direção de aplicação do fluido de corte

2.3. MEDIÇÃO DA FORÇA DE CORTE

A velocidade de corte, v_c , foi variada em: 8,6; 27,7; 86,2; 172,4; 218,6 e 277 m/min.

O avanço, f , e a profundidade de corte foram mantidos fixos em 0,138 mm/rev e 1 mm, respectivamente.

Foram utilizadas as condições a seco e os fluidos emulsionável na concentração de 5% e integral.

O material da peça foi o aço ABNT NB8640, com 98 mm de diâmetro por 500 mm de comprimento com dureza Vickers média de $HV = 290 \text{ kgf/mm}^2$.

O torno mecânico utilizado foi o ROMI Maxi 520 II, com variação discreta de rotações do eixo-árvore.

As ferramentas de corte utilizadas foram de metal duro, especificação ISO P35, código SQNR 120408 - NMA, com superfície de saída lisa, revestidas com TiN, fabricadas pela firma Sandvik Coromant. O suporte porta-ferramentas foi o CSBPR 2525M12, também da Sandvik. O conjunto montado, suporte e ferramenta, forneceu a seguinte geometria de corte: $\alpha_0 = 5^\circ$; $\beta_0 = 79^\circ$; $\gamma_0 = 6^\circ$; $\chi_r = 75^\circ$; $\varepsilon_r = 90^\circ$; e $\lambda_s = 0^\circ$.

Foi medida a força de corte, F_c , utilizando um dinamômetro, que consiste de uma plataforma piezoelétrica, com sensores de quartzo, fabricado pela Kistler, modelo 9265B.

Em cada condição de corte, e de aplicação de fluido, foi usinada uma superfície com 10 mm de percurso de avanço. Um programa de computador foi ajustado para aquisição de dados a uma taxa de 100 Hz. Foi considerado o valor médio da força de corte.

2.4. RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE

Os testes de força de usinagem foram realizados em um percurso de avanço com aproximadamente 10 mm. As superfícies geradas na peça foram avaliadas quanto à topografia da superfície, por meio do parâmetro R_a . Foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo, modelo SurfTest. Ajustou-se no instrumento, um "cut off" de 0,8 mm. Em cada superfície foram efetuadas 3 medidas, equidistantes, e considerado o valor médio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. CAPACIDADE REFRIGERANTE DOS FLUIDOS

A Figura 4 mostra as curvas de resfriamento para condições investigadas.

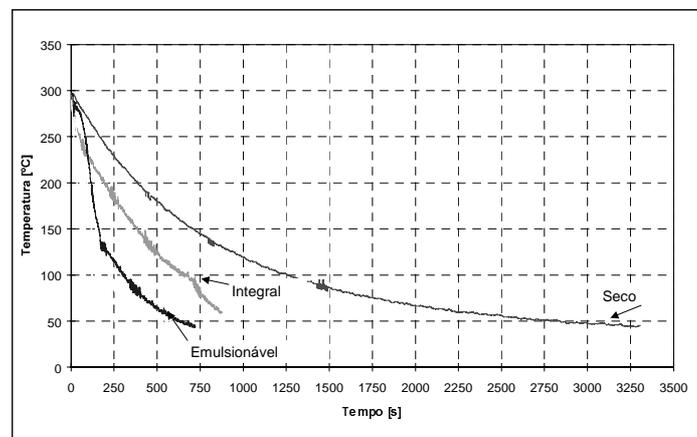


Figura 4 - Curvas de resfriamento das condições investigadas.

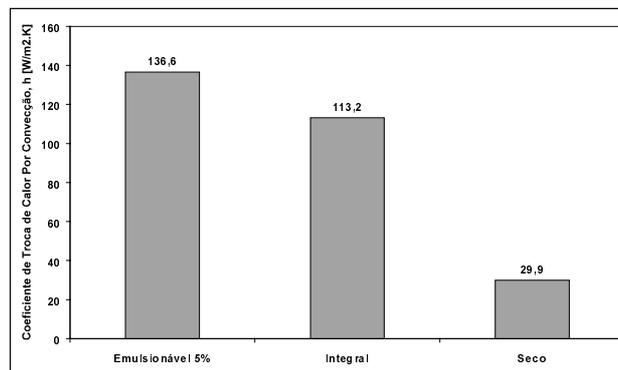
A classificação dos fluidos quanto a capacidade de resfriamento encontrada em ordem crescente foi: a seco, integral e emulsionável.

