

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

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

por

Henrique Almeida Gabineski

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2020

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO**CIP - Catalogação na Publicação**

Gabineski, Henrique Almeida
INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE NANOFLUIDO À BASE DE
GRAFENO MULTICAMADAS NO ACABAMENTO GERADO POR
FRESAMENTO FRONTAL EM AÇO HARDOX 450 / Henrique
Almeida Gabineski. -- 2020.
20 f.
Orientador: André João de Souza.

Coorientador: Êmerson dos Santos Passari.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2020.

1. Hardox 450. 2. Nanofluido. 3. Fresamento. 4.
Rugosidade. 5. Grafeno Multicamadas. I. Souza, André
João de, orient. II. Passari, Êmerson dos Santos,
coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Henrique Almeida Gabineski

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

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: **Processos de Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: Eng. Émerson dos Santos Passari

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Porto Alegre, 24 de novembro de 2020

Aos meus avós, João e Lúcia, independentemente de onde estejam,
e também à minha avó Jussara, por todo amor e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor André João de Souza pela sua orientação e ensinamentos que garantiram a execução deste trabalho, permitindo meu desenvolvimento acadêmico, profissional e pessoal.

À minha mãe, Cibele, por toda a renúncia, cobranças e apoio sem as quais, certamente, nada disso seria possível.

Ao meu pai, João Eduardo, pela amizade, caráter e por sempre estar presente incentivando e contribuindo com tudo o que fosse necessário.

Ao meu irmão, Lucas, por ser a minha maior referência, trilhando caminhos ao qual sempre segui e seguirei.

À minha namorada, Fernanda, por ser meu maior exemplo de foco, perseverança e resiliência na busca dos objetivos.

Ao LAUS, por ter disponibilizado a estrutura física para a realização dos experimentos. Em especial, agradeço ao Guilherme Vargas Schirmer e ao meu Coorientador Emerson Passari pela solicitude, parceria e ensinamentos, fundamentais para a realização do trabalho.

À TMSA – Tecnologia em Movimentação, pela doação e preparação do Hardox[®] 450. Agradeço, especialmente, ao Everaldo Martins por toda a sua parceria e contribuição para o desenvolvimento deste trabalho e meu crescimento profissional.

À Walter Tools, pela doação dos insertos utilizados no trabalho e pelo incentivo à pesquisa.

Ao Laboratório de Filmes Finos e Processos de Plasma (LFFPP/UFTM), em especial, ao Prof. Rogério V. Gelamo, pelo nanofluido à base de flocos de multicamadas de grafeno.

Finalmente, agradeço a todos meus amigos e familiares que acompanharam as vitórias e derrotas deste processo, mas que sempre se fizeram presentes com incentivo incondicional.

*“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens,
mas em ter novos olhos.”*

(Marcel Proust)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2020

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

Gabineski, Henrique Almeida
henrique.gabineski@gmail.com

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

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 to conclude that the NF-RQL milling generated roughness values 50% lower than dry milling.

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

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 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 de 450 HB, propiciando uma menor absorção de energia na placa, oriunda do escoamento de partículas abrasivas, além de uma menor intensidade e ocorrência de penetração destas partículas na chapa, conforme mostra a Figura 1 [SSAB, 2018]. No caso, a chapa de menor resistência absorve mais energia do escoamento e, portanto, sofre maior grau de desgaste.

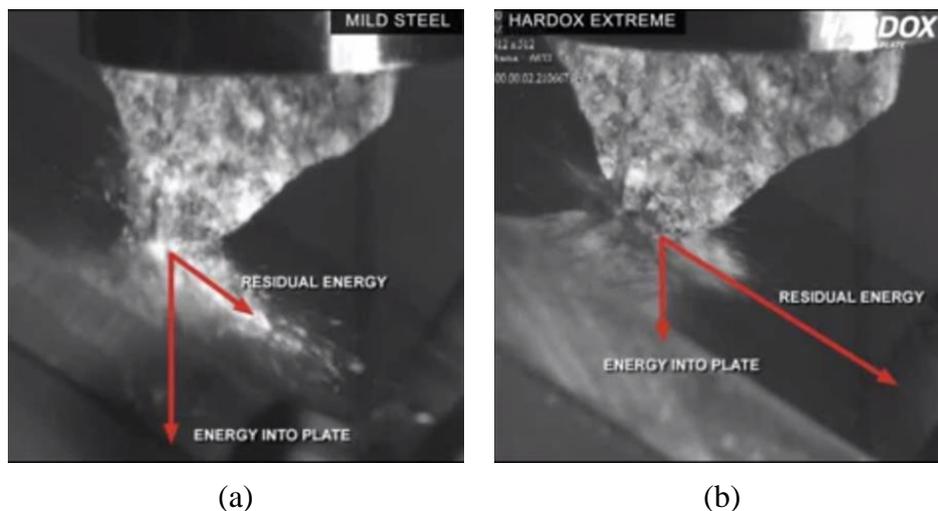


Figura 1 – Teste comparativo entre o efeito de partículas abrasivas em chapas: (a) de baixa de dureza; (b) Hardox[®] 450 [SSAB, 2018]

Este é um aço de elevada dureza e com baixo teor de carbono (abaixo de 0,3%) exibindo, portanto, alta resistência ao impacto (alta tenacidade), além de favorecer os processos de dobra e soldagem (alta ductilidade) [Silva e Mei, 2006]. Apesar de ser classificado como um aço baixo carbono, o Hardox[®] 450 apresenta a sua 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, este aço possui alto teor de manganês, que induz o encruamento da superfície usinada e o surgimento da aresta postíça de corte na ferramenta [Machado et al, 2015].

