

ESFORÇOS DE CORTE NA FURAÇÃO DO AISI 304 COM APLICAÇÃO DE NANOFLUIDO MLG EM RQL

Andressa Caroline da Silva Carvalho¹

André João de Souza²

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite, nº425, Cidade Baixa, CEP 90050-170, Porto Alegre, RS

¹engandressacarvalho@gmail.com; ²ajsouza@ufrgs.br

Rogério Valentim Gelamo³

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, Av. Dr. Randolfo Borges Junior, nº 1250, CEP 38064-200, Uberaba, MG

³rogelamo@gmail.com

Resumo. O processo de furação caracteriza-se por apresentar dificuldades em relação à formação e à remoção do cavaco da região de corte, e à geração de altas temperaturas devido ao cisalhamento e encruamento do material no fundo do furo, principalmente na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos. Tais dificuldades são intrínsecas aos esforços de corte gerados durante o processo. Assim, o trabalho analisou a influência do grafeno multicamadas (MLG) disperso em fluido de corte nas variáveis respostas força de avanço (F_f) e do momento torsor (M_t) gerados durante a furação do AISI 304 utilizando broca helicoidal de metal-duro revestida com TiAlN. Como fatores controláveis, foram consideradas três variáveis de entrada em três níveis cada (velocidades de corte: $v_c = 25, 45, 65$ m/min; avanço: $f = 0,07, 0,11, 0,15$ mm/rev.; vazão de fluido: $q = 1,5, 2,0, 2,5$ l/h). A aplicação do nanofluido foi feita externamente utilizando a técnica de quantidade reduzida (RQL). O desempenho do RQL+MLG foi avaliado pela comparação com o RQL sem adições. Como resultado, observou-se que F_f e M_t sofreram alguma influência de v_c e/ou q . Por fim, não se pôde afirmar que a aplicação do nanofluido trouxe mais benefícios que o RQL sem MLG.

Palavras chave: Furação de aço inoxidável austenítico. Força de avanço. Momento torsor. Grafeno multicamadas. Quantidade reduzida de fluido.

1. INTRODUÇÃO

A broca helicoidal em furação é basicamente submetida a esforços de torção (devido à rotação) e compressão (devido ao avanço). Assim, para determinar os esforços, basta considerar o momento torsor (M_t) e a força de avanço (F_f). Ambos (M_t e F_f) sofrem influência da geometria e do desgaste da ferramenta, do material usinado, da presença de um meio lubrificante, e da relação entre velocidade de avanço e velocidade de corte (Capello et al., 2008).

A furação de aço inoxidável, de maneira geral, é caracterizada por apresentar algumas dificuldades. Altos esforços de corte, elevadas temperaturas, alto grau de encruamento e formação de aresta postiça de corte, tornam as brocas utilizadas mais propensas a desgastes, e trazem um acabamento ruim à superfície usinada (Pradeep e Shakeel, 2017). O AISI 304 possui baixa condutividade térmica que, somada a altas temperaturas do corte, faz com que grande parte do calor gerado seja direcionado à ferramenta, acelerando o seu desgaste (Camargo, 2008).

Para prolongar a vida da ferramenta, a maneira mais eficaz é reduzir a temperatura na região de corte (Pradeep e Shakeel, 2017). Essa redução está associada à utilização de fluidos de corte que devem proporcionar resfriamento e lubrificação visando minimizar a severidade do contato presente nas interfaces peça/ferramenta/cavaco. Porém, seja pelo custo ou pelos prejuízos à saúde e ao meio ambiente, busca-se reduzir ou eliminar esse fluido da usinagem (Asthakov, 2008). O uso de menores quantidades de fluidos de corte é evidenciado como uma alternativa viável em relação à furação com fluido abundante, além de apresentar, em muitos casos, melhor desempenho quando comparado ao corte a seco. A aplicação por nebulização de fluido na região de corte é comumente usada com o auxílio de ar comprimido. Essa mistura funciona com maior capacidade de lubrificação que refrigeração na interface da peça trabalhada (Sharma et al., 2016).