Para quantificar a capacidade refrigerante dos fluidos foi calculado o coeficiente de troca de calor por convecção, h . Utilizou-se o Método da Capacitância, que se aplica aos casos em que não há variação espacial de temperatura no corpo. O número adimensional de Biot, Bi , deve ser menor que 0,1 e a determinação de h é realizada com um erro em torno de 5% (Incropera, 1996). Ele indica a existência ou inexistência de um gradiente de temperatura interno (Sissom e Pits, 1979). Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Determinação de Bi e h para cada fluido testado.

Condição	t [s]	$T_i - T_\infty$ [K]	$T_i - T_\infty$ [K]	Bi	h [W/m ² .K]
Seco	3305	12	272	0,0094	29,9
Integral	873	12	272	0,0358	113,2
Emulsionável 5%	722	12	272	0,0432	136,6

A Tabela 1 mostra que o módulo de Bi, com exceção do fluido sintético1 na concentração de 5%, foi sempre menor que 0,1. Isto mostra que o Método da Capacitância pode ser aplicado e o valor de h pôde ser calculado. A Figura 5 mostra o gráfico dos valores de h em ordem decrescente.



A Figura 5 mostra o gráfico dos valores de h em ordem decrescente.

A Figura 5 mostra que o fluido emulsionável apresenta a maior capacidade refrigerante enquanto a condição a seco, a menor. Com os dados de h pode-se estabelecer relações entre as capacidades refrigerantes.

O cálculo de h , por meio do Método da Capacitância, permitiu estabelecer fisicamente a capacidade refrigerante dos fluidos.

3.2. TEMPERATURA DA INTERFACE CAVACO-FERRAMENTA

A Figura 6 mostra a temperatura média na interface cavaco-ferramenta, medida pelo método termopar ferramenta-peça, quando aplicando os fluidos de corte na posição sobre-cabeça convencional e a seco.

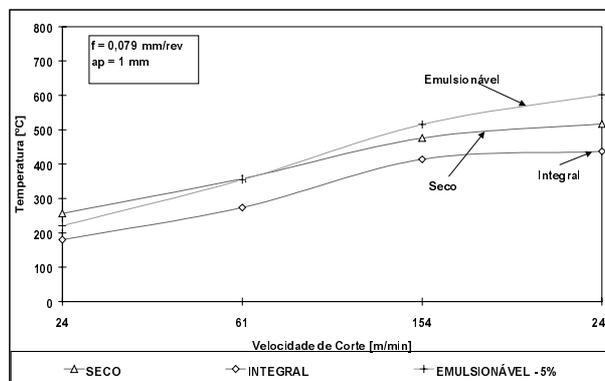


Figura 6 - Temperatura de usinagem medida pelo método do termopar ferramenta-peça.

Surpreendentemente, os fluidos que apresentaram maior poder refrigerante nos ensaios anteriores (ver Figura 4) foram os que proporcionaram maiores temperaturas na interface cavaco-ferramenta durante a usinagem, com exceção da inversão da operação a seco e utilizando o fluido integral. Observa-se que menores temperaturas foram obtidas quando a usinagem foi realizada a seco e com o fluido integral.

A análise comparativa dos valores de temperaturas, medidas nesta etapa, não representam intrinsecamente uma maior ou menor capacidade refrigerante de um fluido de corte. No processo de usinagem, um fluido que retira mais calor pode promover uma redução no efeito de amolecimento natural do metal da peça. Com isto, ele pode manter a sua resistência em níveis maiores que outro fluido menos refrigerante, consumindo mais energia para o cisalhamento. Isto impede a redução natural da temperatura na interface cavaco-ferramenta. Por outro lado, um fluido com baixa capacidade refrigerante, mas com boa capacidade lubrificante, pode reduzir o atrito na interface e, conseqüentemente, as forças, o calor gerado e a temperatura.

Os fluidos que refrigeram mais rapidamente resfriam instantaneamente as regiões próximas da zona de cisalhamento primário, conforme indicado na Figura 4. Isto impede ou diminui o amolecimento natural do metal pelo aumento da temperatura. Com isto, a resistência do metal permanece elevada, promovendo elevação das forças e potências de corte e, conseqüentemente, da geração de calor e da temperatura média registrada na interface cavaco-ferramenta. Os fluidos com menores capacidades de refrigeração (integral, por exemplo) resfriam relativamente menos esta zona, encruando menos o metal e, aliado à sua boa lubrificidade, fazem com que as forças e potências de usinagem reduzam e, conseqüentemente, a geração de calor e a temperatura média medida na interface cavaco-ferramenta.

