

INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE NANOFLUIDO À BASE DE GRAFENO MULTICAMADAS NO ACABAMENTO GERADO POR FRESAMENTO FRONTAL EM AÇO HARDOX® 450

Henrique A. Gabineski¹
Emerson S. Passari²
André J. Souza³

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) – Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) – Rua Sarmento Leite, nº 425 – CEP 90050-170 – Porto Alegre, RS.

¹henrique.gabineski@gmail.com; ²emerson.passari@gmail.com; ³ajsouza@ufrgs.br

Resumo. O Hardox® 450 é um aço de alta dureza e resistência ao desgaste utilizado na produção de equipamentos sujeitos a solicitação abrasiva, como em caçambas de caminhões e pás escavadeiras. Contudo, as características que tornam este um aço de elevada resistência fazem com que possua baixa usinabilidade. Caso não sejam utilizadas as melhores combinações de variáveis de entrada do processo, a usinagem deste tipo de material tende a apresentar elevadas rugosidades e, portanto, um acabamento inferior. Portanto, o presente trabalho realizou a comparação dos efeitos gerados a partir da usinagem com nanofluido à base de grafeno multicamadas aplicado em quantidade reduzida (NF-RQL) e usinagem a seco no fresamento frontal de acabamento do aço Hardox® 450. O planejamento experimental foi realizado através do Box-Behnken Design gerando 15 passes aleatorizados tendo, como variáveis de entrada a velocidade de corte, profundidade de corte e o avanço por dente, cada uma com três níveis de significância. Os resultados permitiram concluir que a usinagem com NF-RQL gerou rugosidades 50% inferiores em comparação com o fresamento a seco.

Palavras chave: Hardox® 450, fresamento frontal, rugosidade, nanofluido

1. INTRODUÇÃO

O principal paradigma da fabricação é a busca pela melhoria contínua dos processos acompanhando a evolução dos materiais utilizados como matéria-prima. Neste sentido observa-se a necessidade de produzir mais em menos tempo, com menos custos, com melhor qualidade e com menor geração de resíduos. Os caminhos para atingir estes objetivos são inúmeros, mas passam, principalmente, pelo desenvolvimento de ferramentas (geometrias, materiais e revestimentos) mais eficientes, utilização ótima de parâmetros de corte e a aplicação correta de meios lubrificantes.

Um exemplo de desenvolvimento de materiais com melhores propriedades, visando um melhor desempenho em serviço é o Hardox® 450 fabricado pela empresa SSAB Oxelosound. A sua característica principal é a alta resistência ao desgaste abrasivo. A propriedade que confere ao Hardox® 450 uma alta resistência ao desgaste é sua elevada dureza (450 HB), propiciando uma menor absorção de energia oriunda do escoamento de partículas abrasivas, além de uma menor intensidade e ocorrência de penetração destas partículas no corpo de prova. Apesar de ser classificado como um aço baixo carbono (abaixo de 0,3%) exibindo, portanto, alta resistência ao impacto (alta tenacidade), o Hardox® 450 apresenta elevada dureza devido ao processo de têmpera em toda a espessura, o que garante uma dureza uniforme (a dureza do núcleo corresponde a, no mínimo, 90% da dureza da superfície), além de um limite de resistência ao escoamento de 1250 MPa e resistência à tração de 1370 a 1600 MPa (SSAB, 2018). Em sua composição, possui alto teor de manganês, que induz o encruamento da superfície usinada e o surgimento da aresta postiça de corte na ferramenta (Machado et al., 2015). Devido às suas propriedades, as suas principais aplicações são em equipamentos de transporte de grãos, pás de escavadeiras e caçambas de caminhões. Desta forma, observa-se um aumento da vida útil destes produtos gerando redução de custos de manutenções ou substituições, bem como aumento na segurança operacional do equipamento (SSAB, 2018). No entanto, as características que beneficiam a sua aplicabilidade reduzem a sua usinabilidade.

Sem uma escolha otimizada para as condições de entrada na usinagem de materiais de difícil corte há uma tendência natural de obtenção de acabamentos inferiores. O acabamento superficial, além de ser um importante requisito de projeto, pode ser considerado um indicador da qualidade da usinagem, e a avaliação numérica da rugosidade uma forma de quantificá-lo. Assim, a rugosidade é sensivelmente influenciada pelos fatores do processo como vibrações (problemas de setup ou na máquina-ferramenta), desgastes da ferramenta, utilização inadequada de parâmetros de corte, material/geometria da ferramenta, e condições lubrificantes (Astakhov, 2011). Um aumento do avanço (f) resulta na tendência de crescimento dos picos e vales de rugosidade. Em relação ao raio de ponta da ferramenta (r_e), este deve ser pelo menos o dobro de f . Entretanto, não pode apresentar um valor elevado, uma vez que pode favorecer a ocorrência

de vibrações. Níveis de velocidade de corte (v_c) muito elevados também podem ocasionar vibrações. Porém, a utilização de valores muito baixos de v_c pode reduzir a temperatura do processo, aumentando a resistência do material e, portanto, a ocorrência de maiores forças de usinagem (Machado et al., 2015).