Em busca de melhorias nos meios lubrificantes, pesquisas mostram a adição de micro e nanopartículas sólidas dispersas em fluidos de corte associados à aplicação em quantidades reduzidas (RQL) ou mínimas (MQL). Isso ocorre basicamente no sentido de elevar a eficiência refrigerante do fluido-base, aumentando a condutividade térmica e a capacidade de transferência de calor por convecção (Mello, 2015; Sharma et al., 2016). Dentre as diversas partículas sólidas, o grafeno se destaca pelas suas altas condutividades elétrica e térmica, e alta resistência mecânica, sendo utilizado em alguns processos de usinagem como alternativa aos sistemas de lubrificação comuns (Benedicto et al., 2017; Zarbin e Oliveira, 2013). No trabalho de Silva et al. (2015), a utilização de flocos de multicamadas de grafeno (MLG) dispersos em fluido de corte de base vegetal melhorou a eficiência do fluido de corte (resfriamento e lubrificação) na

retificação do aço VP100. Uysal (2016) relacionou a presença das nanopartículas de grafeno a um maior efeito de lubrificação e refrigeração e, conseqüentemente, ao menor desgaste do flanco da ferramenta utilizada durante o fresamento do aço inoxidável ferrítico AISI 430. Já no trabalho de Yi et al. (2017), a presença do óxido de grafeno suspenso no fluido de corte empregado na furação da liga Ti-6Al-4V reduziu os esforços de corte e os valores da rugosidade, ao diminuir o atrito por melhor alcançarem a zona de corte.

Assim, o objetivo deste estudo é analisar os esforços de corte necessários para a execução de furos passantes em aço inoxidável AISI 304 utilizando flocos de MLG dispersos em fluido de corte e aplicado externamente em quantidade reduzida (RQL). O desempenho da adição de MLG é avaliado pela comparação dos resultados com o RQL sem adição.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1a ilustra a montagem do sistema experimental.

Os corpos de prova de aço inoxidável AISI 304 (17,8% Cr e 8,5% Ni) foram preparados com dimensões de $60 \times 15,9 \times 9,9$ mm. O material tem valor médio de dureza de (170 ± 5) HV. Os mesmos foram fixados ao dinamômetro com auxílio de uma base de fixação (Fig. 1b) em alumínio fabricado especialmente para isso.

Os furos foram executados no centro de usinagem ROMI Discovery 308 utilizando duas condições de lubrificação (RQL e RQL+MLG). A furação ocorreu de modo passante utilizando, para cada condição, uma broca helicoidal de metal-duro Walter Titec revestida com TiAlN, com 8,1 mm de diâmetro, ponta autocentrante ($\sigma = 140^\circ$) e afiação cruzada. O erro de batimento radial apresentou valor médio igual ou inferior a $10 \mu\text{m}$.

Em RQL utilizou-se o fluido integral sintético Quimatic Jet aplicado com auxílio do Nebulizador IV (Tapmatic®). Para o estudo da condição RQL+MLG, flocos de MLG com cerca de $10 \mu\text{m}^2$ de área e 07 a 20 nm de espessura foram obtidos por esfoliação da grafite natural expandida termicamente com ácidos a alta temperatura, precedida de um processo ultrassônico para esfoliação mecânica, e dispersos ao fluido a uma concentração de 0,05% através de um homogeneizador ultrassônico. A posição do bico aspersor é ilustrada pela Fig. 1c. Uma placa de aço foi utilizada como anteparo ao cavaco para que este não retirasse o bico da posição durante a furação.

