

ESTUDO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E LUBRIFICANTES DE SISTEMAS ALTERNATIVOS NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Ítalo Clemente Rodrigues, italoclemente@gmail.com
Étory Madrilles Arruda, etory@msn.com
Thiago Castro Freitas, thiagocastrofreitas@hotmail.com
Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br

¹Universidade Federal de São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170 – Centro, São João del Rei, Minas Gerais, Brasil.

Resumo: Num processo de corte, a escolha do sistema de lubrificação a ser utilizado apresenta grande importância para a diminuição do atrito e da temperatura de corte, porque pode facilitar o processo de remoção de material. Alternativas de lubrificação nas operações de usinagem são buscadas constantemente para gerar formas mais corretas e menos agressivas ao meio ambiente, sem afetar a produtividade e o acabamento superficial da peça. O objetivo deste trabalho foi analisar os esforços de corte, a temperatura de corte e a rugosidade de corpos de prova do aço API 5L X70 na operação de torneamento, utilizando três sistemas alternativos de lubrificação, a saber; emulsão, MQL - mínima quantidade de lubrificante e ar gelado e compará-los com experimentos a seco. Os resultados mostraram que o sistema de lubrificação com emulsão proporcionou os menores esforços de corte e as menores temperaturas, no entanto, gerou as maiores rugosidades. Por outro lado, o sistema de lubrificação com MQL proporcionou esforços de corte e temperaturas maiores que o sistema com emulsão, porém, com menores rugosidades.

Palavras-chave: torneamento, aço API 5L X70, esforços de corte, rugosidade, temperatura.

1. INTRODUÇÃO

O processo de torneamento é um processo de usinagem bastante utilizado atualmente pela indústria de manufatura metal mecânica. A grande diversidade de tarefas possíveis de serem realizadas através do torneamento, utilizando apenas uma máquina, torna o processo bastante atrativo para a indústria.

Conforme descrito por Ferraresi (1977), o torneamento é um processo que tem por objetivo a obtenção de superfícies de revolução, utilizando uma ou mais ferramentas monocortantes. A peça a ser trabalhada, presa no torno mecânico, gira ao redor do seu próprio eixo enquanto a ferramenta de trabalho é deslocada de forma paralela ou transversal ao eixo da peça, de acordo com a forma desejada.

O estudo dos esforços de corte no torneamento facilita a compreensão do processo aplicado. De acordo com Bartarya e Choudhury (2012), os esforços de corte podem proporcionar um melhor entendimento do processo de usinagem por se relacionarem diretamente às condições de corte e às condições das ferramentas utilizadas durante a usinagem.

Segundo Diniz *et al.* (1999), Machado *et al.* (2009) e Ferraresi (1977), o conhecimento dos esforços de corte e seu comportamento são muito importantes, pois permitem que sejam estimados a potência necessária para o corte, as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte e permitir o desenvolvimento de novas coberturas e geometrias otimizadas para o processo de torneamento. Permite também determinar o rendimento da máquina para diferentes cargas e velocidades de trabalho. O entendimento dos esforços de corte pode possibilitar, ainda, a obtenção de tolerâncias apertadas, influenciando assim, a viabilidade econômica do processo de usinagem.

A rugosidade pode influenciar diretamente no tempo de vida de um componente mecânico, portanto estudar e entender o comportamento da rugosidade durante o torneamento, e conseguir determinar a influência de parâmetros comuns de usinagem na rugosidade, se mostra muito importante.

De acordo com Acayaba e Escalona (2015), a fim de alcançar os valores nominais de rugosidade especificados pelo projeto de engenharia, a combinação certa de parâmetros de usinagem deve ser escolhida durante a fabricação. Asiltürk e Akkus (2011) estudaram a rugosidade nos parâmetros Ra e Rz durante o torneamento do aço AISI 4140 e nos resultados encontrados não foi verificado nenhuma influência significativa da velocidade de corte nas rugosidades obtidas.

O aço API 5L X70, utilizado nos experimentos deste trabalho, é aplicado no setor petrolífero em forma de tubos. Assim, o torneamento é um dos processos de fabricação empregados na manufatura destes tubos. Normalmente, os produtos manufaturados por usinagem são luvas e pontas de tubos, que possuem regiões onde são usinadas roscas extremamente complexas e que necessitam de excelente acabamento superficial a fim de garantir uma vedação perfeita nestas regiões. Desta forma, o objetivo deste trabalho consiste em analisar os esforços de corte, a temperatura do inserto durante a usinagem e a rugosidade de corpos de prova do aço API 5L X70 na operação de torneamento, utilizando três diferentes sistemas de lubrificação (emulsão, MQL - mínima quantidade de lubrificante e ar gelado), comparados com experimentos sem lubrificação (seco).

2. METODOLOGIA

Os experimentos de torneamento do aço API 5L X70 foram realizados utilizando um centro de torneamento ROMI GL 240M, que possui potência máxima na árvore de 22,5 kW, rotação máxima de 6.000 rpm e comando CNC Fanuc Oi TD, conforme Fig. (1a). Este centro de torneamento encontra-se alocado no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ.

