

AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS DE CORTE NO TORNEAMENTO DO AÇO API 5L X70 COM ALTAS VELOCIDADES DE CORTE

Étory Madrilles Arruda

João Roberto Ferreira

Universidade Federal de Itajubá - IEM - Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37.500-903, Itajubá - MG
etory@msn.com; jorofe@unifei.edu.br

Guilherme Lopes Brandão

Lincoln Cardoso Brandão

Universidade Federal de São João del-Rei - DEMEC - Praça Frei Orlando, 170, Centro, CEP 36.307-352, São João del-Rei - MG
gui.lopes.brandao@gmail.com; lincoln@ufsj.edu.br

Resumo. Com a evolução dos processos de usinagem, tem-se aumentado bastante a utilização da usinagem com altas velocidades de corte, principalmente devido às grandes vantagens geradas no processo, como economia de tempo, melhor dissipação de calor e aumento da precisão devido a menor distorção da peça, visando sempre o crescimento da produtividade. O objetivo deste trabalho consistiu na avaliação dos efeitos da condição de corte (a seco ou com refrigeração a ar gelado) e da utilização de altas velocidades de corte sobre os esforços de corte no torneamento do aço API 5L X70. Os esforços de corte foram avaliados através da força de corte, da força de avanço e da força passiva. A ferramenta de corte utilizada foi um inserto de metal duro da classe M e as variáveis de controle foram a condição de corte e a velocidade de corte. Deste modo, pôde-se verificar que a condição de corte, a velocidade de corte e a interação entre estas variáveis apresentaram influência estatisticamente significativa sobre ambos os esforços de corte, sendo a condição de corte a variável que apresentou maior influência na variação dos esforços de corte, contribuindo com 69,0% na variação da força de corte, 57,0% na variação da força de avanço e 51,2% na variação da força passiva. Os menores valores de força de corte, força de avanço e força passiva obtidos foram, respectivamente, iguais a 367,5 N, 126,8 N e 115,5 N no torneamento com refrigeração a ar gelado e com velocidade de corte de 810 m/min.

Palavras chave: Torneamento. Aço API 5L X70. Altas Velocidades de Corte. Esforços de Corte

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por petróleo, gás natural e seus derivados, tem forçado as indústrias de energia a buscar esses recursos em ambientes cada vez mais agressivos e em distâncias cada vez maiores. Para isto, a maioria das indústrias utiliza-se de tubos e conexões de aço, que não só devem ter alta resistência mecânica e tenacidade, tornando-os adequados para ambientes agressivos, mas também devem fornecer opção econômica e segura para o transporte ao longo de grandes distâncias (Mohtadi-Bonab *et al.*, 2013).

De acordo com Sacco (2013), a condição em que se encontra a exploração de petróleo no país exige o desenvolvimento de novos materiais, que representam um desafio para usinagem. A fabricação dos tubos e conexões utilizados na exploração de petróleo e gás é normatizada pelo API (American Petroleum Institute). Desta forma, todos os tubos e conexões utilizados no revestimento do poço e/ou na coluna de produção necessitam ser usinados, de forma a garantir dimensões, tolerâncias e qualidades superficiais requeridas e normalizadas em suas aplicações. No entanto, de acordo com Diniz *et al.* (2014), a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas depende do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem. Além disso, segundo os autores, estes fatores afetam a potência necessária para o corte, as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta, influenciando a viabilidade econômica do processo.

Segundo Arruda e Brandão (2018), a usinagem de materiais utilizando a técnica de altas velocidades de corte tem interessado pesquisadores, fabricantes de máquinas-ferramentas e de ferramentas de corte. No entanto, a técnica ainda não é totalmente compreendida e empregada, uma vez que todas as variáveis envolvidas no processo devem ter seus estudos aprofundados, objetivando melhorar a compreensão dos fenômenos envolvidos. Segundo os autores, a velocidade de corte pode variar de acordo com o processo de usinagem, uma vez que cada processo possui características específicas que devem ser consideradas. Além disso, os materiais usinados possuem diferentes estruturas que também devem ser consideradas durante a estratégia de fabricação. O torneamento com altas velocidades de corte do alumínio e de suas ligas, por exemplo, pode apresentar velocidades de corte dez vezes maiores que o torneamento de aços endurecidos.

Assim, o objetivo deste trabalho consistiu na avaliação dos efeitos da condição de corte (a seco ou com refrigeração a ar gelado) e da utilização de altas velocidades de corte sobre os esforços de corte no torneamento do aço API 5L X70.