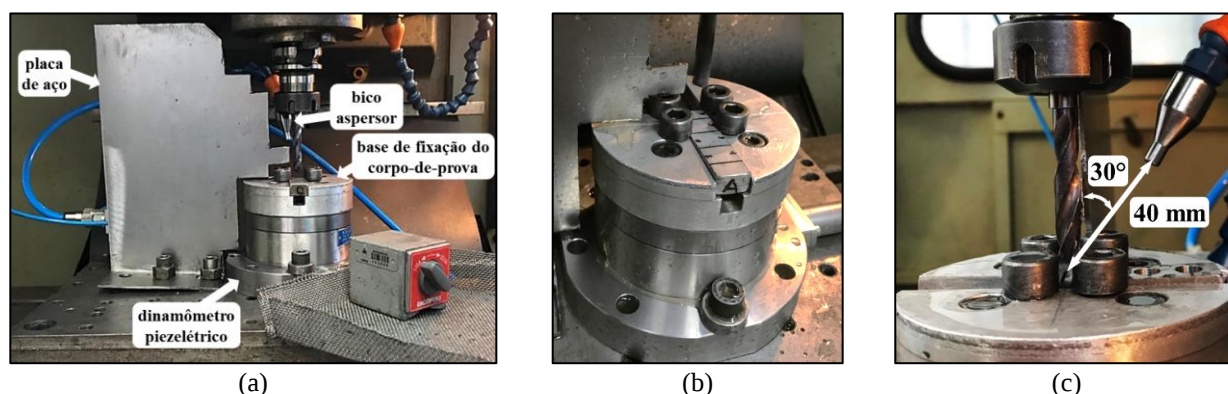


Figura 1. Configuração experimental: (a) montagem do sistema; (b) fixação do corpo de prova; (c) posição do bico.

Os sinais de força de avanço (F_f) e momento torsor (M_t) foram adquiridos a uma taxa de 5 kHz pelo dinamômetro piezoeletrico Kistler® 9272, condicionados pelo amplificador de carga Kistler® 5070A, e processados pelo software LabVIEW™ 9.0. Os valores médios dos esforços de corte foram determinados e analisados pelo software MS Excel.

Para o planejamento e execução do experimento foi aplicado a metodologia Box-Behnken Design (BBD) de três fatores controláveis (velocidade de corte v_c , avanço f e vazão do fluido q), cada um em três níveis (Tab. 1).

Tabela 1. Matriz de experimentos BBD e os valores médios das variáveis respostas para os 15 furos gerados.

Furo	Fatores Controláveis		
	v_c [m/min]	f [mm/rev.]	q [l/h]
1	25	0,11	1,5
2	25	0,11	2,5
3	45	0,15	2,5
4	45	0,07	2,5
5	25	0,07	2,0
6	45	0,11	2,0
7	65	0,15	2,0
8	65	0,11	1,5

Furo	Fatores Controláveis		
	v_c [m/min]	f [mm/rev.]	q [l/h]
9	45	0,07	1,5
10	45	0,15	1,5
11	65	0,11	2,5
12	45	0,11	2,0
13	65	0,07	2,0
14	45	0,11	2,0
15	25	0,15	2,0

A matriz de experimento (aleatorização das combinações) foi gerada via software Minitab® 17, totalizando 15 furos. Para entender as influências dos fatores controláveis nas variáveis resposta (F_f e M_t) para as condições RQL e RQL+MLG, foi realizada a ANOVA dos valores médios medidos com confiança de 95%, empregando o Minitab® 17. O coeficiente de determinação (R^2) para cada variável de saída também foi determinado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores medidos das variáveis respostas F_f e M_t , em função das combinações dos parâmetros de corte (fatores controláveis) empregados (em três níveis cada) e para as condições de lubrificação RQL e RQL+MLG, são apresentados através dos gráficos da Fig. 2 e Fig. 3, respectivamente.