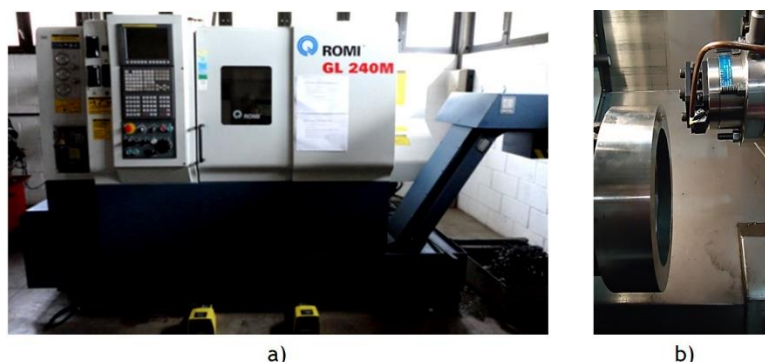


Figura 1. a) Centro de torneamento Romi GL 240M; b) Detalhes do corpo de prova, ferramenta e dinamômetro (Fonte: autoria própria).

Os corpos de prova utilizados foram anéis do aço API 5L X70, material empregado no setor petrolífero em forma de tubos, com a finalidade de extrair petróleo. As dimensões dos corpos de prova eram de 197 mm de diâmetro externo, 150 mm de diâmetro interno e 47 mm de comprimento. O limite de escoamento (690 MPa), o limite de resistência à tração (820 MPa) e a dureza (45 HRC) do aço foram obtidos através de ensaios de tração (ASTM E8/E8M-13a) e dureza (ASTM E18-15), realizados no Laboratório de Corrosão e Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ.

Através de uma análise química de espectrometria ótica, realizada no Laboratório de Ensaios e Análises de Materiais do SENAI de Itaúna-MG, certificado segundo NBR ISO/IEC 17025, verificou-se a composição química do aço. As parcelas dos elementos químicos que compõem o aço API 5L X70, em peso, são apresentadas na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química do aço API 5L X70 (Fonte: autoria própria)

Elementos químicos (% em peso)								
C	Cr	Mn	Mo	Si	P	S	Fe	Outros
0,25	0,94	0,83	0,45	0,24	0,025	0,001	97,144	0,12

Utilizando da metodologia de projeto de experimentos (DOE), os experimentos de torneamento foram aleatorizados por níveis em um planejamento estatístico fatorial multi-níveis e cada condição experimental foi repetida duas vezes, somando um total de dezesseis experimentos. As variáveis de entrada foram o sistema de lubrificação e a velocidade de corte (V_c), conforme Tab. (2). Os dois níveis da velocidade de corte foram definidos, respectivamente, como: uma vez e uma vez e meia o valor da velocidade de corte recomendada pelo fabricante do inserto, visto que, em experimentos preliminares, maiores velocidades de corte ocasionaram a falha prematura da ferramenta. A ferramenta de corte utilizada foi um inserto de metal duro, código ISO TNMG 160408-MF, classe M-15, com revestimento triplo de $TiN+Al_2O_3+Ti(C,N)$, e o porta-ferramentas utilizado possui código ISO DTJNL 2020K 16, ambos da Sandvik Coromant. Em todos os experimentos, os valores do avanço da ferramenta (f) e da profundidade de usinagem (ap) foram mantidos constantes e iguais a 0,2 mm/rot e 1,5 mm, respectivamente.

Tabela 2. Variáveis de entrada com seus respectivos níveis (Fonte: autoria própria).

Variáveis de entrada	Níveis			
	1	2	3	4
Sistema de lubrificação	Emulsão	MQL	Ar gelado	Seco
Velocidade de corte [m/min]	240	360	-	-

A mínima quantidade de lubrificante (MQL) utilizada foi de 60 ml/h do fluido Vascomil MMS. Para o sistema de lubrificação por ar gelado foi utilizado um tubo vórtice da empresa CHP, modelo R-1500, posicionado à 5 mm da ponta da ferramenta, com pressão de ar constante de 7 kgf/cm², vazão de ar de 220 l/min e temperatura média do ar de -7 °C. A emulsão utilizada continha 6% em concentração de óleo e foi aplicada de modo convencional, em abundância. Os experimentos também foram realizados sem o uso dos sistemas de lubrificação, ou seja, a seco, para servir como referência a estes sistemas.

As variáveis de resposta do processo de torneamento foram a força de corte (F_c), a força de avanço (F_f), a força passiva (F_p), as rugosidades nos parâmetros Ra e Rz e a temperatura do inserto durante a usinagem (T_i). Para medição dos esforços de corte foi utilizado um dinamômetro piezoelétrico estacionário Kistler 9272 com quatro canais, um amplificador de sinais Kistler 5070A e o software Dynoware também fornecido pela Kistler.

Para a medição das rugosidades nos parâmetros Ra e Rz foi utilizado um rugosímetro portátil Mitutoyo, modelo Surftest SJ 400, configurado com comprimento de amostragem (cut-off) igual a 0,8 mm, de acordo com a NBR ISO 4287/2002. O procedimento de medição das rugosidades, conforme mostra a Fig. (2a), foi realizado dentro do centro de torneamento, para que não fosse necessária a retirada dos corpos de prova da máquina. Para isto, o rugosímetro foi fixado a um braço articulado.