Tal estudo visa contribuir na seleção da condição de corte e da velocidade de corte mais adequados para a obtenção dos menores esforços de corte, permitindo a fabricação de produtos dentro das características técnicas e econômicas necessárias. Os resultados deste trabalho são úteis para aplicações em indústrias de fabricação de tubos e conexões para extração de petróleo e gás.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos de torneamento foram realizados em um centro de torneamento ROMI® GL 240M, que possui rotação máxima de 6.000 rpm e potência de 22,5 kW, conforme ilustra a Fig. 1a. Os corpos de prova utilizados, conforme ilustra a Fig. 1b, foram anéis do aço API 5L X70, utilizado pelo setor petrolífero. As dimensões dos corpos de prova eram de 200 mm de diâmetro externo, 150 mm de diâmetro interno e 45 mm de comprimento. O limite de escoamento (690 MPa), limite de resistência à tração (820 MPa) e dureza (45 HRC) do aço foram obtidos através de ensaios de tração e dureza. Através da análise química de espectrometria ótica foi possível verificar a composição química do aço. Assim, as parcelas dos elementos químicos que compõem este aço, em peso, são: 0,25% de C, 0,94% de Cr, 0,83% de Mn, 0,45% de Mo, 0,24% de Si, 0,025% de P, 0,001% de S, 97,144% de Fe e 0,12% em balanço de outros elementos.



Figura 1. a) Centro de torneamento Romi® GL 240M; b) Detalhes do corpo de prova, do dinamômetro e da ferramenta

As variáveis de controle utilizadas nos experimentos foram a condição de corte (usinagem a seco e com refrigeração a ar gelado) e a velocidade de corte, conforme apresenta a Tab. 1. Os níveis da velocidade de corte foram definidos como: uma vez, duas vezes e três vezes o valor da velocidade de corte recomendada pelo fabricante do inserto, assim como foi realizado por Arruda e Brandão (2018) no torneamento do aço API 5L X70 com altas velocidades. Os experimentos foram aleatorizados por níveis em um planejamento estatístico fatorial multi-níveis e cada condição experimental foi repetida três vezes, somando um total de dezoito experimentos. A ferramenta de corte utilizada foi um inserto de metal duro, código TNMG 160408MF, classe GC-2015, com revestimento triplo de TiCN+Al₂O₃+TiN, e o porta-ferramentas utilizado possui código DTJNL 2020K 16, ambos da Sandvik Coromant. A combinação entre a ferramenta de corte e o porta-ferramentas gera uma geometria efetiva de corte com a seguinte configuração: ângulo de posição (χ_r) = 93°, ângulo de folga (α_o) = 6°, ângulo de saída (γ_o) = -6° e ângulo de inclinação (λ_s) = -6°. O avanço da ferramenta e a profundidade de corte utilizados nos experimentos foram mantidos constantes e iguais a 0,2 mm e 0,8 mm, respectivamente.

Tabela 1. Variáveis de controle e seus respectivos níveis

Variáveis de controle	Níveis		
	1	2	3
A - Condição de corte	Seco	Ar gelado	-
B - Velocidade de corte [m/min]	270	540	810

Para a realização dos experimentos com refrigeração a ar gelado, foi utilizado um sistema de tubo vórtice posicionado à 5 mm da ponta da ferramenta, com pressão de ar constante de 7 kgf/cm² e temperatura média do ar de -7 °C.

As variáveis de resposta analisadas foram os esforços de corte, sendo estes: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p). Para a medição dos esforços de corte foi utilizado um dinamômetro piezoelétrico estacionário Kistler® 9119A com três canais, um amplificador de sinais Kistler® 5070A e o software Dynoware também fornecido pela Kistler®. A taxa de aquisição dos dados foi de 500 Hz. Os dados obtidos para os esforços de corte foram analisados estatisticamente através do software Minitab®. A influência das variáveis de controle e da interação entre elas sobre as respostas, foram verificadas utilizando a análise de variância (ANOVA), considerando um nível de significância $\alpha = 0,05$.