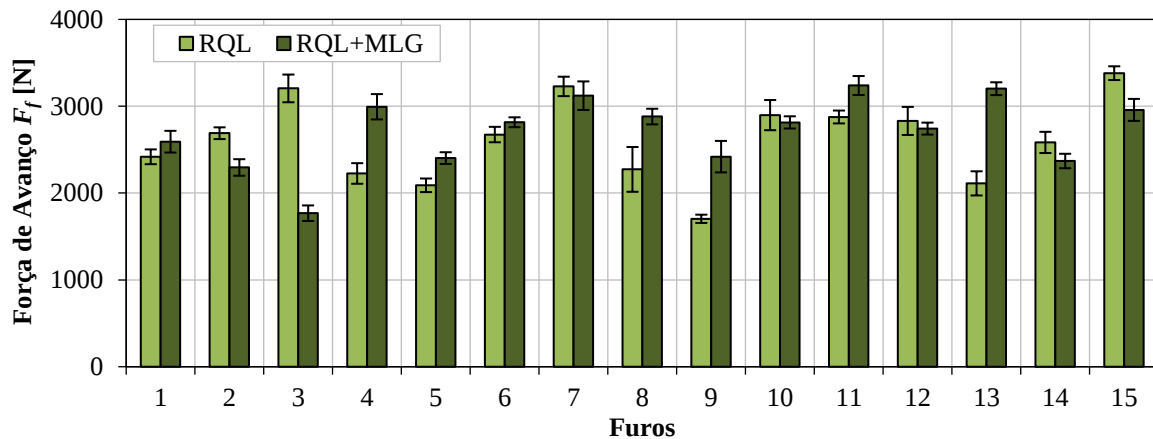


Figura 2. Comparação entre as F_f obtidas para ambas as condições de lubrificação.

Na furação com RQL, a força de avanço (F_f) gerada apresenta um ponto mínimo quando aplicada a combinação 9 ($v_c = 45$ m/min, $f = 0,07$ mm/rev. e $q = 1,5$ l/h). Tem-se então o menor valor para F_f (1704 ± 48 N) devido principalmente à menor quantidade de material sendo removida com o corte, facilitada pelas altas temperaturas resultantes de uma refrigeração e lubrificação praticamente ausentes, e com influência insignificante de v_c . Já na furação com RQL+MLG, o ponto mínimo foi gerado pela combinação 3 ($v_c = 45$ m/min, $f = 0,15$ mm/rev. e $q = 2,5$ l/h). Neste caso, o reduzido valor de F_f (1769 ± 90 N) ocorreu por causa da combinação dos maiores valores de f e q , onde a presença dos flocos de MLG pode ter causada uma diminuição do coeficiente de atrito, conforme descrito por Yi et al. (2017).

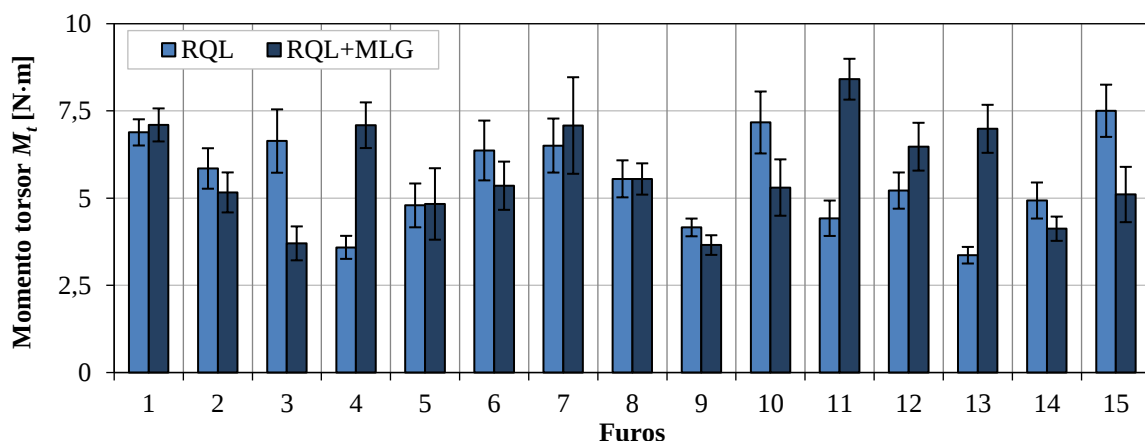


Figura 3. Comparação entre os M_t gerados para ambas as condições de lubrificação.

Para M_t utilizando RQL, o ponto mínimo foi gerado pela combinação 13 ($v_c = 65$ m/min, $f = 0,07$ mm/rev. e $q = 2,0$ l/h). O valor resultante ($3,36 \pm 0,24$ N·m) ocorreu sobretudo devido à menor remoção de material, auxiliada pela diminuição da ductilidade com o aumento da temperatura pelo emprego de uma maior v_c . Aplicando RQL+MLG na furação, a combinação 9 ($v_c = 45$ m/min, $f = 0,07$ mm/rev. e $q = 1,5$ l/h) gerou o reduzido valor de M_t ($3,65 \pm 0,28$ N·m). Este aconteceu com o emprego da v_c média associado à menor quantidade de material removida.