Para realizar as medições de temperatura do inserto durante a usinagem, um termopar tipo K foi utilizado. Para a alocação do termopar no inserto, um furo de 1,2 mm de diâmetro, direcionado da superfície inferior à superfície de saída do inserto, foi realizado pelo processo de eletroerosão, de forma que o termopar, ao ser inserido no furo pela superfície inferior do inserto, era posicionado à uma distância de 1,0 mm da superfície de saída do inserto. As Figuras (2b) e (2c) mostram, respectivamente, as vistas frontal e lateral do porta-ferramentas com o termopar utilizados nos experimentos deste trabalho.

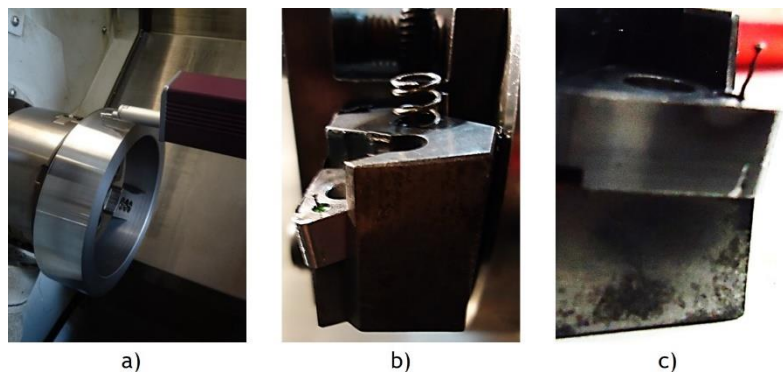


Figura 2. a) Medição de rugosidade; b) Vista frontal do porta-ferramentas com o termopar; c) Vista lateral do porta-ferramentas com o termopar (Fonte: autoria própria).

Os dados das respostas foram analisados estatisticamente através do software Minitab®. Para a geração dos gráficos dos esforços de corte e das temperaturas e obtenção de seus valores médios, empregou-se o software Scilab®. A influência das variáveis de entrada e suas interações sobre as respostas foi verificada utilizando a análise de variância (ANOVA) com 5% de significância (P-valor). Na análise de variância, o parâmetro “F” representa a “relação-F”, que é calculada dividindo a média quadrada ajustada de cada fator pela média quadrada ajustada do erro. Os “P-valores” indicam quais efeitos no sistema são estatisticamente significantes, baseando-se nos resultados experimentais das réplicas. Se o “P-valor” for menor ou igual a α é possível concluir que o efeito é significativo. O valor de α igual a 5% indica o nível de significância, ou seja, a condição de 95% de probabilidade de o efeito ser significativo. O valor de R^2 (adj), também exibido na análise de variância, indica a variabilidade total explicada pelo modelo de regressão após considerar as variáveis significativas.

3. RESULTADOS

3.1. Esforços de corte

A Figura (3) apresenta o comportamento típico dos esforços de corte resultantes dos experimentos de torneamento deste trabalho. A Figura (4) apresenta os resultados dos esforços de corte dos dezesseis experimentos realizados. Os valores dos esforços de corte apresentados na Fig. (4) representam as médias aritméticas de três medições destes esforços, realizadas no início, durante e ao final de cada intervalo de corte. Entende-se por intervalo de corte, o intervalo de tempo em que a ferramenta de corte efetivamente executa o corte do material. Na Figura (3), por exemplo, o intervalo de corte está compreendido, aproximadamente, entre 3 e 35 segundos.

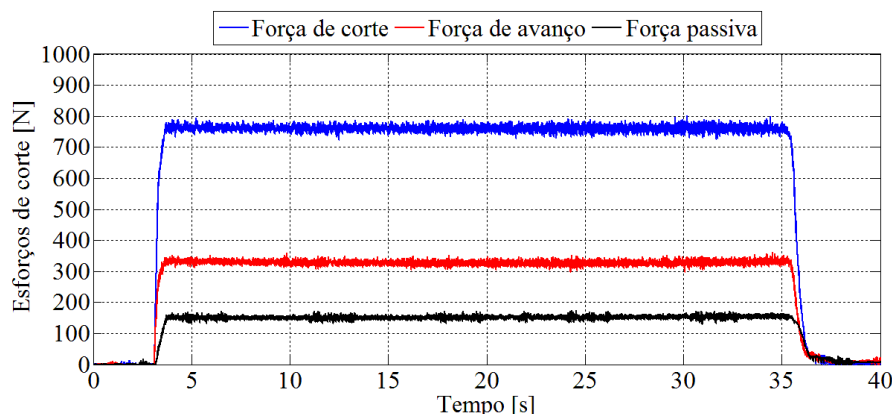


Figura 3. Esforços de corte no torneamento do aço API 5L X70, com $V_c = 240$ m/min, $f = 0,2$ mm/rot, $a_p = 1,5$ mm e sistema de lubrificação a ar gelado (Fonte: autoria própria).