Devido às propriedades de alta resistência ao desgaste e alta tenacidade do Hardox[®] 450, 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. No entanto, as características que beneficiam a sua aplicabilidade reduzem a sua usinabilidade [SSAB, 2018].

Sem uma escolha otimizada para as condições de entrada na usinagem de materiais com baixa usinabilidade há uma tendência natural de obtenção de acabamentos inferiores. Segundo Astakhov (2011), além de ser um importante requisito de projeto, o acabamento superficial, em algumas aplicações, pode ser considerado um indicador da qualidade da usinagem e a avaliação numérica da rugosidade uma forma de quantificá-lo. Machado et al. (2015) citam

que a rugosidade descreve os erros ou imperfeições microgeométricos inerentemente gerados pela ação de corte, podendo ser representada por diferentes parâmetros de corte.

A distribuição de rugosidades nada mais é do que picos e vales distribuídos acima ou abaixo de uma linha média da superfície medida. A rugosidade média (R_a) fornece a média aritmética das distâncias entre a linha média e os picos e vales do perfil, medidos no comprimento de medição (l_m). Apesar deste parâmetro ser recomendado para operações de fresamento por produzirem sulcos bem orientados, o R_a apresenta algumas desvantagens, como o fato de valores de vales ou picos atípicos não serem percebidos. Há casos em que se necessitam informações adicionais da condição superficial da peça e, portanto, os maiores valores de picos e vales podem representar um bom indicador. Nestes casos pode-se utilizar a rugosidade total (R_t) obtida pela distância do maior pico ao maior vale no comprimento de medição [Sória, 2016].

A rugosidade (principal propriedade do acabamento) 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_c), 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. Com a mesma justificativa, em alguns casos, a utilização de fluidos de corte pode contribuir com o aumento da rugosidade através da redução da temperatura e, conseqüentemente, maior resistência e maior desgaste da ferramenta [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. Conforme Davim et al (2012), estes sistemas não são eficientes por utilizarem uma quantidade exagerada de fluido, muito maior do que a necessária, além destes não conseguirem atingir a zona de corte com eficiência, devido a 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.

Como alternativa, diversas técnicas de lubrificação têm sido propostas nas últimas décadas visando a redução e até a eliminação de fluidos de corte. De acordo com a vazão utilizada, existem diferentes técnicas; dentre elas está a aplicação de fluido lubrificante em quantidade reduzida (RQL – *Reduced Quantity Lubrication*) 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 [Fonseca, 2011; Novoselov, 2011].

Cavichioli (2020) cita que velocidades de corte cada vez maiores são aplicadas na usinagem, o que resulta em altas temperaturas. A consequência deste fato é que a utilização de fluidos, nestes casos, não apresenta ganhos ao processo, uma vez ocorre a conversão quase instantânea deste em vapor. Assim, os fabricantes de ferramentas de corte têm buscado desenvolver insertos com coberturas e geometrias que apresentem maior resistência mecânica e térmica a fim de se obter maior vida útil e propiciar a utilização de valores maiores para os

parâmetros de corte e, assim obter maior produtividade e redução (ou até eliminação) do uso de fluidos de corte. Estudos mostraram que, em fresamento, os insertos modernos podem apresentar um aumento de 40% na vida útil quando em processo sem utilização de refrigerante. O que explica este fenômeno é que as fresas possuem várias arestas cortantes que não permanecem em contato com a zona de corte continuamente e, portanto, ocorre uma variação de temperatura na ferramenta. O uso de fluidos refrigerantes agrava as variações térmicas e contribuem para a ocorrência de trincas térmicas. Assim, segundo Hübner (2016), em processos onde há elevada velocidade de corte (como na etapa de acabamento) ou em casos de usinagem com utilização de ferramentas de metal duro modernas (projetadas para variações normais de temperatura), o fresamento a seco pode trazer maior vida útil para ferramenta e, assim, maior produtividade e economia na fabricação de peças.

A utilização ou não de meios lubrificador-refrigerantes, bem como a forma de aplicação ou a obtenção de parâmetros de corte ótimos são análises obtidas, na maioria das vezes, através de experimentos práticos que por si só também podem ser executados de maneira otimizada a partir de ferramentas matemáticas. De acordo com Montgomery (2012) e Garcia et al. (2019), os métodos de otimização experimental, como a Metodologia da Superfície de Resposta (RSM – *Response Surface Methodology*), visam reduzir o número necessário de ensaios, além de facilitar e otimizar a modelagem dos problemas, bem como as análises dos resultados mapeando o grau de influência das variáveis controláveis de entrada (velocidade de corte, avanço por dente e profundidade axial de corte) com as variáveis de resposta (parâmetros de rugosidade). Ao se considerar três níveis de cada variável de controle, utiliza-se a experimentação de Box-Behnken (BBD).

Assim, tendo em vista as dificuldades intrínsecas dos processos de usinagem de aços Hardox[®] 450 e as recentes alternativas de lubrificação-refrigeração, 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. De modo a verificar a eficácia do método será aplicado o projeto de experimentos 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	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0,163	0,207	1,083	0,011	0,001	0,093	0,096	0,020	0,0016

Os corpos de prova foram produzidos a partir do processo de corte laser, oriundos de uma chapa de Hardox[®] 450 com 6,35 mm de espessura e com formato e dimensões mostrados na Figura 2.

A experimentação foi executada no centro de usinagem Romi Discovery 308 com potência máxima de 5,5 kW e rotação máxima de 4000 rpm (Figura 3a) disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS).

Como ferramenta de corte foram utilizados insertos intercambiáveis Walter Tools classe WSM35 com revestimento PVD (TiAlN + Al₂O₃) e raio de ponta $r_\epsilon = 0,8$ mm, fixados em um cabeçote Walter Tools Xtra-tec (código F4042R.W20.02) com 20 mm de diâmetro e 35 mm de comprimento para dois insertos. O erro de batimento na montagem da ferramenta na

máquina foi verificado através do relógio apalpador Digimess com resolução de 0,01 mm, apresentando valor igual ou menor que 0,01 mm (Figura 3b).