Observa-se na Figura 6 que, em toda a faixa testada de velocidades de corte, o fluido integral foi o que apresentou menores temperaturas. A baixa capacidade refrigerante deste fluido, indicada nas Figuras 4, não impediu o efeito de amolecimento (redução da resistência ao cisalhamento), além da possibilidade de sua boa qualidade lubrificante estar reduzindo a geração de calor na interface. Na Figura 4, a condição a seco apresentou menor poder refrigerante que o integral. Isto, com certeza, permite maior poder de amolecimento do material (menor resistência ao cisalhamento) que o fluido integral. Entretanto, o fluido integral apresentou temperaturas inferiores que a condição a seco. Isto é uma evidência forte da ação lubrificante do fluido integral, que reduz o atrito e, portanto, o calor gerado na interface cavaco-ferramenta. Conseqüentemente, a temperatura é diminuída.

3.3. FORÇA DE CORTE

A Figura 7 mostra os resultados encontrados para a força de corte aplicando os fluidos de corte na posição sobre-cabeça .

A análise da Figura 7 mostra que em velocidades de corte muito baixas, onde a presença da APC é evidente, a condição a seco, geralmente, apresenta melhores resultados de forças. Nestas condições as dimensões da APC são possivelmente maiores quando usinando sem fluido, alterando a geometria da superfície de saída mais acentuadamente. Isto torna o ângulo de saída mais positivo e reduz as forças de usinagem nesta região.

O aumento da velocidade de corte promove a elevação da temperatura da interface cavaco-ferramenta (ver Figura 6). O fluido emulsionável possui aditivos na sua formulação que possuem propriedade de reduzir o efeito do bolsão de vapor (que se forma e atua como uma barreira impedindo o seu acesso do fluido e comprometendo a sua eficiência). Nota-se a melhora no desempenho desse fluido principalmente em velocidades de corte superiores a

$v_c=172$ m/min quando as temperaturas da interface tornam-se suficientes para ativar a ação dos aditivos presentes na sua formulação e melhorar as suas propriedades lubrificantes. Em baixas v_c o emulsionável apresentou os piores resultados.

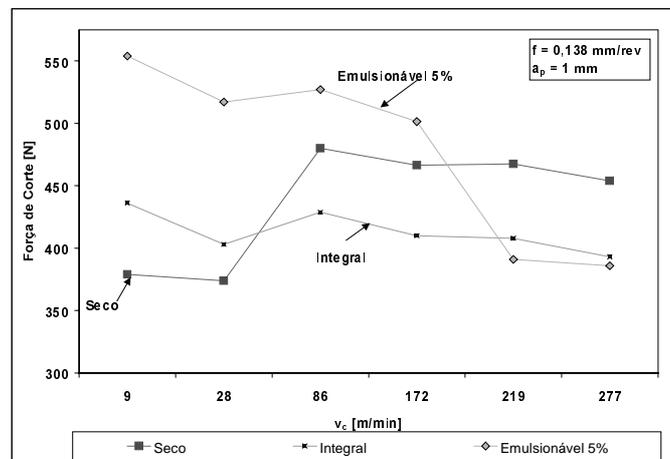
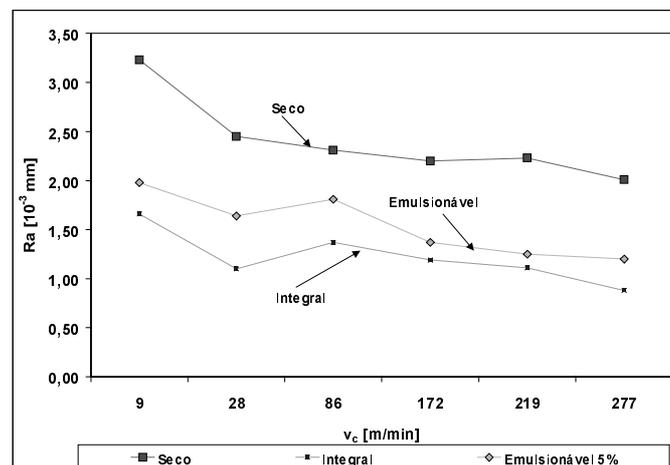


Figura 7 - Forças de corte.

O fluido mineral integral que apresenta boas propriedades lubrificantes, em toda a faixa de velocidades de corte se situou entre os melhores resultados. Entretanto, nas velocidades elevadas a formação de vapores e o risco de inflamar impede o uso desses fluidos.

3.4. RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DA PEÇA

A Figura 8 mostra os resultados encontrados para a rugosidade da superfície da peça, avaliada pelo parâmetro R_a , aplicando os fluidos de corte na posição sobre-cabeça .



8 - Rugosidade da superfície da peça, avaliado por meio do parâmetro R_a .

A análise da Figura 8 mostra claramente que os melhores resultados de acabamento da superfície foram para o fluido integral, enquanto que os piores foram para a condição a seco. O fluido emulsionável se posicionou na posição intermediária.