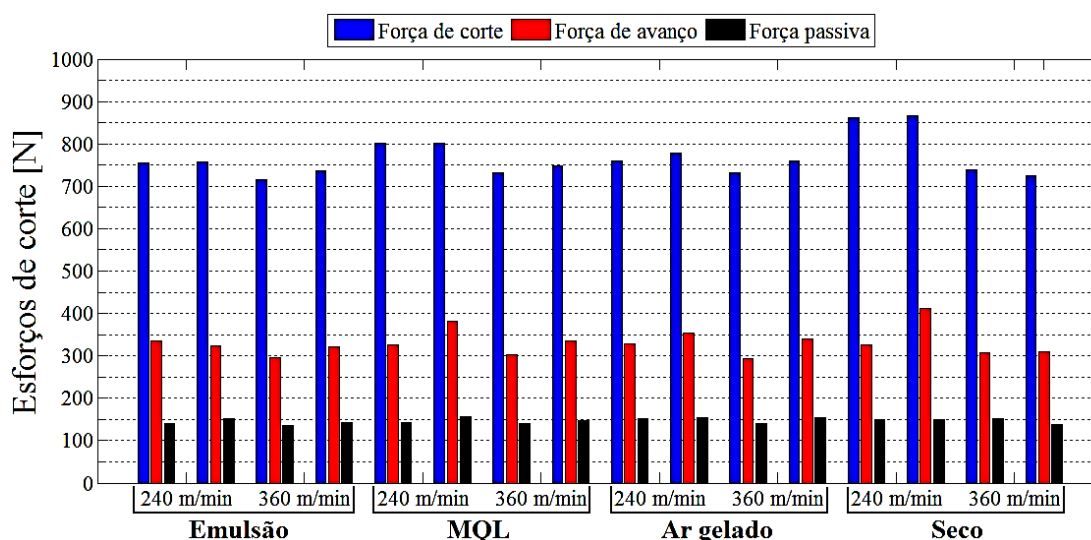


Figura 4. Resultados experimentais dos esforços de corte (Fonte: autoria própria).

De acordo com a Fig. (4), verifica-se, em todos os experimentos, que a força de corte apresentou-se como a maior componente dos esforços de corte, sendo seguida pela força de avanço e pela força passiva, respectivamente. Como a grandeza das velocidades de corte utilizadas neste trabalho são bem maiores que a grandeza das velocidades de avanço, as forças de corte são normalmente maiores que as forças de avanço. Além disso, de acordo com Sadik (2012) e Chinchankar e Choudhury (2013), ao utilizar uma profundidade de usinagem maior que o raio de ponta da ferramenta, como no caso deste trabalho para as condições, $r_e = 0,8$ mm e $a_p = 1,5$ mm, o corte do material é realizado tanto pelo raio de ponta da ferramenta como pela aresta principal de corte, resultando assim, em forças de avanço maiores que forças passivas.

Na condição de usinagem que apresentou a menor de força de corte, isto é, utilizando emulsão e velocidade de corte de 360 m/min, valor encontrado para a força de corte foi 2,4 e 5,3 vezes superior aos valores encontrados para a força de avanço e força passiva, respectivamente. Por outro lado, na condição de usinagem que apresentou a maior de força de corte, isto é, sem a utilização de sistema de lubrificação (seco) e velocidade de corte de 240 m/min, o maior valor encontrado para a força de corte foi 2,1 e 5,8 vezes superior aos valores encontrados para a força de avanço e força passiva, respectivamente.

A Tabela (3) apresenta o resultado da ANOVA para os esforços de corte. Assim, de acordo com o P-valor, pode-se verificar que o sistema de lubrificação, a velocidade de corte e a interação entre eles apresentam significância estatística apenas sobre a força de corte, não apresentando significância estatística sobre a força de avanço e força passiva. Analisando o valor observado da distribuição F para a força de corte, pode-se verificar que a velocidade de corte apresenta grande significância estatística na variação da resposta, contribuindo com 76,5%. Por outro lado, o sistema de lubrificação e a interação entre sistema de lubrificação e velocidade de corte contribuem, apenas, com 11,5% e 12,0% na variação da resposta, respectivamente.

Tabela 3. Análise de variância para os esforços de corte - F_c , F_f e F_p (Fonte: autoria própria).

ANOVA	Força de corte - F_c		Força de avanço - F_f		Força passiva - F_p	
	F	P-valor	F	P-valor	F	P-valor
Sistema de lubrificação	11,73	0,006	0,35	0,790	0,88	0,492
Velocidade de corte	78,05	0,000	5,23	0,052	3,13	0,115
Sistema de lubrificação * Velocidade de corte	12,25	0,006	0,36	0,782	0,02	0,997
R²(Adj)	89,17%		2,39%		0,00%	

A Figura (5) apresenta a influência do sistema de lubrificação e da velocidade de corte sobre a força de corte. Nos experimentos com velocidade de corte de 240 m/min verifica-se que a condição de usinagem a seco foi a que apresentou a maior força de corte com o valor de 867,0 N, tendo as demais condições, emulsão, MQL e ar gelado, apresentado menores valores. O valor de força de corte para o sistema com emulsão foi de 756,3 N. Para o sistema com MQL foi de 802,1 N e para o sistema com ar gelado foi de 769,5 N. Nota-se que os experimentos realizados com emulsão apresentaram o menor valor de força de corte, sendo 12,8% menor que o valor obtido na usinagem a seco.