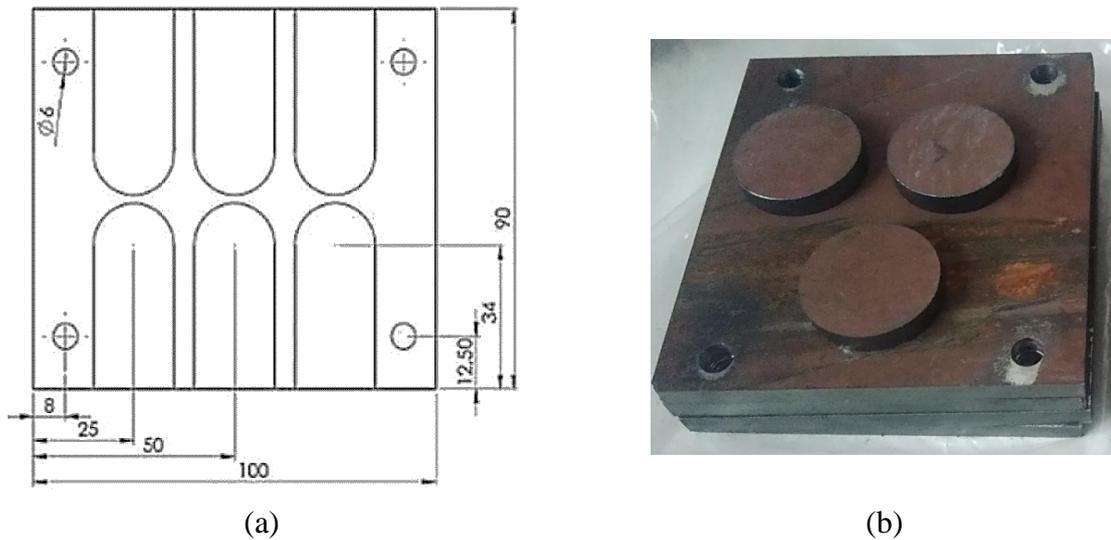


Figura 2 – Corpos de prova: (a) formato e dimensões após a usinagem; (b) imagem das chapas obtidas através do processo de corte laser.



Figura 3 – Montagem experimental: (a) centro de usinagem Romi Discovery 308; (b) verificação do erro de batimento no cabeçote fresador.

O nanofluido utilizado é constituído pelo fluido sintético integral à base de água Quimatic Jet (Quimatic[®]/Tapmatic[®]) com adição de flocos de grafeno multicamadas (MLG) com dimensões aproximadas de $10 \mu\text{m}^2$ de área e 07 a 20 nm de espessura a uma concentração de 0,05% (500 mg de MLG por litro de Quimatic Jet). 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. A dispersão ao Quimatic Jet foi realizada através de um homogeneizador ultrassônico [Carvalho et al., 2019]. O nanofluido foi aplicado com o auxílio do Nebulizador IV (Quimatic[®]/ Tapmatic[®]) a uma vazão de 2,0 l/h e pressão de 3 bar na linha de ar comprimido. O sistema NF-RQL montado para a execução dos testes é mostrado na Figura 4.

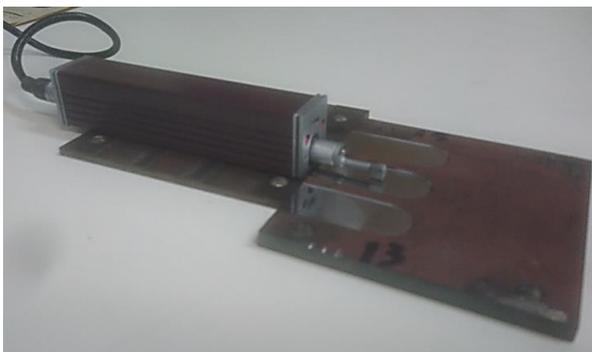
As rugosidades geradas na superfície durante a usinagem (variáveis de resposta) foram registradas em cada amostra em três posições diferentes do passe através do rugosímetro Mitutoyo[®] modelo SJ-201P com resolução de 0,01 μm (Figura 5a). A agulha do apalpador

possui raio de ponta de 5 μm e aplica uma força de 4 mN durante a medição. As medidas foram tomadas utilizando um comprimento de amostragem $l_e = 0,8$ mm e um comprimento de medição $l_m = 5 l_e = 4,0$ mm, com velocidade de varredura de 0,25 mm/s. Foi utilizado o software SJ Tools para a coleta e armazenamento dos dados medidos pelo rugosímetro. Através deste software, é possível gerar certificados de medição, bem como obter a representação gráfica do perfil de rugosidades apresentado na medição.



Figura 4 – Nebulizador IV (Quimatic®/Tapmatic®) montado e posicionado para aplicar o nanofluido com flocos de MLG na chapa corpo de prova de Hardox® 450.

O acabamento da superfície fresada foi registrado e avaliado visualmente através do microscópio digital USB Dino-Lite® Pro modelo AM 413ZT (Figura 5b). A partir deste recurso executou-se, também, a avaliação da ferramenta, supervisionando, durante e após os testes, o surgimento ou não de defeitos, falhas ou desgastes nos insertos.



(a)



(b)

Figura 5 – Equipamentos de medição: (a) rugosímetro Mitutoyo® SJ-201P; (b) microscópio Dino-Lite® AM 413ZT.