A análise de variância (ANOVA) dos esforços de corte com RQL mostrou que o fator mais significativo foi o avanço (f), com uma contribuição de 82,4% sobre o valor da força de avanço (F_f) e de 74% sobre o resultado do momento torsor (M_t). Têm-se ainda como significativos a vazão (q) para F_f (14,5%) e a velocidade de corte (v_c) para M_t (14%). A análise dos efeitos principais dos fatores (v_c , f e q) sobre F_f e M_t evidenciou esse resultado. As interações entre os fatores não foram significativas para um nível de significância de 5%. Os coeficientes de determinação encontrados para F_f e M_t foram $R^2 = 98,7\%$ e $R^2 = 94,5\%$, respectivamente.

A ANOVA dos esforços de corte para a condição RQL+MLG revelou que para F_f observam-se como significativos, a velocidade de corte (v_c) e a interação avanço x vazão ($f \times q$), possuindo respectivamente, 26,8% e 29,1% de influência sobre o resultado. Já para M_t , nenhum fator individualmente foi significativo para um nível de significância $\alpha = 0,05$. No entanto, v_c ficou muito próxima de ser significativa, tanto seu efeito linear (valor- $p = 0,07$) quanto o quadrático (valor- $p = 0,06$), destacando também o valor de percentagem de contribuição que o fator teve sobre o resultado (respectivamente 15,3% e 17,6%). Foram verificadas duas interações significativas: $v_c \times q$, com 20,7% de contribuição sobre o resultado; e $f \times q$, contribuindo com 22,9%. Destaca-se a significância de q , a qual aparece nas interações com os parâmetros de corte em um comportamento diferente do que foi detectado na utilização da condição RQL. Possivelmente, isso reflete a influência da presença de MLG sobre as variáveis respostas. Os coeficientes de determinação encontrados para F_f e M_t foram, respectivamente, $R^2 = 83,5\%$ e $R^2 = 85\%$.

Diferentes estudos indicam que F_f e M_t aumentam com o aumento de f no processo de furação (Camargo, 2008; Castillo, 2005; Pinto, 2010). Um acréscimo de f leva a um aumento da espessura de corte, que ocasiona maiores quantidades de material a ser cisalhado, sendo então necessárias maiores forças no sentido de penetração da ferramenta. Entretanto, a presença do MLG afeta este comportamento, pois com a sua utilização gerou-se menores valores dos esforços de corte também com o aumento de f . Conforme Yi et al., 2017, a presença de MLG na região de corte pode ter contribuído com a lubrificação nas interfaces cavaco/ferramenta/peça, facilitando a formação e remoção do cavaco do furo e, conseqüentemente, diminuindo o atrito.

Corroborando com o fato, verificou-se por análises de imagens microscópicas uma menor quantidade de material aderido à parede do furo. Na condição com RQL, foram observadas marcas de avanço da broca, presença de material aderido, e também marcas mais profundas que se acredita serem formadas pelo escoamento do cavaco para fora do furo. Já na condição RQL+MLG, notou-se a presença dos flocos de MLG e uma superfície mais homogênea.

4. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas a partir da análise da força de avanço (F_f) e do momento torsor (M_t) na furação do AISI 304 utilizando diferentes níveis de velocidade de corte (v_c), avanço (f) e vazão de fluido (q) são:

- Independente da presença ou ausência do grafeno multicamadas (MLG), F_f e M_t sofreram influência de v_c e/ou de q .
- Com RQL, os valores obtidos de F_f e M_t ocorreram principalmente pela influência da quantidade de material removido, onde menores f geraram menores esforços de corte;
- A presença do MLG alterou o comportamento dos esforços de corte, influenciando de acordo com o q empregado, tanto na sua interação com f sobre F_f , quanto com f e v_c sobre M_t .
- Com os resultados alcançados, não se assegura que a utilização de RQL+MLG traga benefícios quanto aos esforços de corte no processo de furação, em comparação ao RQL.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem: à Quimatic/Tapmatic pela doação do nebulizador e do fluido de corte, à Nacional de Grafite pela doação do grafite usado; à Walter Tools pela doação das ferramentas de corte; ao Guilherme Vargas Schirmer pelo auxílio na execução dos experimentos; e à CAPES (2016/162.485-1) pela bolsa de estudos concedida.