Um dos métodos mais consolidados na indústria para a tentativa de manutenção de boas condições de usinagem é a utilização de fluido de corte em abundância. Sistemas convencionais aplicam este fluido em baixa pressão e direcionado para a região de contato entre a ferramenta e a peça. De acordo com Davim et al. (2012), estes sistemas costumam não ser eficientes por utilizarem uma quantidade de fluido muito maior que a necessária, além de não conseguirem atingir a zona de corte efetivamente devido à obstrução apresentada pelos cavacos. Além disso, os autores explicam que a sua utilização apresenta inúmeras desvantagens como um negativo impacto ambiental, ocorrência de danos à saúde dos operadores e um aumento do custo do processo. Além disso, Machado et al. (2015), citam que a utilização de fluidos de corte reduz a temperatura na zona de corte, aumentando consequentemente a resistência do material, e promovendo maior desgaste da ferramenta e deterioração do acabamento usinado. Como alternativa, técnicas têm sido propostas nas últimas décadas visando a redução (e até eliminação) de fluidos de corte. De acordo com a vazão utilizada, existem diferentes métodos; dentre estes está a aplicação de lubrificante em quantidade reduzida (RQL) que compreende uma vazão de 0,5 a 5,0 l/h (Carvalho et al., 2019; Garcia et al., 2019). Além desta, o presente trabalho destaca a adição de flocos de grafeno multicamadas (MLG – *Multilayer Graphene*) ao fluido de corte, formando os nanofluidos (NF-MLG). O MLG pode ser descrito como a formação de estruturas hexagonais por átomos de carbono, em dimensões nanométricas, ou seja, o grafeno é a unidade básica das estruturas do grafite, das fibras e nanotubos de carbono (Novoselov, 2011). A utilização de nanofluidos permite maior capacidade na remoção de calor na região de corte, visto que a adição das partículas aumenta o coeficiente de condução térmica do fluido. O NF-MLG também atua como lubrificante na usinagem, visto que a facilidade no deslizamento de suas camadas auxilia na redução do atrito na região de corte, reduzindo as forças de usinagem e temperatura, além de resultar em melhores acabamentos (Li et al., 2019).

Os métodos de otimização experimental visam reduzir o número necessário de execuções, além de facilitar e otimizar a modelagem dos problemas, bem como as análises dos resultados mapeando o grau de influência das variáveis de entrada nas variáveis resposta. Um dos modelos de segunda ordem mais utilizados é o experimento de Box-Behnken (BBD) que se caracteriza pela utilização de três níveis (mínimo, médio e máximo) para cada fator de entrada. A grande vantagem do BBD é o maior custo-benefício, pois permite um menor número de execuções, com a manutenção de resultados satisfatórios. Para um experimento com três variáveis de entrada são necessárias 15 execuções, das quais 12 se destinam à combinação dos valores máximos ou mínimos de dois dos parâmetros e o valor médio da outra variável, enquanto os três restantes se referem à interação dos valores médios dos três fatores (Montgomery, 2012; Garcia et al., 2019).

Assim, tendo em vista as dificuldades intrínsecas dos processos de usinagem de aços Hardox® 450 e as recentes alternativas de lubrificarrefrigeração, pretende-se investigar de maneira comparativa a aplicação de quantidade reduzida de nanofluido (NF-MLG) no fresamento frontal do aço de alta resistência Hardox® 450 com a usinagem deste a seco. Para tanto, o planejamento e a análise do experimento serão realizados via BBD combinando as variáveis de entrada e verificando seu efeito sobre a rugosidade nas duas formas de usinagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 apresenta a composição química média do Hardox® 450 utilizado segundo certificado de inspeção da fabricante SSAB número 850210068 (maio, 2019).

Tabela 1. Composição Química do Hardox® 450 (% massa)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	B	S
0,163	0,207	1,083	0,096	0,093	0,020	0,011	0,0016	0,001

A experimentação foi executada no centro de usinagem CNC Romi Discovery 308 com potência máxima de 5,5 kW e rotação máxima de 4000 rpm a partir do fresamento frontal a seco e com nanofluido em quantidade reduzida (NF-RQL).

O nanofluido (NF) usado é constituído pelo fluido sintético integral à base de água Quimatic Jet (Quimatic/Tapmatic) com adição de flocos de grafeno multicamadas (MLG) com área de 1 a 10 μm^2 e espessura de 1 a 20 nm a uma concentração mássica de 0,05%. Os flocos de MLG foram obtidos por esfoliação da grafite natural expandida termicamente com ácidos a alta temperatura, precedida de um processo ultrassônico para esfoliação mecânica (Carvalho et al., 2019; Oliveira et al., 2019). A dispersão do pó seco de MLG ao Quimatic Jet foi feita através de um homogeneizador ultrassônico por duas horas. Após essa etapa, o uso de ultrassom não é mais necessário. No entanto, devido à tendência de decantação das nanopartículas de grafeno, antes da usinagem realizou-se a agitação manual do nanofluido para uma nova homogeneização. O NF foi aplicado em RQL com o auxílio do nebulizador IV Tapmatic a uma vazão de 2,0 l/h e pressão de 3 bar (300 kPa) na linha de ar comprimido.

Os corpos de prova retangulares (100 x 90 mm) com furos para fixação na mesa do centro de usinagem foram produzidos a partir do processo de corte laser, oriundos de uma chapa de Hardox® 450 com 6,35 mm de espessura.

Como ferramenta de corte foram utilizados dois pares de insertos intercambiáveis de metal-duro Walter Tools Tiger-tec Silver modelo ADMT10 classe WSM35 com revestimento PVD ($\text{TiAlN} + \text{Al}_2\text{O}_3$) e raio de ponta $r_e = 0,8$ mm, fixados em um cabeçote Walter Tools Xtra-tec F4042R.W20.02 com 20 mm de diâmetro nominal, 35 mm de comprimento e suporte para dois insertos. Um par de insertos foi usado no fresamento das chapas para cada meio lubrificador, resultando em um comprimento total usinado de 510 mm por par. O erro de batimento na montagem foi verificado através do relógio comparador Starrett com resolução de 1 μm , apresentando valor igual ou menor que 5 μm .