Um dos modelos de segundo grau mais utilizados no planejamento de experimentos é o delineamento de Box-Behnken (BBD) que se caracteriza pela utilização de três níveis (mínimo, médio e máximo) para cada fator independente de entrada. A grande vantagem do uso do BBD é o maior custo-benefício de implementação, por permitir um menor número de experimentos, com a manutenção de resultados satisfatórios. Para um experimento com três parâmetros de entrada são necessárias 15 execuções, das quais 12 destas 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. [Baumgaertner Filho e Gonzalez, 2017; Garcia et al., 2019]. Com o intuito de otimizar o tempo, recursos e as análises dos resultados, utilizou-se o BBD considerando com variáveis de entrada a velocidade de corte (v_c), a profundidade de corte axial (a_p) e avanço por dente (f_z) – cada uma com três níveis, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de corte e respectivos níveis escolhidos para o BBD.

Variáveis de Entrada	Níveis		
	Mínimo	Médio	Máximo
v_c [m/min]	80	100	120
a_p [mm]	0,4	0,8	1,2
f_z [mm/dente]	0,05	0,10	0,15

A escolha dos valores para a_p baseou-se no valor do raio de ponta do inserto (50%, 100% e 150% r_ϵ), enquanto os níveis para v_c e f_z seguiram os valores recomendado pelo fabricante do Hardox[®] 450 (SSAB).

Neste trabalho utilizou-se o Minitab[®] 18 para a aleatorização dos parâmetros de entrada nas combinações para a realização dos 15 passes (execuções), para a análise de variância (ANOVA) dos dados obtidos, para a determinação do grau de influência das variáveis de entrada nas variáveis de resposta (rugosidade média R_a e rugosidade total R_t) e para a estimação dos níveis ótimos dos parâmetros de entrada através da construção dos gráficos de contorno com base na menor rugosidade obtida para cada condição de lubrificação.

3 RESULTADOS

A Tabela 3 mostra os 15 passes gerados a partir do projeto experimental BBD cujas magnitudes das variáveis independentes de entrada foram aleatorizadas. A tabela mostra também a média dos valores medidos de R_a e R_t em cada passe para cada meio lubrificante. Vale ressaltar que as variáveis de entrada e a ordem dos passes com seus respectivos parâmetros foram idênticos para a usinagem a seco e com NF-RQL.

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 ($0,31 \leq R_a \leq 0,33 \mu\text{m}$) e total ($1,51 \leq R_t \leq 1,83 \mu\text{m}$). 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 na usinagem a seco em comparação com a utilização de NF-RQL (respectivamente 94% e 231% maior).

A Figura 6 evidencia 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%.

Tabela 3 – 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 método BBD gera três passes repetidos de controle onde as variáveis de entrada apresentam seus valores médios (ou ponto central '000').

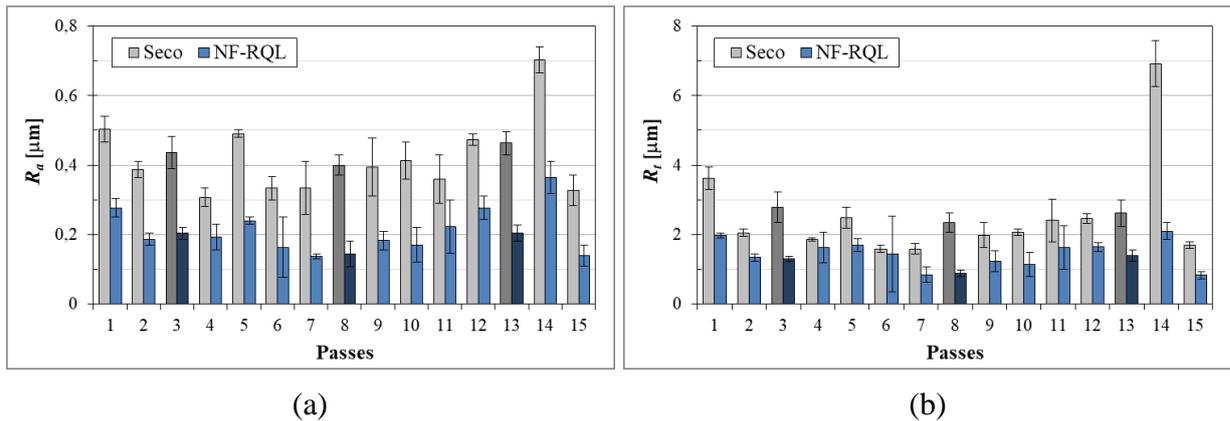


Figura 6 – Valores de rugosidade por passe na usinagem a seco e com NF-RQL:
(a) Rugosidade média; (b) Rugosidade total.

Os melhores valores encontrados para no 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 no atrito gerado e na força de corte. Estas características, aliadas à sua excelente condutividade térmica, são muito benéficas para a usinagem de materiais de baixa usinabilidade e com tendência ao encruamento, como o aço Hardox[®] 450.

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. A classe de ferramenta WSM35 com revestimento PVD ($\text{TiAlN}+\text{Al}_2\text{O}_3$) e raio de ponta 0,8 mm 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 de 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 execução que gerou os menores valores de rugosidade para ambas as condições de lubrificação foi o passe 7, no qual se utilizam baixos níveis de velocidade de corte e avanço por dente e médio de profundidade de corte axial ($v_c = 80$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/dente e $a_p = 0,8$ mm). A Figura 7 ilustra os resultados.