Dessa figura fica evidente que, em baixas velocidades de corte, independentemente da condição de lubrificação, a presença da APC piora muito o acabamento da superfície. O aumento da velocidade de corte reduz a rugosidade, melhorando o acabamento. Isso se deve à

elevação da temperatura na interface e redução das forças de corte, facilitando o corte, reduzindo vibrações. Enfim, reduzindo R_a .

Analisando do ponto de vista das temperaturas envolvidas, nas faixas de velocidades de corte utilizadas industrialmente, deve-se escolher o fluido que gere menos calor (para aumento da vida da ferramenta) e que apresente, do ponto de vista econômico, uma boa relação custo-benefício. Outros fatores, como integridade superficial da peça, manutenção do fluido e desgastamento da peça, devem ser também considerados e analisados num contexto mais amplo.

Deve-se ressaltar que neste item as temperaturas consideradas foram aquelas obtidas pelo método do termopar ferramenta-peça, isto é, da zona de cisalhamento secundária, ou zona de fluxo. Para redução de desgastes termicamente ativados (para aumento de vida), entretanto, deve-se analisar também a capacidade de reduzir a temperatura da ferramenta em outras regiões importantes, como a superfície de folga, e o gradiente de temperatura tem um papel importante. Portanto, ensaios de vida específicos podem ser essenciais.

4. CONCLUSÕES

- O Método da Capacitância mostrou-se adequado para a determinação física do coeficiente de troca de calor por convecção, h .
- A capacidade de troca de calor por convecção em ordem crescente foi: seco, integral e emulsionável.
- O óleo integral apresentou uma reduzida capacidade de troca de calor. Ele refrigera 280% mais que a seco.
- As temperaturas encontradas na interface cavaco-ferramenta, em ordem crescente, foram nas seguintes condições: integral, seco e emulsionável.
- As menores temperaturas foram encontradas para o fluido integral. Enquanto, as maiores para o emulsionável.
- A direção de aplicação do fluido sobre o plano de cisalhamento primário resfria essa região, impedindo o efeito de amolecimento com a elevação da temperatura e aumentando a quantidade de energia necessária para prosseguir os mecanismos de deformação. Conseqüentemente há o aumento da temperatura na interface cavaco-ferramenta. Isto é mais acentuado com o aumento da capacidade de troca de calor do fluido.
- O fluido de maior capacidade de troca de calor foi o que apresentou maior valor de temperatura na interface cavaco-ferramenta.
- De uma forma geral o fluido integral apresentou os melhores resultados de força de corte em velocidades fora da região de aparecimento da APC. Em velocidades superiores a 80 m/min, devido a ativação dos aditivos presentes no fluido emulsionável promoveram resultados ligeiramente superiores ao integral.
- A condição a seco apresentou os piores resultados de rugosidade.
- Considerando todos os ensaios realizados pode-se afirmar que o fluido mineral integral é o melhor lubrificante, seguido pelo emulsionável.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DE MELO, A.C.A. 1998, "Estimação da Temperatura de Corte Utilizando Problemas Inversos em Condução de Calor", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- FERNANDES, J.R.S. 1993, "Projeto e Fabricação de um Dispositivo para Medição de Temperatura de Corte no Processo de Torneamento", Relatório Técnico, Projeto de Iniciação Científica, CNPq – UFU, Uberlândia, Minas Gerais.
- MACHADO, A.R. e DA SILVA, M.B. 1993, "Usinagem dos Metais", Editora UFU, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, Brasil.
- INCROPERA, F.P. and DEWITT, D.P., 1996, "Fundamentals Heating Mass Transfer", Ed. John Wiley & Sons, 4th. Edition.
- MOTTA, M.F. 1994, "Influência do Fluido de Corte no Torneamento do Aço NB 8640", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- SHAW, M.C. 1984, "Metal Cutting Principles", Oxford University Press, ISBN 0-19-859002-4.
- SIEGEL, R. and ROWEL, J.R. 1972, "Thermal Radiation Heat Transfer", Ed. McGraw-Hill Kogakusha.
- SISSOM, L.E. e PITTS, D.R. 1979, "Fenômenos de Transporte", Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Brasil, 765p.
- TRENT, E.M. 1991, "Metal Cutting", 3rd Edition, Butterworths-Heinemann Ltd, 273 pg., ISBN 0-7506-1068-9.
- WONNACOT, R.J e WONNACOT, T.H. 1985, "Fundamentos de Estatística", Livros Técnicos e Científicos S.A.

6. AGRADECIMENTOS

Às firmas Villares Metals, Twill, Sandvik e Shell pelo fornecimento dos aços utilizados nos ensaios, das ferramentas para a furação e torneamento e dos fluidos, respectivamente.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais, FAPEMIG, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela financiamento da pesquisa.