3. RESULTADOS

A Figura 2 ilustra os resultados experimentais dos esforços de corte, bem como o intervalo de confiança de cada condição experimental. Assim, de forma geral, pode-se verificar que o aumento da velocidade de corte promoveu a redução dos esforços de corte, no entanto, aumentou a dispersão dos mesmos. Acredita-se que a diminuição dos esforços

de corte com o aumento da velocidade de corte possa ser explicada pela diminuição da resistência ao cisalhamento do material. De acordo com Arruda e Brandão (2018) e Chinchanihar e Choudhury (2013), o aumento da velocidade de corte gera temperaturas mais altas que as temperaturas com velocidades convencionais na zona de corte do material, reduzindo a resistência ao cisalhamento, aumentando a plasticidade e, consequentemente, diminuindo os esforços de corte. No entanto, o aumento da velocidade de corte também gera níveis de vibração mais elevados, o que pode justificar o aumento da dispersão dos esforços de corte.

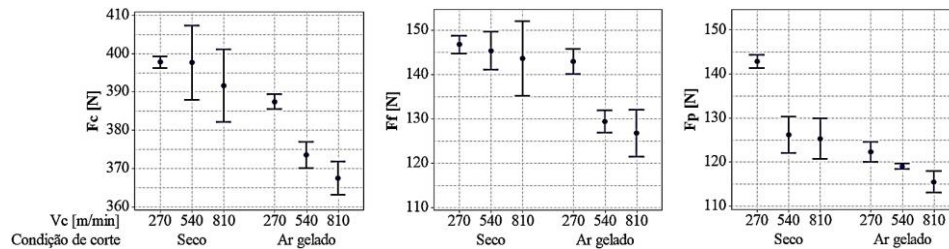


Figura 2. Resultados experimentais dos esforços de corte

Ainda de acordo com a Fig. 2, pode-se verificar, de forma geral, que os experimentos com refrigeração a ar gelado apresentaram esforços de corte inferiores aos experimentos realizados a seco, bem como menores dispersões. Acredita-se que a utilização do sistema de refrigeração a ar gelado, apesar de ser capaz reduzir a temperatura na zona de corte, dificultando o cisalhamento do material, tenha facilitado a remoção dos cavacos, pela rápida retirada devido a elevada velocidade do jato de ar gelado acarretando em esforços de corte inferiores à usinagem a seco.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para a força de corte (F_c), para a força de avanço (F_f) e para a força passiva (F_p). Analisando o P-valor, pode-se verificar que a condição de corte (A), a velocidade de corte (B) e a interação entre estas variáveis de controle (A*B) apresentaram influência estatisticamente significativa sobre ambos os esforços de corte (F_c , F_f e F_p). Analisando o F-valor, pode-se verificar que a condição de corte (A) foi a variável de controle que apresentou maior influência na variação dos esforços de corte, contribuindo com 69,0% na variação da força de corte, 57,0% na variação da força de avanço e 51,2% na variação da força passiva. Por sua vez, a velocidade de corte contribuiu com 20,5% na variação da força de corte, 25,9% na variação da força de avanço e 36,6% na variação da força passiva. A interação entre estas variáveis de controle (A*B) contribuiu com 2,9% na variação da força de corte, 3,7% na variação da força de avanço e 1,2% na variação da força passiva.

Tabela 2. Análise de variância para os esforços de corte

Fonte	GL	ANOVA – F_c				ANOVA – F_f				ANOVA – F_p			
		SQ	MQ	F	P	SQ	MQ	F	P	SQ	MQ	F	P
A	1	1721,7	1721,7	287,0	0,00	675,1	675,1	185,1	0,00	707,6	707,6	506,6	0,00
B	2	511,8	255,9	42,7	0,00	306,6	153,3	42,0	0,00	505,7	252,9	181,0	0,00
A*B	2	191,2	95,6	15,9	0,00	159,8	79,9	21,9	0,00	151,3	75,6	54,2	0,00
Resíduo	12	72,0	6,0			43,8	3,6			16,8	1,4		
Total	17	2496,7				1185,2				1381,3			
S			2,5				1,9				1,2		
R^2			97,1%				96,3%				98,8%		
R^2 (adj.)			95,9%				94,8%				98,3%		

Ainda de acordo com a Tab. 2, pode-se verificar que os modelos de respostas para os esforços de corte (F_c , F_f e F_p) apresentaram, respectivamente, erros experimentais iguais a 2,5, 1,9 e 1,2. Os coeficientes de determinação R^2 iguais a 97,1%, 96,3% e 98,8% são considerados excelentes e representam as porcentagens de variação nos esforços de corte que são explicadas pelos modelos de regressão. Os coeficientes R^2 (adj.) iguais a 95,9%, 94,8% e 98,3% também são considerados excelentes e indicam as porcentagens de variação nos esforços de corte que são explicadas pelos modelos de regressão, ajustadas para o número de preditores dos modelos em relação ao número de observações.