6. REFERÊNCIAS

- Asthakov, V.P., 2008. "Ecological Machining: Near-dry Machining". In: Davim, J.P. *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, Springer-Verlag, London.
- Benedicto, E., Carou, D., Rubio E.M., 2017. "Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems used in Machining Processes", *Procedia Engineering*, Vol. 184, p. 99-116.
- Camargo, R., 2008. *Verificação da usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos através do processo de furação*. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP.
- Capello, E., Langella, A., Nele, L., Paoletti, A., Santo, L. e Tagliaferri, V., 2008. "Drilling Polymeric Matrix Composites". In: Davim, J.P. *Machining: Fundamentals and Recents Advances*, Springer-Verlag, London.
- Castillo, W.J.F., 2005. *Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos*. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC.
- Mello, A.V., 2015. *Retificação da liga Ti-6Al-4V, com fluido de corte contendo partículas de grafeno*. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, MG.

- Pinto, G.T.B., 2010. *Análise da influência da geometria de brocas especiais na furação de chapas finas aeronáuticas*. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC.
- Pradeep, K.M. e Shakeel, A.L., 2017. "Drilling of AISI 304 stainless steel under liquid nitrogen cooling: a comparison with flood cooling", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, Part A, p. 1518-1524.
- Sharma, A.K., Tiwari, A.K. e Dixit, A.R., 2016. "Effects of minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: a comprehensive review", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 127, p. 1-18.
- Silva, R.B., Ezugwu E.O., Guimaraes, C., Marques, A., Fernandes, L.A., Gelamo, R.V., 2015. Grinding of mould steel with graphene platelets dispersed in a vegetable-based cutting fluid. *STLE Annual Meeting & Exhibition*, May 17-21, Dallas, Texas, USA.
- Uysal, A., 2016. "Investigation of flank wear in MQL milling of ferritic stainless steel by using nano graphene reinforced vegetable cutting fluid", *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 68, p. 446-451.
- Yi, S., Li, G., Ding, S., Mo, J., 2017. "Performance and mechanisms of graphene oxide suspended cutting fluid in the drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 29, p. 182-193.
- Zarbin, A.J.G. e Oliveira, M.M., 2013. "Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo vadis?", *Química Nova*, Vol. 36, No. 10, p. 1533-1539.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

THRUST FORCE AND TORQUE IN DRILLING AISI 304 USING MLG NANOFLUID UNDER RQL

Andressa Caroline da Silva Carvalho

André João de Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite, nº425, Cidade Baixa, CEP 90050-170, Porto Alegre, RS
engandressacarvalho@gmail.com; ajsouza@ufrgs.br

Rogério Valentim Gelamo

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, Av. Dr. Randolfo Borges Junior, nº 1250, CEP 38064-200, Uberaba, MG
rogelamo@gmail.com

Abstract. The drilling process is characterized by difficulties in the chip formation and chip removal from the cutting region and the generation of high temperatures due to shearing and work-hardening of the material at the bottom of the hole, especially in the machining of austenitic stainless steels. Such difficulties are intrinsic to the thrust force (F_f) and torque (M_t) generated during the process. Therefore, this work analyzed the influence of the multi-layered graphene (MLG) flakes dispersed into a cutting fluid on the output response variables (F_f and M_t) generated during the AISI 304 drilling using a solid carbide TiAlN-coated drill. As controllable factors, three input variables were considered at three levels each (cutting speed: $v_c = 25, 45, 65$ m/min; feed rate: $f = 0.07, 0.11, 0.15$ mm/rev.; flow rate: $q = 1.5, 2.0, 2.5$ l/h). The nanofluid was applied externally using the reduced quantity lubrication (RQL) method. The performance of RQL + MLG was evaluated by comparison with RQL without MLG. As a result, it has been observed that F_f and M_t have had some influence of v_c and/or q . Finally, it was not possible to state that the application of nanofluid brought more benefits than RQL without MLG.

Keywords: Drilling austenitic stainless steel. Thrust force. Torque. Multilayer graphene. Reduced quantity lubricant.

RESPONSIBILITY NOTICE

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