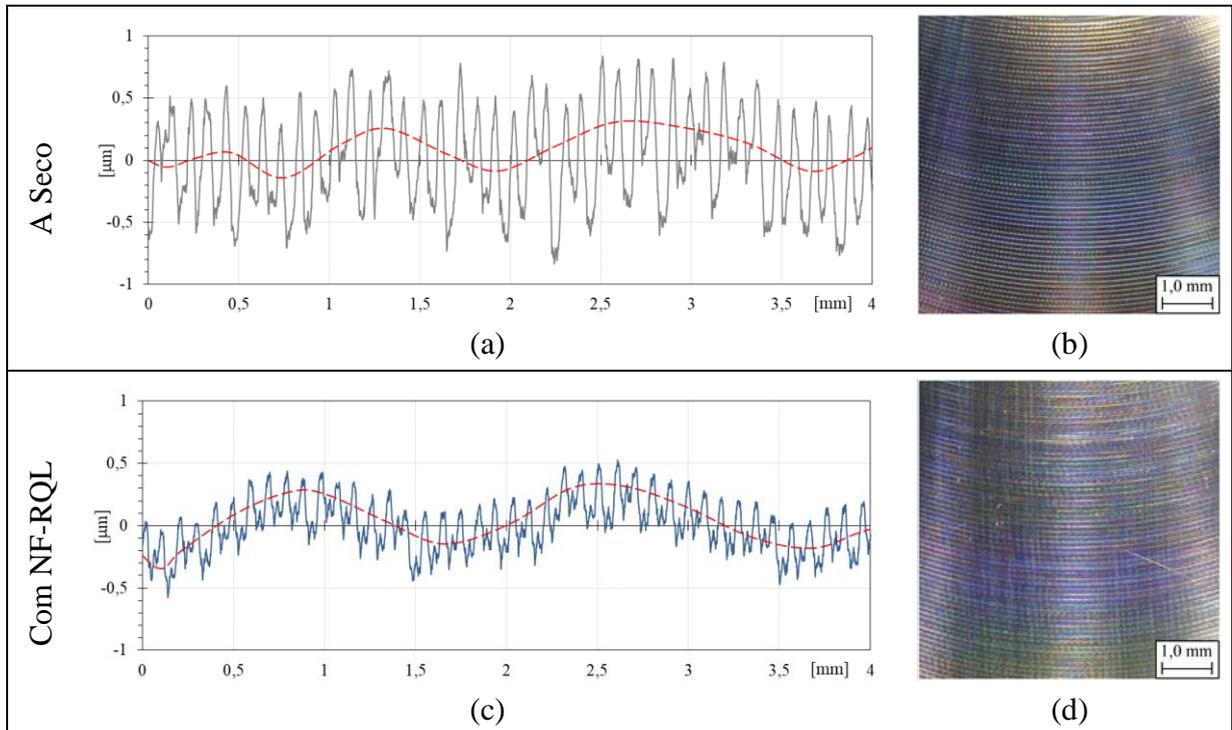


Figura 7 – Perfis de rugosidade e superfícies usinadas referentes ao passe 7 para as condições a seco e com NF-RQL. As linhas pontilhadas em vermelho representam a ondulação.

Evidencia-se nos perfis de rugosidade medidos no comprimento de medição (Figuras 7a e 7c) 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. Com a ampliação registrada de 50x, 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 (Figuras 7b e 7d)

A Figura 8 apresenta os 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. Na usinagem a seco, o perfil ondulação + rugosidade gerou amplitudes pico-vale no comprimento de medição que chegaram a $50 \mu\text{m}$. A superfície fresada a seco (Figura 8b) 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, a Figura 8a mostra somente o perfil de rugosidade, enquanto que a Figura 8c os dois perfis (ondulação e rugosidade).

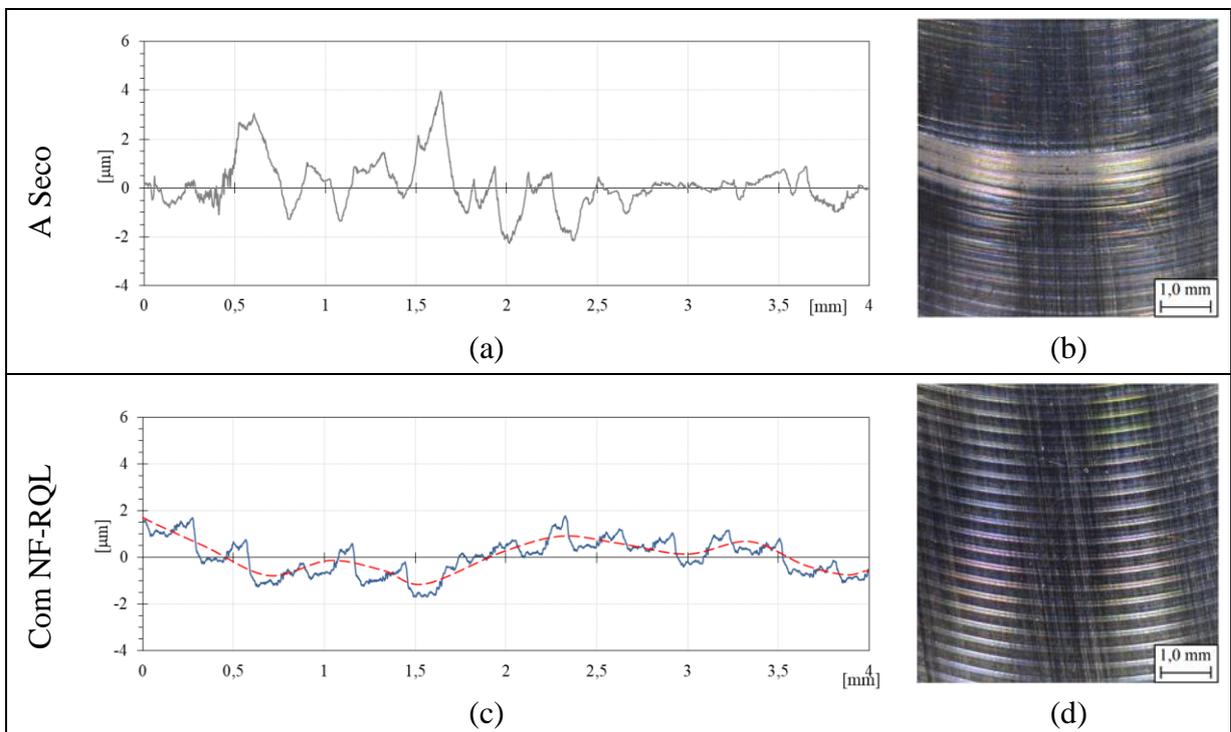


Figura 8 – Perfis de rugosidade e superfícies usinadas relativas ao passe 14 para as condições a seco e com NF-RQL (linha pontilhada em vermelho indicando a ondulação).