A Figura 3 ilustra os efeitos principais das variáveis de controle sobre os esforços de corte. Assim, é possível verificar a maior influência da condição de corte sobre os esforços de corte. Os experimentos realizados a seco apresentaram valores médios para a força de corte, para a força de avanço e para a força passiva, respectivamente, iguais a 395,7 N, 145,3 N e 131,5 N. Por outro lado, os experimentos realizados com refrigeração a ar gelado apresentaram valores médios para a força de corte, para a força de avanço e para a força passiva, respectivamente, iguais a 376,1 N, 133,0 N e 118,9 N. Assim, pode-se confirmar que a usinagem com refrigeração a ar gelado apresentou melhores resultados que a usinagem a seco. Como citado, acredita-se que a utilização do sistema de refrigeração a ar gelado, apesar de ser capaz reduzir a temperatura na zona de corte, tenha facilitado a remoção dos cavacos, resultando em esforços de corte inferiores à usinagem a seco.

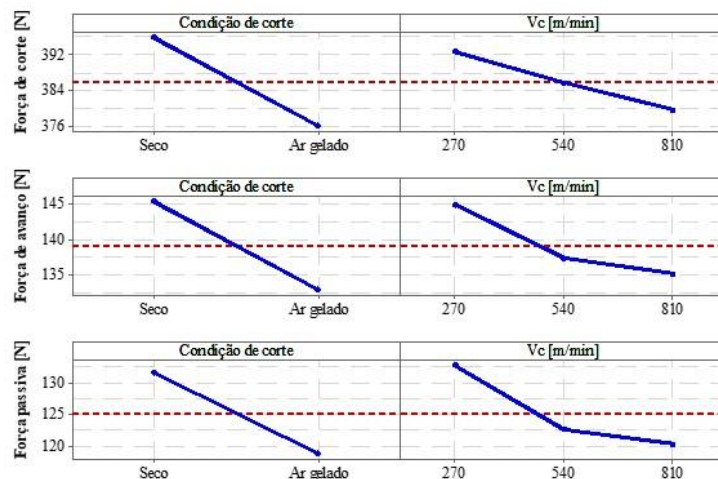


Figura 3. Efeitos principais das variáveis de controle sobre os esforços de corte

Ainda de acordo com a Fig. 3, pode-se verificar que o aumento da velocidade de corte promoveu a redução de ambos os esforços de corte. Como citado anteriormente, acredita-se que o aumento da velocidade de corte tenha gerado temperaturas mais altas na zona de corte do material, reduzindo a resistência ao cisalhamento, aumentando a plasticidade e, conseqüentemente, diminuindo os esforços de corte. Os experimentos realizados com velocidade de corte de 270 m/min apresentaram valores médios para a força de corte, para a força de avanço e para a força passiva, respectivamente, iguais a 392,6 N, 144,9 N e 132,6 N. Os experimentos realizados com velocidade de corte de 540 m/min apresentaram valores médios para a força de corte, para a força de avanço e para a força passiva, respectivamente, iguais a 385,6 N, 137,4 N e 122,6 N. E os experimentos realizados com velocidade de corte de 810 m/min apresentaram valores médios para a força de corte, para a força de avanço e para a força passiva, respectivamente, iguais a 379,6 N, 135,2 N e 120,4 N. Desta forma, verifica-se que os experimentos com velocidade de corte de 810 m/min apresentaram os menores esforços de corte.

A Figura 4 ilustra as interações entre a condição de corte e a velocidade de corte sobre ambos os esforços de corte. Assim, pode-se verificar que a combinação da usinagem com refrigeração a ar gelado com velocidades de corte mais altas, neste caso 810 m/min, proporcionaram os menores esforços de corte, respectivamente, iguais a 367,5 N para a força de corte, 126,8 N para a força de avanço e 115,5 N para a força passiva.