Em cada chapa, seis passes com 34 mm de comprimento (amostras) foram usinados usando combinações aleatórias dos parâmetros de entrada (velocidade de corte v_c , avanço por dente f_z e profundidade de corte axial a_p) – cada um em três níveis – geradas via BBD através do software Minitab® 18, o que resultou em 15 amostras iniciais (ver Tab. 2) e mais três passes de validação do modelo para as condições a seco e com NF-RQL. A escolha dos níveis para a_p baseou-se no valor do raio de ponta do inserto (50%, 100% e 150% r_e), enquanto para v_c e f_z seguiram os valores recomendados pela SSAB.

Os parâmetros de rugosidade média (R_a) e total (R_t) e os perfis gerados na superfície durante a usinagem (variáveis de resposta) foram registrados em cada amostra em três pontos da região estável (desconsiderando a entrada e a saída da fresa) de cada amostra através do rugosímetro portátil Mitutoyo® modelo SJ-201P com resolução de 0,01 μm utilizando um comprimento de amostragem $l_e = 0,8$ mm e um comprimento de medição $l_m = 5 l_e = 4,0$ mm. A textura da superfície fresada foi registrada e avaliada através do microscópio digital USB Dino-Lite® Pro modelo AM 413ZT. A partir deste avaliou-se também o estado da ferramenta durante e após os testes, garantindo que a largura da marca de desgaste de flanco não ultrapassasse o valor limite de 0,1 μm .

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para explicar o efeito de cada variável de controle (v_c , f_z e a_p) sobre as variáveis de resposta (R_a e R_t) para um intervalo de confiança de 95%. Por fim, realizou-se a estimação dos níveis ótimos dos parâmetros de entrada através da construção dos gráficos de contorno com base na menor rugosidade obtida para as condições a seco e com NF-RQL.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 mostra os 15 passes gerados a partir do BBD. A tabela mostra também a média dos três valores medidos de R_a e R_t em cada passe para as condições a seco e com NF-RQL. Vale ressaltar que as variáveis de entrada e a ordem dos passes com seus respectivos parâmetros foram idênticos para as duas condições.

Tabela 2. Variáveis de resposta em função das variáveis controláveis de entrada

Passe	Variáveis de Controle			Variáveis de Resposta			
				A seco		Com NF-RQL	
	v_c [m/min]	a_p [mm]	f_z [mm/dente]	R_a [μm]	R_t [μm]	R_a [μm]	R_t [μm]
1	120	1,2	0,10	0,50	3,61	0,28	1,98
2	80	0,4	0,10	0,39	2,05	0,19	1,34
3*	100	0,8	0,10	0,44	2,50	0,20	1,30
4	100	1,2	0,05	0,31	1,86	0,19	1,38
5	100	0,4	0,15	0,49	2,49	0,24	1,69
6	100	0,4	0,05	0,33	1,59	0,16	1,43
7	80	0,8	0,05	0,31	1,51	0,14	0,83
8*	100	0,8	0,10	0,40	2,35	0,14	0,88
9	80	1,2	0,10	0,43	2,19	0,18	1,23
10	120	0,4	0,10	0,41	2,07	0,17	1,14
11	120	0,8	0,15	0,40	2,69	0,22	1,63
12	80	0,8	0,15	0,47	2,46	0,28	1,64
13*	100	0,8	0,10	0,46	2,61	0,20	1,39
14	100	1,2	0,15	0,70	6,92	0,36	2,09
15	120	0,8	0,05	0,33	1,70	0,14	0,84

*O BBD gera três passes de controle repetidos em que as variáveis de entrada estão com seus valores médios.

Observam-se nas quatro situações em que está presente o menor nível do avanço por dente (f_z) no fresamento frontal a seco (passes 4, 6, 7 e 15) os menores valores de rugosidade média ($0,31 \leq R_a \leq 0,33$ μm) e total ($1,51 \leq R_t \leq 1,83$ μm). Este fato sugere que f_z possui grande influência sobre a rugosidade gerada no fresamento a seco do Hardox® 450.

Já com NF-RQL, os menores valores de R_a e R_t estão mais associados com a combinação de f_z com a_p e v_c (passes 7, 8* e 15). Como o resultado do passe 8* foi diferente (melhor) dos resultados encontrados nos passes 3* e 13* (semelhantes), isso denota que os flocos de MLG podem apresentar efeitos aleatórios sobre a lubrificação por causa dos diferentes volumes e concentrações de partículas na interface ferramenta-peça.

Nota-se ainda que o maior valor registrado foi observado no passe 14 para ambas as condições lubrificantes devido à combinação mais severa de parâmetros, isto é, f_z e a_p máximos e v_c médio. Além disso, os maiores valores de R_a e R_t foram gerados no corte a seco em comparação com a utilização de NF-RQL (respectivamente 94% e 231% maior).

A Figura 1 comprova essa diferença de resultados entre os meios lubrificantes utilizados, já que em todos os passes, os valores de R_a e R_t obtidos na usinagem a seco foram significativamente maiores que os gerados no fresamento com NF-RQL. No caso, a utilização desta lubrificação permitiu uma redução média de 52% no valor de R_a , em comparação com a usinagem a seco. Em relação a R_t , a redução média observada foi de 42%. Os melhores valores encontrados para o fresamento com NF-RQL eram esperados devido à presença de lubrificante em altas pressões, tendo uma maior capacidade de acesso à interface ferramenta-peça. Segundo Yi et al (2017), o uso de grafeno intensifica a ação lubrificante, resultando na redução do atrito e das forças de usinagem. Estas qualidades, aliadas à excelente condutividade térmica, são benéficas à usinagem de materiais de difícil corte e com tendência ao encruamento como o Hardox[®] 450.