Já a Figura 8d exibe 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. Novamente tem-se a presença de ondulação no perfil (Figura 8c), a qual pode ter sido causada por vibrações devido aos fatores supracitados.

3.2 Análise de Variância

A análise de variância (ANOVA) dos dados obtidos permitiu determinar as variáveis controláveis que exercem maior influência sobre as variáveis de resposta. A Figura 9 mostra os gráficos de Pareto de tais influências em R_a e R_t nas condições a seco e com NF-RQL.

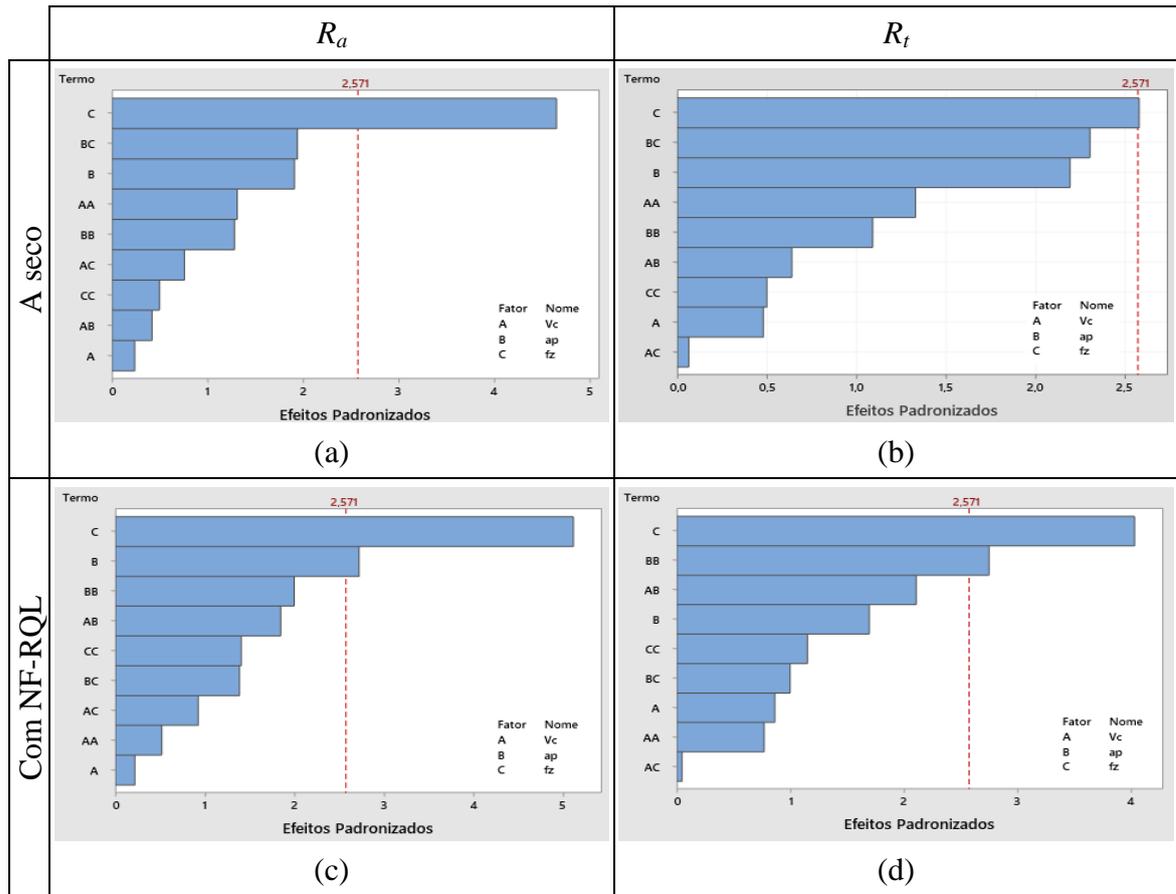


Figura 9 – Gráfico de Pareto do grau de influência das variáveis de controle (v_c , a_p e f_z) nas variáveis de resposta (R_a e R_t) para os dois meios lubrificantes

No fresamento a seco, apenas o efeito principal (C) do avanço por dente (f_z) apresenta influência significativa sobre a rugosidade para um intervalo de confiança de 95%. Pela Figura 9a (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 pela Figura 9b (R_t) o f_z teve p-valor = 0,049 (95,1% de confiança), influência nos resultados de 25,7% e coeficiente de determinação $R^2 = 80,7\%$.

Na usinagem com NF-RQL, o avanço por dente (f_z) e a 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, o que contribui para a redução da tensão de cisalhamento e o atrito. Portanto, uma maior profundidade de corte axial tende a permitir um empilhamento maior de camadas, resultando em menores rugosidades. Contudo, Baptista (2003) e Rovani (2019) citam que profundidades de corte muito grandes acarretam em um acúmulo excessivo de grafeno (o qual possui uma estrutura química hexagonal com ligações fortes e, portanto, elevada resistência ao rompimento), que tende a ter um comportamento abrasivo que pode provocar elevação nos níveis de rugosidade. Além do mais, maiores a_p geram maior área de contato entre a peça e a ferramenta ocasionando aumento do atrito e vibração. Pela Figura 9c (R_a), a variável f_z (efeito principal “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 principal “B”) mostrou um p-valor = 0,042 (confiança de 95,8%) e uma contribuição de 14,5% para as saídas. Na Figura 9d (R_t) o f_z (efeito principal “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 nas respostas.