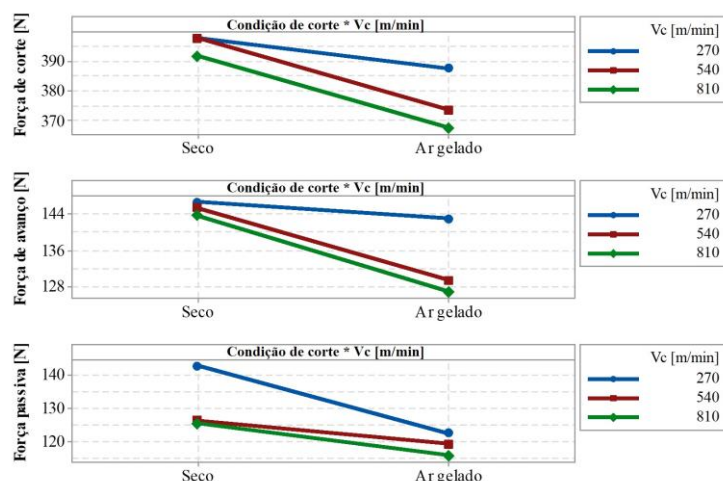


Figura 4. Interações das variáveis de controle sobre os esforços de corte

4. CONCLUSÕES

Os dados experimentais deste trabalho mostraram que os esforços de corte envolvidos no torneamento do aço API 5L X70 são estatisticamente influenciados pela condição de corte, pela velocidade de corte e pela interação entre estas variáveis de controle;

- A usinagem com refrigeração a ar gelado apresentou menores esforços de corte que a usinagem a seco;
- A utilização de altas velocidades de corte se mostrou eficiente na redução dos esforços de corte;

- A condição de corte foi a variável de controle que mais influenciou na variação dos esforços de corte, contribuindo com 69,0% na variação da força de corte, 57,0% na variação da força de avanço e 51,2% na variação da força passiva;
- Os menores valores de força de corte, força de avanço e força passiva obtidos foram, respectivamente, iguais a 367,5 N, 126,8 N e 115,5 N no torneamento com refrigeração a ar gelado e com velocidade de corte de 810 m/min.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG, a CAPES, o CNPq, a UFSJ e a UNIFEI pelo apoio na realização deste trabalho e na participação no COBEF 2019.

6. REFERÊNCIAS

- Arruda, E.M. e Brandão, L.C., 2018. "Performance study of multilayer carbide tool in high-speed turning of API 5L X70 pipeline steel using a cold air system". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, nº. 1-4, p. 85-103.
- Chinchani, S. e 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, p. 1572-1584.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C. e Coppini, N.L., 2014. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber Editora Ltda., São Paulo, 9ª edição.
- Mohtadi-Bonab, M.A., Szpunar, J.A. e Razavi-Tousi, S.S., 2013. "A comparative study of hydrogen induced cracking behavior in API 5L X60 and X70 pipeline steels". *Engineering Failure Analysis*, Vol. 33, p. 163-175.
- Sacco, F., 2013. "Pré-Sal: Um desafio para o conhecimento". *Revista O Mundo da Usinagem*, nº. 92, p. 20-26.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

EVALUATION OF CUTTING EFFORTS IN HIGH-SPEED TURNING OF API 5L X70 STEEL

Étory Madrilles Arruda

João Roberto Ferreira

Federal University of Itajubá - IEM - Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37.500-903, Itajubá - MG
etory@msn.com; jorofe@unifei.edu.br

Guilherme Lopes Brandão

Lincoln Cardoso Brandão

Federal University of São João del-Rei - DEMEC - Praça Frei Orlando, 170, Centro, CEP 36.307-352, São João del-Rei - MG
gui.lopes.brandao@gmail.com; lincoln@ufsjs.edu.br

Abstract. The evolution of the manufacturing processes has generated an increase in the use of machining with high-speed cutting, mainly due to the significant advantages generated in the process, such as economy on time, best heat dissipation, and increase of accuracy due to lower distortion of workpieces, always looking for increased productivity. This work aimed was to evaluate the effects of the cutting condition (dry or cold air) and the use of high cutting speed on the cutting efforts of API 5L X70 steel turning. The cutting efforts were evaluated by cutting force, feed force and passive force. The tool was an insert grade M and the input parameters were the cutting condition and the cutting speed. In this way, it was verified that the cutting condition, the cutting speed and the interaction between these input parameters had a statistically significant influence on both cutting efforts. Moreover, the cutting condition was the input parameter that presented the most significant influence on cutting efforts variation, contributing with 69.0% in the cutting force variation, 57.0% in the feed force variation and 51.2% in the passive force variation. The lowest values of cutting force, feed force and passive force were respectively 367.5 N, 126.8 N and 115.5 N in the cold air turning with cutting speed of 810 m/min.

Keywords: Turning. API 5L X70 Steel. High Speed Cutting. Cutting Efforts

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.