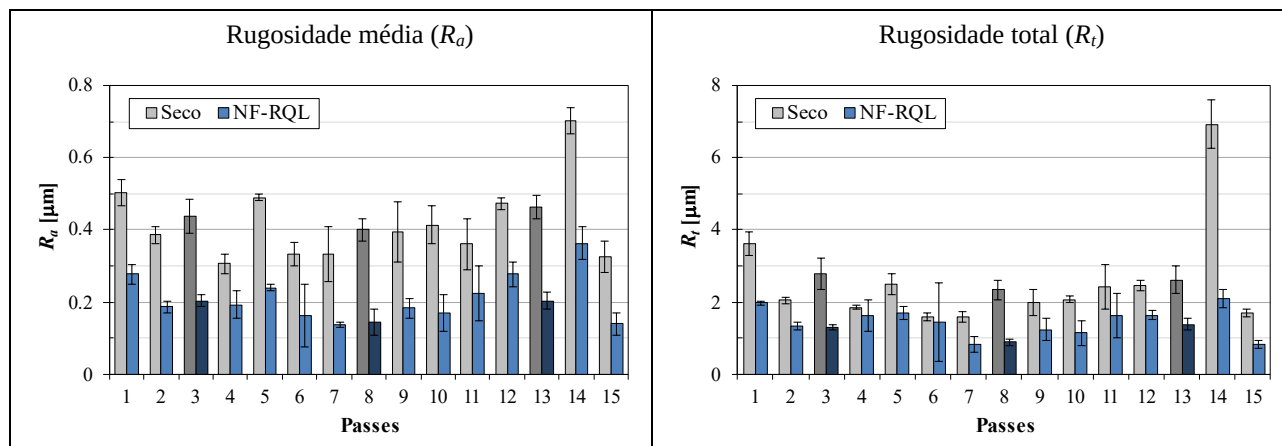


Figura 1. Valores de rugosidade por passe na usinagem a seco e com NF-RQL.

A análise dos passes de controle (3*, 8* e 13*) com parâmetros médios permite perceber que os resultados de rugosidade obtidos apresentaram valores próximos, o que demonstra a estabilidade do processo. A uniformidade dos valores de rugosidade nestes passes também é explicada pela não ocorrência de falhas visivelmente observáveis na ferramenta de corte. Assim, a ferramenta utilizada é indicada para a usinagem de superligas resistentes ao calor e aços inoxidáveis, e mostrou-se adequada para a usinagem do material em estudo nas condições impostas a ela.

3.1. Perfis de Rugosidade

A imagem da superfície usinada (ampliação de 50x) e os perfis de rugosidade foram investigados nos passes 7 e 14, os que geraram, respectivamente, os menores e maiores valores de R_a e R_z com o intuito de investigar mais a fundo o efeito dos parâmetros na textura da superfície fresada. A Figura 2 ilustra os menores valores e a Fig. 3 os maiores.

Evidencia-se nos perfis de rugosidade (Fig. 2) a maior amplitude dos picos e dos vales na usinagem a seco. Nota-se também ondulação em ambos os casos. Segundo Machado et al. (2015), estas podem ser causadas por vibrações e flexões da ferramenta e/ou peça devido à força de usinagem, temperatura de corte ou a erros de fixação da peça ou ferramenta. Além disso, peças esbeltas estão mais susceptíveis a forças elásticas e dinâmicas e, por conseguinte, as ondulações são mais destacadas. A imagem da superfície fresada a seco apresenta-se muito semelhante à obtida com NF-RQL. Em ambas são observadas ranhuras finas, com pequenos e uniformes espaçamentos entre elas.

Na condição mais severa (Fig. 3), novamente houve a presença de ondulação no perfil, a qual pode ter sido causada por vibrações devido aos fatores supracitados. O perfil ondulação + rugosidade gerou amplitudes pico-vale no comprimento de medição que chegaram a 50 µm na condição a seco. Esta superfície fresada mostra marcas profundas, sem exatamente apresentar um padrão, o que sugere a ocorrência de arrancamento de material (falhas) no lugar de um natural cisalhamento. A combinação de parâmetros agressivos com a ausência de lubrificação contribuíram, provavelmente, para a geração de maiores forças de atrito e temperaturas mais elevadas na zona de corte, ocasionando tais falhas na superfície e a elevada amplitude de picos e vales do perfil combinado. Machado et al. (2015) citam que as falhas são interrupções não intencionais, inesperadas e indesejáveis na topografia típica da superfície que podem surgir durante o corte. Por isso que os dois perfis (ondulação e rugosidade) foram apresentados somente na condição NF-RQL. Já as imagens das superfícies fresadas exibem marcas de usinagem profundas, de maior espaçamento e com estrias mais evidentes devido aos maiores valores de f_z e a_p empregados no passe.