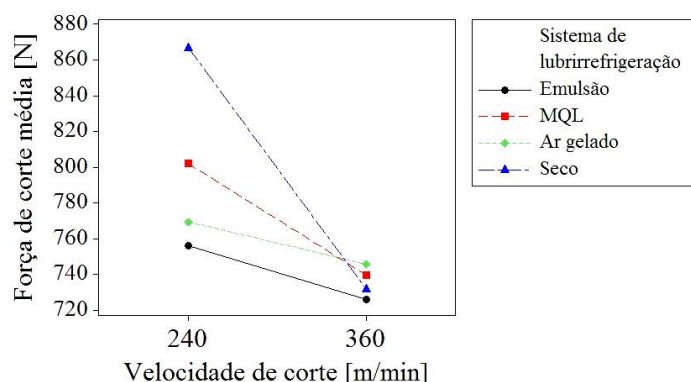


Figura 5. Influência do sistema de lubrificação e da velocidade de corte sobre a força de corte (Fonte: autoria própria).

Ainda de acordo com a Figura (5), para a velocidade de corte de 360 m/min, também é possível verificar que os experimentos realizados com emulsão apresentaram os menores valores de força de corte, sendo seguidos pelos experimentos a seco, com MQL e com ar gelado, respectivamente. O valor de força de corte para os experimentos com emulsão foi de 726,3 N. Para os experimentos a seco foi de 731,8 N. Para os experimentos com MQL foi de 740,0 N e para os experimentos com ar gelado foi de 745,9 N. Desta forma, verifica-se que os sistemas de lubrificação atuaram de forma diferente com o aumento da velocidade de corte. Os experimentos com emulsão e com ar gelado apresentaram uma pequena redução na força de corte de 4% e 3%, respectivamente. Os experimentos com MQL apresentaram uma redução de 7% na força de corte e os experimentos a seco uma redução de 15,6%.

Como observou Khan *et al.* (2009) e de acordo com os resultados de temperatura apresentados neste trabalho (seção 3.3), pode-se afirmar que o aumento da velocidade de corte de 240 m/min para 360 m/min promoveu o aumento do calor gerado na zona de corte, diminuindo a resistência ao cisalhamento do material e justificando os menores valores de força de corte para a velocidade de corte de 360 m/min.

3.2. Rugosidades

A Tabela (4) apresenta o resultado da ANOVA para as rugosidades R_a e R_z . Assim, de acordo com o P-valor, pode-se verificar que o sistema de lubrificação, a velocidade de corte e a interação entre eles apresentam significância estatística sobre ambas as rugosidades R_a e R_z . Analisando o valor observado da distribuição F para ambas as rugosidades R_a e R_z , pode-se verificar que o sistema de lubrificação apresenta grande significância estatística na variação das respostas, contribuindo com 46,3% sobre R_a e 61,2% sobre R_z . Por outro lado, a velocidade de corte e a interação entre sistema de lubrificação e velocidade de corte contribuem, respectivamente, com 21,6% e 32,1% na variação de R_a e com 8,4% e 30,5% na variação de R_z .

Tabela 4. Análise de variância para as rugosidades Ra e Rz (Fonte: autoria própria).

ANOVA	Rugosidade Ra		Rugosidade Rz	
	F	P-valor	F	P-valor
Sistema de lubrificação	437,40	0,000	86,62	0,000
Velocidade de corte	203,79	0,000	11,85	0,009
Sistema de lubrificação * Velocidade de corte	303,33	0,000	43,17	0,000
R²(Adj)	99,38%		96,33%	

A Figura (6) apresenta a influência do sistema de lubrificação e da velocidade de corte sobre as rugosidades Ra e Rz. Analisando a rugosidade Ra (Fig. 6a), verifica-se que o aumento da velocidade de corte de 240 m/min para 360 m/min promoveu uma pequena redução na rugosidade dos experimentos realizados a seco, com MQL e com ar gelado. Nos experimentos a seco a redução foi de 2,1% (0,04 μm). Nos experimentos com MQL a redução foi de 2,9% (0,05 μm) e nos experimentos com ar gelado a redução foi de 3,3% (0,06 μm). Por outro lado, nos experimentos realizados com emulsão, o aumento da velocidade de corte promoveu um acréscimo de 53,6% (1,03 μm) na rugosidade. Os menores valores de rugosidade Ra, 1,69 μm , foram obtidos com velocidade de corte de 360 m/min e com o uso do sistema de lubrificação MQL, sendo seguidos pelos experimentos com ar gelado, 1,78 μm e pelos experimentos a seco, 1,88 μm . Em contrapartida, os maiores valores de rugosidade Ra, 2,95 μm , foram obtidos com velocidade de corte de 360 m/min e com uso de emulsão.