3.3 Gráficos de Contorno

Os gráficos de contorno ilustrados na Figura 10 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.

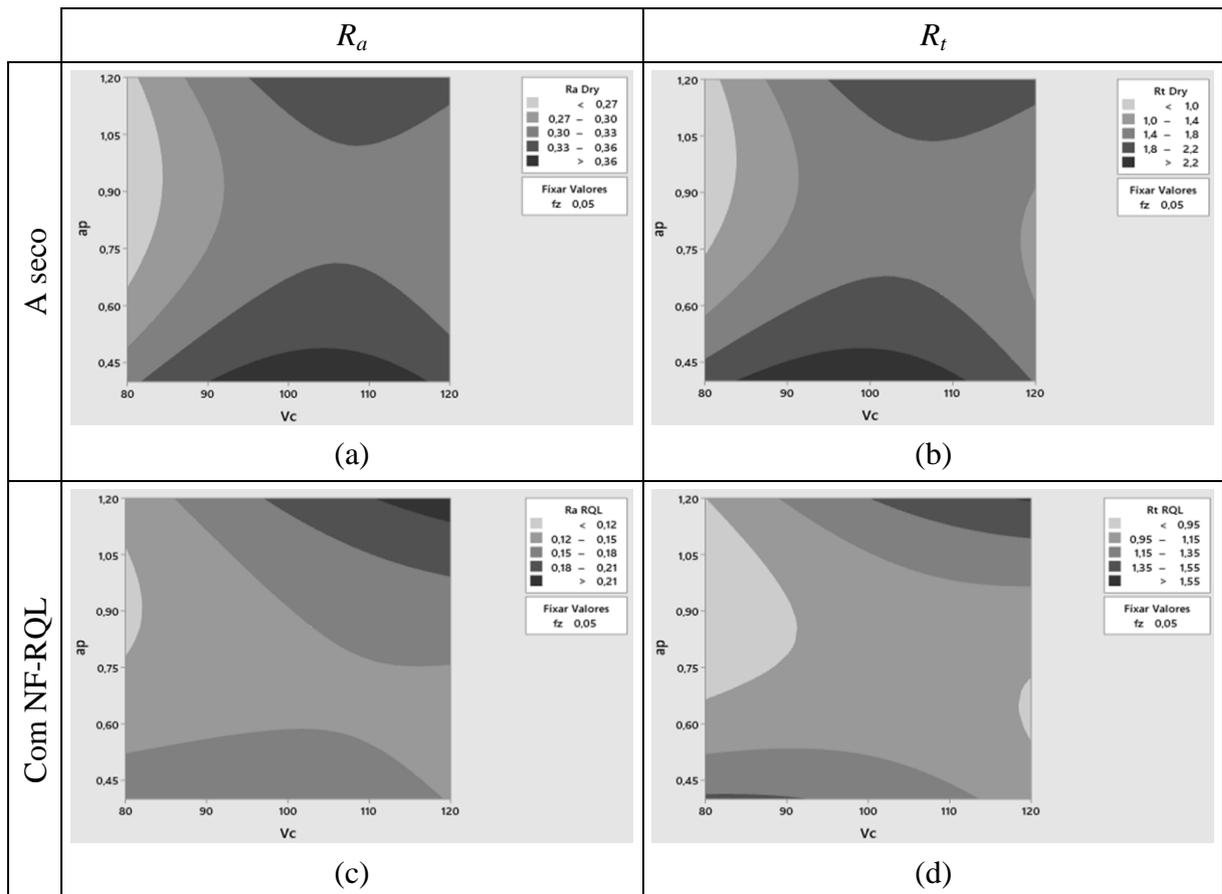


Figura 10 – Gráficos de contorno para R_a e R_t para ambos lubrificantes em função de v_c e a_p considerando $f = 0,05$ mm/volta

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 (Fig. 10a) e de $0,75 < a_p < 1,0$ mm para o NF-RQL (Fig. 10c). Já para R_t , as menores rugosidades obtidas no corte a seco (Fig. 10b) 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 (Fig. 10d), $80 < v_c < 90$ 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 (Fig. 10d). Devido ao empilhamento das camadas de grafeno, as Figuras 10c e 10d mostram que baixas profundidades de corte axial não contribuem para a redução das rugosidades neste caso em estudo.

4 CONCLUSÕES

A utilização de nanofluido à base de grafeno multicamadas (MLG) aplicado em quantidade reduzida (NF-RQL) no fresamento frontal do aço de alta resistência Hardox[®] 450 gerou valores de rugosidade entre 40% e 50% menores aos resultados alcançados com a usinagem a seco devido, principalmente, à ação lubrificante do nanofluido.

Em ambas as condições lubrificantes, o passe 7 ($v_c = 80$ m/min, $a_p = 0,8$ mm e $f_z = 0,05$ mm/dente) foi o que gerou menores valores de rugosidade média R_a ($0,31$ μ m a seco e $0,14$ μ m com NF-RQL) e rugosidade total R_t ($1,31$ μ m a seco e $0,83$ μ m com NF-RQL). Em contrapartida, por apresentar a combinação mais severa de parâmetros de corte, o passe 14 ($v_c = 100$ m/min, $a_p = 1,2$ mm e $f_z = 0,15$ mm/dente) resultou em maiores valores de R_a ($2,09$ μ m a seco e $0,36$ μ m com NF-RQL) e R_t ($6,92$ μ m a seco e $0,70$ μ m com NF-RQL).