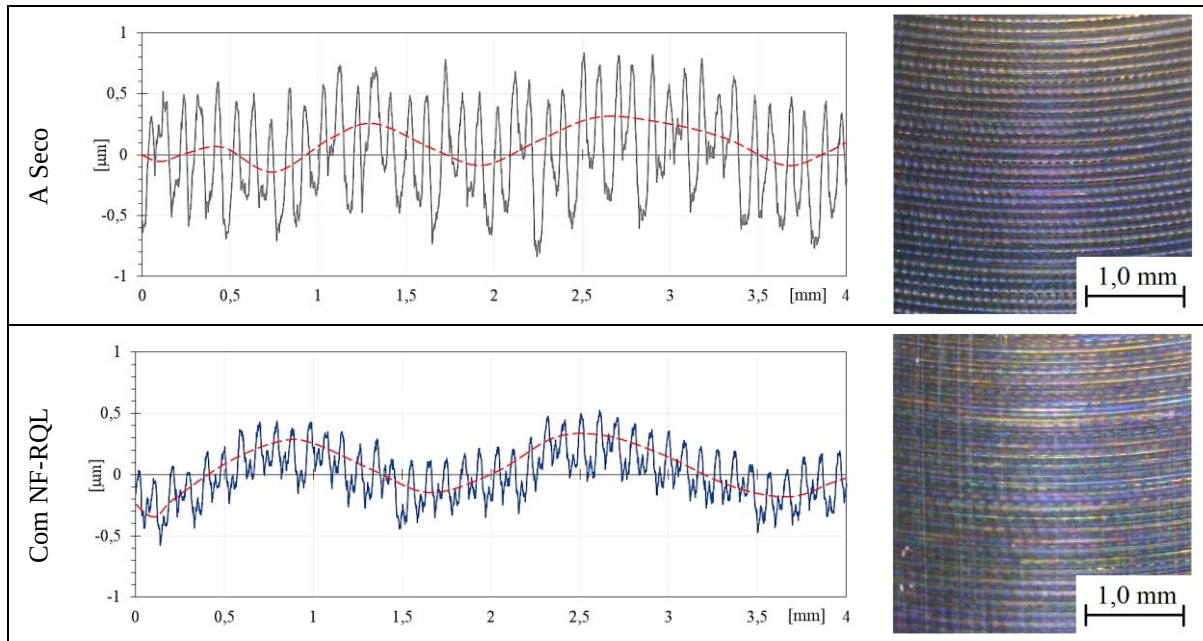


Figura 2. Perfis de rugosidade e superfícies usinadas referentes ao passe 7 ($v_c = 80$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/dente, $a_p = 0,8$ mm) para as condições a seco e com NF-RQL. As linhas pontilhadas em vermelho representam a ondulação.

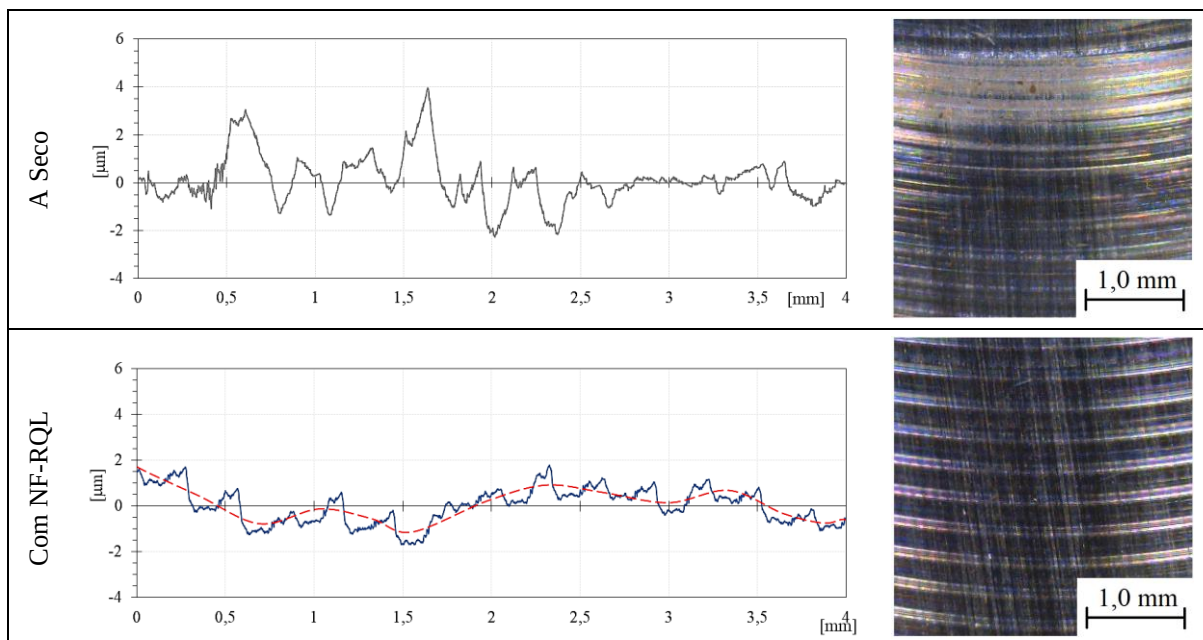


Figura 3. Perfis de rugosidade e superfícies usinadas relativas ao passe 14 ($v_c = 100$ m/min, $f_z = 0,15$ mm/dente e $a_p = 1,2$ mm) para as condições a seco e com NF-RQL. A linha pontilhada em vermelho indica a ondulação.

3.2. Análise de Variância

A análise de variância (ANOVA) dos dados obtidos permitiu determinar as variáveis controláveis (v_c , a_p e f_z) que exercem maior influência sobre as variáveis de resposta (R_a e R_t). A Figura 4 mostra os gráficos de Pareto de tais influências nas condições a seco e com NF-RQL. No fresamento a seco, apenas o efeito linear “C” do avanço por dente (f_z) apresenta influência significativa sobre a rugosidade para um intervalo de confiança de 95%. Sobre R_a , a variável f_z apresentou um nível de significância p-valor = 0,006 (confiança de 99,4%), além de apresentar uma contribuição na resposta de 55,8% e um coeficiente de determinação $R^2 = 87,1\%$. Já sobre R_t , o f_z teve p-valor = 0,049 (95,1% de confiança), influência nos resultados de 25,7% e coeficiente de determinação $R^2 = 80,7\%$. Tais resultados representam

uma boa confiabilidade, visto que para efeitos de análise estatística, o valor de $R^2 \geq 70\%$ representa que o modelo está adequado (Montgomery, 2012).