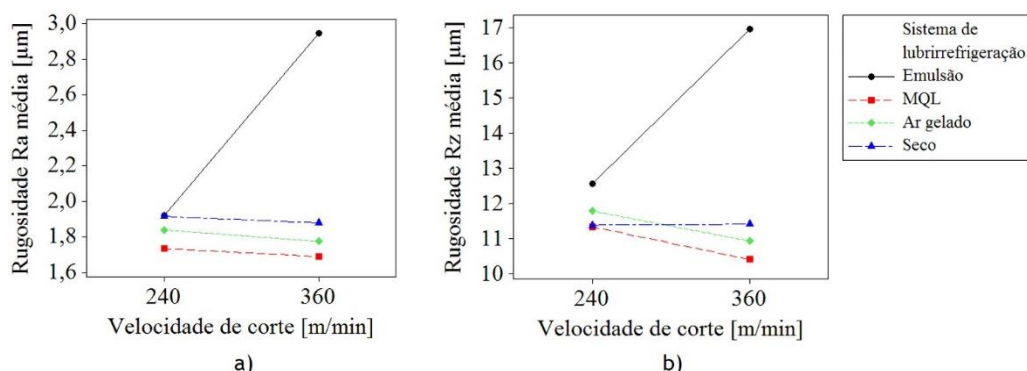


Figura 6. Influência do sistema de lubrificação e da velocidade de corte sobre as rugosidades. a) Rugosidade Ra; b) Rugosidade Rz (Fonte: autoria própria).

Ainda de acordo com a Figura (6), ao analisar a rugosidade Rz, verifica-se que o aumento da velocidade de corte de 240 m/min para 360 m/min não alterou os valores da rugosidade dos experimentos realizados a seco (11,4 μm). No entanto, nos experimentos realizados com MQL e com ar gelado, o aumento da velocidade de corte promoveu uma diminuição na rugosidade de 8,8% (1,4 μm) e 6,8% (0,8 μm), respectivamente. Por outro lado, nos experimentos realizados com emulsão, o aumento da velocidade de corte promoveu um acréscimo de 34,9% (4,4 μm) na rugosidade. Os menores valores de rugosidade Rz, 10,4 μm , foram obtidos com velocidade de corte de 360 m/min e com o uso do sistema de lubrificação MQL, sendo seguidos pelos experimentos com ar gelado, 11,0 μm e pelos experimentos a seco, 11,4 μm . Em contrapartida, os maiores valores de rugosidade Rz, 17,0 μm , foram obtidos com velocidade de corte de 360 m/min e com uso de emulsão.

Assim, de modo geral, verifica-se que o uso do sistema de lubrificação com MQL proporcionou a obtenção das menores rugosidades, sendo seguido pelo sistema de ar gelado, pela usinagem a seco e pela usinagem com emulsão, respectivamente. Com relação à velocidade de corte, as menores rugosidades foram obtidas com a velocidade de corte de 360 m/min, isto devido às menores forças de corte obtidas com esta velocidade de corte.

3.3. Temperatura do inserto durante a usinagem

A Figura (7) apresenta o comportamento da temperatura na região próxima à superfície de saída do inserto durante a usinagem para os três sistemas de lubrificação e para a usinagem a seco. Desta forma, como esperado, verifica-se que a emulsão proporcionou uma menor temperatura durante a usinagem, pois foi utilizada em abundância e, normalmente, a água empregada na composição dos sistemas de emulsão possui um índice de convecção (h) mais alto que os fluidos de corte, que o ar gelado ou o ar natural nas condições de contorno na usinagem a seco. Também como

esperado, a usinagem sem utilização de sistemas de lubrificação, ou seja, a seco, apresentou as maiores temperaturas durante a usinagem.

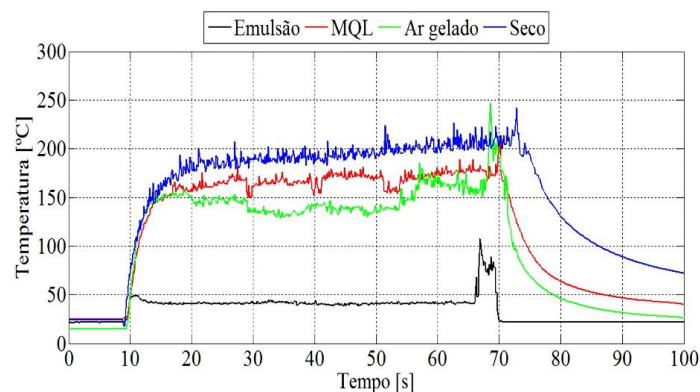


Figura 7. Temperatura do inserto durante a operação de torneamento do aço API 5L X70, com $V_c = 240$ m/min, $f = 0,2$ mm/rot, $a_p = 1,5$ mm (Fonte: autoria própria).

Ainda de acordo com a Fig. (7), verifica-se que, se comparada com a usinagem a seco, a utilização dos sistemas de lubrificação com MQL e ar gelado promoveram uma diminuição da temperatura durante a usinagem. Mesmo não utilizando nenhum fluido no estado líquido, o sistema de lubrificação a ar gelado apresentou menores temperaturas que o sistema MQL, isto devido à temperatura média do ar gelado que era de -7 °C na saída do bico do tubo vórtice.

A Tabela (5) apresenta o resultado da ANOVA para a temperatura do inserto durante a usinagem. Assim, de acordo com o P-valor, pode-se verificar que o sistema de lubrificação, a velocidade de corte e a interação entre eles apresentam significância estatística sobre a temperatura. Analisando o valor observado da distribuição F, pode-se verificar que o sistema de lubrificação apresenta grande significância estatística na variação da resposta, contribuindo com 94,6%. Por outro lado, a velocidade de corte e a interação entre sistema de lubrificação e velocidade de corte contribuem, apenas, com 4,7% e 0,7% na variação da resposta, respectivamente.