Os passes repetidos gerados pelo projeto de experimento de Box-Behnken, considerados passes de controle (os três parâmetros no nível médio ou ponto central), mostraram valores de rugosidade próximos e sem uma tendência de crescimento. Avaliando a ferramenta periodicamente, constatou-se que o inserto WSM35 com revestimento PVD (TiAlN+Al₂O₃) e raio de ponta $0,8$ mm foi adequado para a usinagem deste material sob as condições impostas a ela, já que não foi possível identificar falhas ou avarias na ferramenta de corte.

A análise de variância (ANOVA) dos dados obtidos mostrou que o avanço por dente (f_z) é a variável que tem maior influência sobre a rugosidade, em ambos os métodos de usinagem. Na usinagem a seco, somente a influência de f_z foi significativa para um intervalo de confiança de 95%. Já para o fresamento com NF-RQL, além de f_z , a profundidade de corte axial (a_p) também foi significativa para 95% de confiança, mostrando que a área da seção de corte afeta a penetração do fluido e a lubrificação da zona de corte.

Os gráficos de contorno que explicitam o comportamento das rugosidades com a variação de v_c e a_p entre os níveis mínimos e máximos considerados no estudo, com f_z fixado no seu valor mínimo, indicaram que a utilização ótima dos parâmetros de entrada deve se concentrar em baixos valores de velocidade de corte e médios-altos valores de profundidade de corte. Para uma minimização conjunta de $R_a < 0,27$ μ m e $R_t < 1,0$ μ 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 $R_a < 0,12$ μ m e $R_t < 0,95$ μ m ocorrem a partir do uso de $v_c = 82$ m/min, $a_p = 0,9$ mm e $f_z = 0,05$ mm/dente.

Por fim, as rugosidades média e total geradas no fresamento frontal do aço Hardox[®] 450 apresentaram melhores resultados quando utilizado NF-RQL (redução média de 52% no valor de R_a e de 42% no valor de R_t) em comparação à usinagem a seco. Contudo, não é possível afirmar que a aplicação de NF seja o método mais recomendado, pois mais estudos são necessários. Desta forma, um maior entendimento poderia ser obtido a partir da avaliação das forças de usinagem e/ou da vida de ferramenta para estes dois meios lubrificantes, ou dos efeitos de diferentes raios de ponta e da utilização de fluido de corte em abundância nas variáveis de resposta. Além disso, a opção pelo uso ou não de NF na fabricação por usinagem passa também por requisitos de projeto e análises de custos.

REFERENCIAS

- ASTAKHOV, V.P. (2011) **Modern Machining Technology – A Practical Guide**. 1.ed., Cambridge: 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.
- BAUMGAERTNER FILHO, A.J; GONZALEZ, A.R. (2017) **“Estudo dos parâmetros de polaridade negativa na soldagem MIG/MAG polaridade variável para**

- revestimento**". Soldagem & Inspeção [online], 22(1), pp.46-58. DOI: 10.1590/0104-9224/si2201.06.
- CARVALHO, A.C.S.; GELAMO, R.V.; SOUZA, A.J. (2019) **"Esforços de corte na furação do AISI 304 com aplicação de nanofluido MLG em RQL"**. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF2019), 5 a 7 de agosto, São Carlos, SP.
- CAVICHIOILLI, F. (2020) **Usinagem com ou sem Refrigeração? – Uso de Refrigeração no Fresamento**. O Mundo da Usinagem, Jundiaí - SP, ed. 122, ano 20, pag. 24-27, 2020.
- DAVIM, J.P; DIXIT, U.S; SARMA, D.K. (2012) **Environmentally Friendly Machining**. 1.ed., New York: Springer-Verlag, 2012.
- FONSECA, A.F. (2011) **Mini-Curso: Introdução às propriedades físicas e estruturais do grafeno e dos nanotubos de carbono**. Instituto de Ciências Exatas, UFF.
- GARCIA, R.F., FEIX, E.C., MENDEL, H.T.; GONZALEZ, A.R.; 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, 41, p317. DOI: 10.1007/s40430-019-1826-4.
- HÜBNER, H.B. (2016) **Estimação da Rugosidade Gerada no Processo de Fresamento Frontal via Redes Neurais Artificiais**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, 2016.
- MACHADO, Á.R; ABRÃO, A.M; COELHO, R.T; SILVA, M.B. (2015) **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3.ed., São Paulo: Blucher.
- MONTGOMERY, D.C. (2012) **Design and Analysis of Experiments**. 8. Ed., John Wiley and Sons, 2012.
- NOVOSELOV, K.S. (2011) **"Graphene: Materials in the flatland"**. International Journal of Modern Physics B, 25(30), pp. 4081-4106. DOI: 10.1142/S0217979211059085.
- ROVANI, P.R. (2019) **Aplicação de Flocos de Grafeno Multicamadas no Torneamento de Acabamento do Aço Inoxidável AISI 420 C Endurecido**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2019.
- SILVA, A.L.V.C e MEI, P.R (2006) **Aços e Ligas Especiais**. 2.ed: Blucher e Villares Metals, 2006.
- SÓRIA, B.S. (2016) **Estudo do Comportamento das Vibrações em Fresamento Frontal do Aço Inoxidável AISI 316 Utilizando Transformada de Wavelet**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, 2016.
- SSAB (2018) Data sheet 168br Hardox[®] 450, 2f. Disponível em: www.ssab.com.br/products/brands/hardox/products/hardox-450. Acesso em: 12/08/2020.
- 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, v. 29, p. 182-193, 2017.