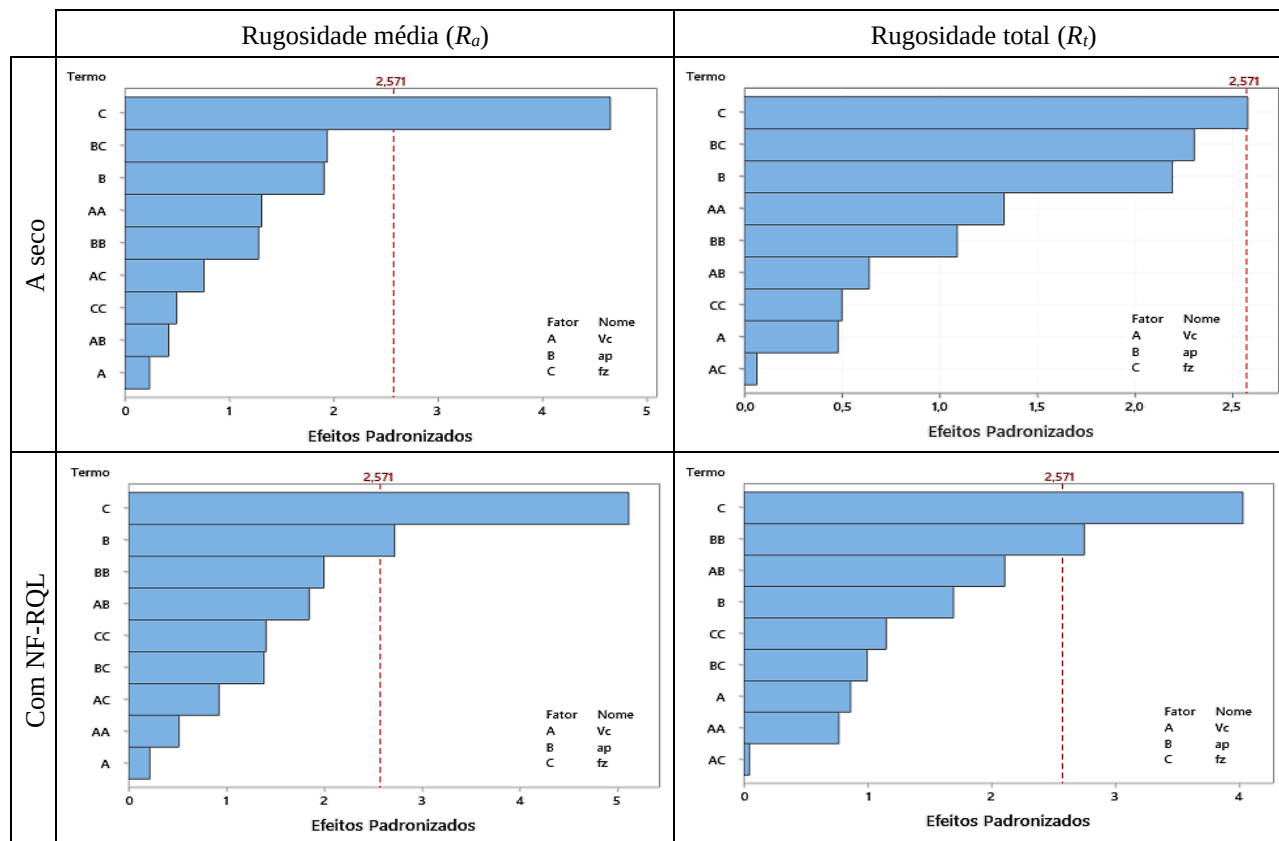


Figura 4. Gráfico de Pareto sobre a influência das variáveis de controle nas variáveis de resposta

Na usinagem com NF-RQL, o avanço por dente (f_z) e da profundidade de corte axial (a_p) influenciam significativamente a rugosidade para um intervalo de confiança de 95%. Isso mostra a influência das dimensões da seção de corte na penetração do nanofluido na interface ferramenta-peça. Yi et al. (2017) afirmam que o grafeno possui uma estrutura de camadas que contribui para a redução da tensão de cisalhamento e o atrito. Portanto, um maior a_p tende a permitir um empilhamento maior de camadas, resultando em menores rugosidades. Contudo, Baptista (2003) cita que valores de a_p muito grandes acarretam em um acúmulo excessivo de grafeno (o qual possui elevada resistência ao rompimento), que tende a ter um comportamento abrasivo que pode provocar aumento da rugosidade. Além disso, maiores a_p geram maior área de contato entre a peça e a ferramenta ocasionando aumento do atrito e vibração. Em R_a , a variável f_z (efeito linear “C”) apresentou um p-valor = 0,004 (confiança de 99,6%), uma contribuição na resposta de 51,4% e um $R^2 = 90,2\%$, enquanto que a_p (efeito linear “B”) mostrou um p-valor = 0,042 (confiança de 95,8%) e uma contribuição de 14,5% sobre a rugosidade média. Em R_t , o f_z (efeito linear “C”) teve p-valor = 0,01 (99,0% de confiança), influência nos resultados de 40,8% e coeficiente de determinação $R^2 = 87,5\%$. Já a_p (efeito quadrático “BB”) apresentou p-valor = 0,040 (96,0% de confiança) e 17,9% de contribuição sobre a rugosidade total.