Tabela 5. Análise de variância para a temperatura do inserto durante a usinagem (Fonte: autoria própria).

ANOVA	Temperatura	
	F	P-valor
Sistema de lubrificação	951,64	0,000
Velocidade de corte	47,05	0,000
Sistema de lubrificação * Velocidade de corte	6,89	0,013
R²(Adj)	99,49%	

A Figura (8) apresenta a influência do sistema de lubrificação e da velocidade de corte sobre a temperatura do inserto durante a usinagem. Desta forma, independente do sistema de lubrificação utilizado, é possível verificar que o aumento da velocidade de corte de 240 m/min para 360 m/min promoveu o aumento da temperatura de usinagem, sendo este aumento mais nítido na usinagem a seco.

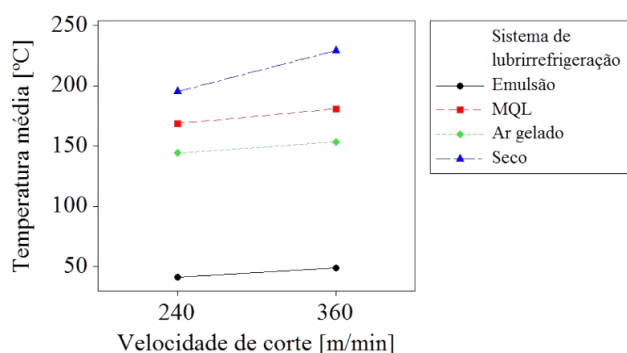


Figura 8. Influência do sistema de lubrificação e da velocidade de corte sobre a temperatura do inserto durante a usinagem (Fonte: autoria própria).

De acordo com a Fig. (8), os experimentos realizados com uso de emulsão apresentaram as menores temperaturas de usinagem, sendo seguidos pelos experimentos com ar gelado, com MQL e a seco, respectivamente. Analisando os experimentos realizados com velocidade de corte de 240 m/min, verifica-se que a temperatura de usinagem, quando utilizado o sistema com emulsão, foi de 41,3 °C. Para os experimentos com ar gelado a temperatura foi 144,4 °C. Para os experimentos com MQL a temperatura foi de 169,0 °C e para os experimentos a seco a temperatura foi de 195,5 °C.

Ainda de acordo com a Fig. (8), ao analisar os experimentos realizados com velocidade de corte de 360 m/min, verifica-se que a temperatura de usinagem, quando utilizado o sistema com emulsão, foi de 49,4 °C. Para os experimentos com ar gelado a temperatura foi 153,8 °C. Para os experimentos com MQL a temperatura foi de 181,3 °C e para os experimentos a seco a temperatura foi de 229,5 °C. Desta forma, independente da velocidade de corte utilizada, verifica-se que os sistemas de lubrificação foram capazes de diminuir a temperatura do inserto durante de usinagem.

Assim, conciliando os resultados obtidos neste trabalho para a força de corte, para as rugosidades e para a temperatura do inserto durante a usinagem, verifica-se que, apesar do uso do sistema de lubrificação com emulsão proporcionar as menores temperaturas e forças de corte, ele deteriora a superfície usinada da peça, promovendo as maiores rugosidades. Além disso, normalmente a emulsão é utilizada em grandes volumes, o que acarreta em maiores custos, além de se apresentar mais agressiva ao meio ambiente.

De modo geral, pode-se considerar que os resultados obtidos para a usinagem a seco, ou seja, sem o uso dos sistemas de lubrificação, apresentaram-se numa condição intermediária se comparado aos resultados obtidos com os sistemas de lubrificação. Os experimentos realizados a seco apresentaram as maiores temperaturas, as maiores forças de corte e rugosidades intermediárias.

Por outro lado, o uso dos sistemas de lubrificação com MQL e com ar gelado, apesar de promoverem maiores temperaturas e forças de corte que o sistema com emulsão, geraram melhores acabamentos, promovendo as menores rugosidades.

4. CONCLUSÕES

Utilizando da metodologia de projeto de experimentos (DOE) e da análise de variância (ANOVA), pôde-se investigar a influência das variáveis de entrada sobre os esforços de corte, as rugosidades e a temperatura do inserto na operação de torneamento do aço API 5L X70 para diferentes sistemas de lubrificação. Assim, as conclusões deste trabalho são as seguintes:

- A força de corte se mostrou como a maior componente dos esforços de corte, sendo seguida pela força de avanço e pela força passiva, respectivamente;
- Os resultados da ANOVA mostraram que o sistema de lubrificação, a velocidade de corte e a interação entre eles apresentam significância estatística somente sobre a força de corte, não influenciando a força de avanço e a força passiva;
- O sistema de lubrificação afeta a força de corte em 11,5%, a velocidade de corte afeta a força de corte em 76,5% e a interação entre eles afeta a força de corte em 12,0%;
- Os menores valores obtidos para os esforços de corte foram com velocidade de corte de 360 m/min e sistema de lubrificação com emulsão;
- O menor valor obtido para força de corte foi de 726,3 N, para a força de avanço foi de 308,5 N e para a força passiva foi de 138,6 N;
- Os resultados da ANOVA mostraram que o sistema de lubrificação, a velocidade de corte e a interação entre eles apresentam significância estatística sobre as rugosidades Ra e Rz;
- O sistema de lubrificação afeta a rugosidade Ra em 46,3%, a velocidade de corte afeta a rugosidade Ra em 21,6% e a interação entre eles afeta a rugosidade Ra em 32,1%;
- O sistema de lubrificação afeta a rugosidade Rz em 61,2%, a velocidade de corte afeta a rugosidade Rz em 8,4% e a interação entre eles afeta a rugosidade Rz em 30,5%;
- Os menores valores obtidos para as rugosidades Ra e Rz foram com velocidade de corte de 360 m/min e sistema de lubrificação com MQL;
- O menor valor obtido para a rugosidade Ra foi de 1,69 µm e para a rugosidade Rz foi de 10,4 µm;
- Os resultados da ANOVA mostraram que o sistema de lubrificação, a velocidade de corte e a interação entre eles apresentam significância estatística sobre a temperatura do inserto durante a usinagem;
- O sistema de lubrificação afeta a temperatura do inserto em 94,6%, a velocidade de corte afeta a temperatura do inserto em 4,7% e a interação entre eles afeta a temperatura do inserto em 0,7%;
- Os menores valores obtidos para a temperatura do inserto durante a usinagem foram com velocidade de corte de 240 m/min e sistema de lubrificação com emulsão;
- O menor valor obtido para a temperatura do inserto durante a usinagem foi de 41,3 °C.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro para a participação no COBEF 2017.

6. REFERÊNCIAS

- Acayaba, G. M. A., Escalona, P. M., 2015, "Prediction of surface roughness in low speed turning of AISI 316 austenitic stainless steel", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 11, pp. 62-67.
- API Specification 5L, 2000, "Specification for Line Pipe", 42ª Ed., American Petroleum Institute, Washington, 153p.
- Arruda, E. M., Svork Junior, J., Brandão, L. C., 2015, "Análise dos esforços de corte e da qualidade superficial no torneamento com alta velocidade de corte do aço API 5L X70", In: 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Salvador. Anais... Vol. 1, pp. 54-64.
- Arruda, E. M., 2015, "Avaliação do desempenho de ferramentas de metal duro no torneamento com altas velocidades de corte do aço API 5L X70", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei.
- Asiltürk, I., Akkus, H., 2011, "Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method", Measurement, Vol. 44, pp. 1697-1704.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002, "Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade", Norma NBR ISO 4287/2002, 18p.
- ASTM E18-15, 2015, "Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials", ASTM International, 38p.
- ASTM E8/E8M-13a, 2013, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material", ASTM International, 28p.
- Bartarya, G.; Choudhury, S. K., 2012, "State of the art in hard turning", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 53, pp. 1-14.
- Chinchani, S., Choudhury, S. K., 2013, "Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: An optimization approach", Measurement, Vol. 46, pp. 1572-1584.
- Diniz, A. E.; Marcondes, F.C.; Coppini N. L., 1999, "Tecnologia da Usinagem dos Materiais", 1ª Ed, MM Editora, 242p.
- Ferraresi, D., 1977, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Editora Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 751p.
- Khan, M. M. A., Mithu, M. A. H., Dhar, N. R., 2009, "Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 5573-5583.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B., 2009, "Teoria da Usinagem dos Materiais", Editora Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 371p.
- Montgomery, D. C., 2012, "Designs and analysis of experiments", John Wiley & Sons, 8ª Ed., Estados Unidos, 752p.
- Sadik, M. I., 2012, "Wear development and cutting forces on CBN cutting tool in Hard Part turning of different hardened steels", Procedia CIRP, Vol. 1, pp. 232-237.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

STUDY OF THE THERMAL AND LUBRICANTS PROPERTIES OF THE ALTERNATIVE LUBRICATION/COOLING SYSTEMS IN THE TURNING

Ítalo Clemente Rodrigues, italoclemente@gmail.com

Étory Madrilles Arruda, etory@msn.com

Thiago Castro Freitas, thiagocastrofreitas@hotmail.com

Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufsj.edu.br

¹Federal University of São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170 – Centro, São João del Rei, Minas Gerais, Brazil.

Abstract. In a cutting process, the choice of the lubrication/cooling system has a great importance for the reduction of the friction and the cutting temperature, because it can facilitate the material removal. Alternative lubrication/cooling in machining operations are constantly sought to generate more correct forms and less harmful to the environment without affecting the productivity and workpiece surface finishing. The aim of this study was analyze the cutting efforts, the temperature and the surface roughness of the API 5L X70 steel in the turning process, using three alternative lubrication/cooling systems, namely, emulsion, MQL - minimum quantity of lubricant and cold air and compare them with dry experiments. The results showed that the emulsion lubrication/cooling system provided the lowest cutting forces and temperatures, however, it generated the highest surface roughness. On the other hand, the MQL lubrication/cooling system provided the highest cutting forces and temperatures than the emulsion system, but with the lowest surface roughness.

Keywords: turning, API 5L X70 steel, cutting efforts, roughness, temperature.