3.3. Gráficos de Contorno

Os gráficos de contorno ilustrados na Fig. 5 permitem analisar a maneira na qual as rugosidades R_a e R_t , em ambos os métodos, se comportam frente à variação de a_p e v_c , com f_z fixado em seu nível mínimo (0,05 mm/volta), visto que esta é a variável de maior influência nos resultados. A partir desta análise almeja-se estimar os valores ótimos de cada parâmetro de maneira a se obter os mínimos valores para as rugosidades.

Observa-se que valores mínimos de R_a resultam da combinação entre velocidades de corte $80 < v_c < 85$ m/min e profundidades de corte axiais $0,65 < a_p < 1,2$ mm para o corte a seco e de $0,75 < a_p < 1,0$ mm para o NF-RQL. Já para R_t , as menores rugosidades obtidas no corte a seco são um resultado do uso de $80 < v_c < 85$ m/min e $0,75 < a_p < 1,2$ mm, enquanto que com NF-RQL, $80 < v_c < 90$ m/min e $0,70 < a_p < 1,2$ mm. Conforme explicado anteriormente, o uso de lubrificação em conjunto com MLG de excelente condutividade térmica permitem uma melhor transferência de calor e, portanto, uso de maiores velocidades de corte. Devido ao empilhamento das camadas de grafeno, baixas profundidades de corte axial não contribuem para a redução das rugosidades neste caso em estudo.

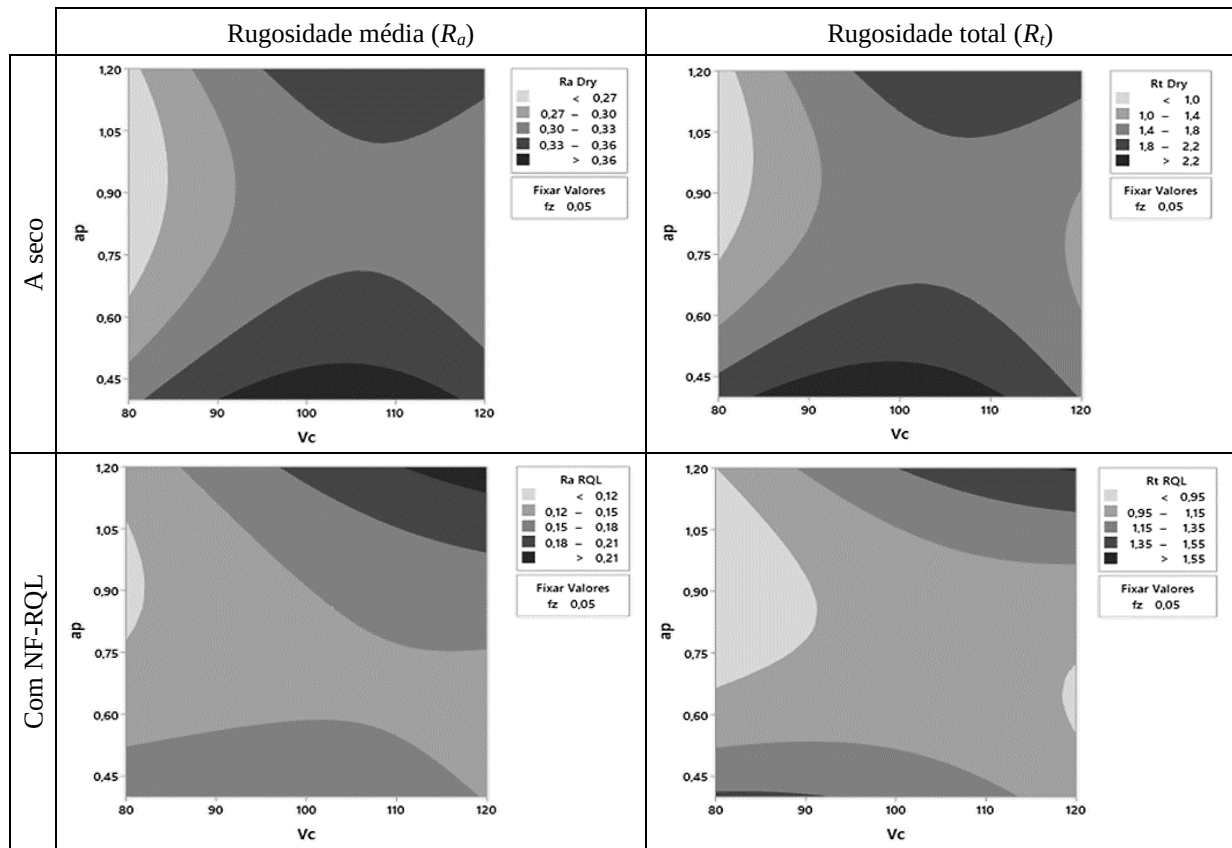


Figura 5. Gráficos de contorno para R_a e R_z em função de v_c e a_p considerando $f = 0,05$ mm/volta

Para uma minimização conjunta de $R_a < 0,27 \mu m$ e $R_t < 1,0 \mu m$ com corte a seco, estima-se que seja necessário o uso de $v_c = 85$ m/min, $a_p = 1,0$ mm e $f_z = 0,05$ mm/volta. No caso de NF-RQL, a previsão para os menores valores simultâneos de $R_a < 0,12 \mu m$ e $R_t < 0,95 \mu m$ ocorrem a partir do uso de $v_c = 82$ m/min, $a_p = 0,9$ mm e $f_z = 0,05$ mm/dente.

4. CONCLUSÕES

O trabalho investigou a aplicação de quantidade reduzida de nanofluido (NF-MLG) em comparação à usinagem a seco no acabamento da superfície gerada por fresamento frontal do aço Hardox® 450 utilizando o experimento de Box-Behnken de três fatores. As principais conclusões foram:

- A utilização de NF-RQL gerou valores de rugosidade entre 40% e 50% menores aos resultados alcançados com a usinagem a seco devido, principalmente, à ação lubrificante do nanofluido.
- Tanto na condição a seco quanto com NF-RQL, o passe com as condições menos severas (menores v_c e f_z e médio a_p) gerou os menores valores de rugosidade média (R_a) e total (R_t). O oposto (maiores valores de R_a e R_t) se confirmou com a aplicação dos parâmetros mais agressivos (maiores f_z e a_p , e médio v_c).
- A análise de variância (ANOVA) mostrou que f_z é a variável com maior influência sobre a rugosidade, em ambas as condições. Para um intervalo de confiança de 95%, somente a influência de f_z sobre a rugosidade foi significativa na usinagem a seco; com NF-RQL, além de f_z , a_p também foi significativa, mostrando que a área da seção de corte afeta a penetração do fluido e a lubrificação da zona de corte.
- Os gráficos de contorno indicaram que a utilização ótima das variáveis de entrada deve se concentrar nos menores valores de v_c e f_z e médios-altos valores de a_p nas duas condições (a seco e com NF-RQL).
- Apesar de os resultados com NF-RQL serem amplamente superiores em comparação ao fresamento frontal a seco no que se refere à rugosidade da superfície usinada, não é possível afirmar que esse seja o método mais recomendado, pois mais estudos são necessários. Além disso, a opção pelo uso ou não de NF-RQL na fabricação por usinagem passa também por requisitos de projeto e análises de custos.

5. AGRADECIMENTOS

À TMSA (Tecnologia em Movimentação), pela doação do material e preparação dos corpos de prova; à Walter Tools, pela doação das ferramentas; ao Laboratório de Filmes Finos e Processos de Plasma (LFFPP/UFTM), pelo nanofluido à base de flocos de multicamadas de grafeno; e a CAPES pela bolsa de estudos concedida (nº 88887.495511/2020-00).

6. REFERÊNCIAS

- Astakhov, V. P., 2011. *Modern Machining Technology – A Practical Guide*. 1. Ed., Woodhead Publishing, 2011.
- Baptista, D. L., 2003. *Novas Fases Amorfas de Carbono Produzidas por Irradiação Iônica de Filmes de C₆₀, α-C:H*. Tese de Doutorado. Instituto de Física, UFRGS, 2003.
- Carvalho, A. C. S., Gelamo, R. V. e Souza, A. J., 2019. “Esforços de corte na furação do AISI 304 com aplicação de nanofluido MLG em RQL”. In: *10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, São Carlos, SP.
- Davim, J. P., Dixit, U. S. e Sarma, D. K., 2012. *Environmentally Friendly Machining*. 1. Ed., Springer-Verlag, New York.
- Garcia, R. F., Feix, E. C., Mendel, H. T., Gonzalez, A. R. e Souza, A. J., 2019. “Optimization of cutting parameters for finish turning of 6082-T6 aluminum alloy under dry and RQL conditions”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, A317.
- Li, G., Yi, S., Li, N., Pan, W., Wen, C., Ding, S., 2019. “Quantitative analysis of cooling and lubricating effects of graphene oxide nanofluids in machining titanium alloy Ti6Al4V”, *Journal of Materials Processing Tech*, Vol. 271, p. 584-598.
- Machado, Á. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. e Silva, M. B., 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 3. Ed., Blucher, São Paulo.
- Montgomery, D. C., 2012. *Design and Analysis of Experiments*. 8. Ed., John Wiley and Sons.
- Novoselov, K. S., 2011. “Graphene: Materials in the flatland”. *International Journal of Modern Physics B*. Vol. 25, No. 30, p. 4081-4106.
- Oliveira, D., Silva, R.B., Gelamo, R.V., 2019. “Influence of multilayer graphene platelet concentration dispersed in semi-synthetic oil on the grinding performance of Inconel 718 alloy under various machining conditions”, *Wear*, Vol. 426-427, Part B, p. 1371-1383.
- SSAB, 2018. *Datasheet 168br Hardox® 450*. 12 Ago. 2020.
<www.ssab.com.br/products/brands/hardox/products/hardox-450>
- Yi, S., Li, G., Ding, S. e 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.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE OF THE USE OF MULTILAYER GRAPHENE-BASED NANOFLUID IN THE FINISHING END MILLING HARDOX® 450 STEEL

Henrique A. Gabineski¹

Émerson S. Passari²

André J. Souza³

Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) – Department of Mechanical Engineering (DEMEC) – Laboratory of Automation in Machining (LAUS) – 425 Sarmiento Leite St. – Zip Code 90050-170 – Porto Alegre, RS, Brazil.

¹henrique.gabineski@gmail.com; ²emerson.passari@gmail.com; ³ajsouza@ufrgs.br

Abstract. Hardox® 450 is high hardness and wear-resistant steel used to produce equipment subjected to abrasive stress, such as truck buckets and excavator shovels. However, the characteristics which make this a high-strength steel cause it low in machinability. If the best combinations of process input variables are not used, machining this kind of material tends to have high roughness and an inferior finishing. Thus, the present work compares the machining effects using multilayer graphene-based nanofluid applied in reduced quantity lubrication (NF-RQL) and dry cutting in the finishing end milling Hardox® 450 steel. The experimental design was carried out through Box-Behnken, generating 15 randomized runs, considering input variables cutting speed, depth of cut, and feed per tooth, each with three levels. The results allowed us to conclude that the NF-RQL milling generated roughness values 50% lower than dry milling.

Keywords: Hardox® 450, end milling, surface roughness, nanofluid

RESPONSIBILITY NOTICE

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