

INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE NANOFLUIDO NO ACABAMENTO DA SUPERFÍCIE RESULTANTE DO FRESAMENTO FRONTAL DO AÇO AISI D6 ENDURECIDO

Maikon da Silva Cabral Frank

Everton Luis Fernandes do Amaral

André João de Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC),
Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), Rua Sarmento Leite, nº 425, Porto Alegre, RS, CEP 90050-170.
maikon_frank@hotmail.com; evertonlfa@gmail.com; ajsouza@ufrgs.br

Resumo: O aço ferramenta AISI D6 é amplamente utilizado na fabricação de moldes e matrizes, caracterizado por alta dureza e alta resistência ao desgaste, fatores estes que reduzem a sua usinabilidade. Os atritos nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça são responsáveis por gerar altas temperaturas na região de corte, influenciando significativamente a precisão dimensional, o acabamento da superfície usinada e a vida da ferramenta de corte. Assim, visando reduzir estes efeitos, os nanofluidos (NF) têm se tornado cada vez mais frequentes em processos de usinagem. Portanto, o estudo buscou verificar a influência da aplicação de NF, com diferentes concentrações de flocos de grafeno multicamadas (MLG), no acabamento da superfície resultante do fresamento frontal do aço AISI D6 temperado e revenido a 52 HRC. O processo de usinagem utilizou insertos de metal-duro classe H30, mantendo a profundidade de corte axial e o avanço por dente constantes, e aplicando duas velocidades de corte distintas (40 m/min e 60 m/min). Os efeitos do corte a seco (T), do fluido de corte sintético (FS) e do mesmo fluido com adição de MLG (NF-1 e NF-2) aplicados em mínima quantidade de lubrificante (MQL) sobre a rugosidade gerada (perfis e parâmetros) foram investigados comparativamente através da análise de variância e do teste de Tukey, totalizando oito testes. O NF-1 consiste em uma mistura de 250 mg de MLG por litro de fluido e o NF-2 por uma mistura de 500 mg de MLG por litro. O MQL foi aplicado a uma vazão de 200 ml/h e uma pressão de 300 kPa. O comprimento usinado de cada teste envolveu a execução de cinco passes de 75 mm, totalizando 40 amostras. Após a usinagem, as amostras foram submetidas à avaliação da rugosidade por meio de um rugosímetro digital. As imagens das texturas das superfícies usinadas no primeiro e no quinto passe foram adquiridas com um microscópio digital, enquanto as imagens das arestas de corte dos insertos após o último passe foram coletadas por um estereó microscópio óptico. Concluiu-se que os melhores resultados ocorreram na condição T para ambas as velocidades de corte e utilizando NF-2 com 40 m/min. Essas condições demonstraram as excelentes características do material da ferramenta. Provavelmente, a capacidade de lubrificação do NF-2 aumentou, mas a sua capacidade de resfriamento diminuiu com 60 m/min. A condição NF-1 produziu resultados satisfatórios e a FS gerou os piores resultados, possivelmente devido à presença de desgaste na aresta de corte da ferramenta.

Palavras-chave: fresamento frontal; aço AISI D6 endurecido; corte a seco; mínima quantidade de lubrificação; nanofluidos.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o setor de usinagem tem caminhado em busca de melhoria contínua nos processos junto à evolução dos materiais. Isto tem acarretado o aumento da necessidade de otimizar os tempos de usinagem, reduzir os custos envolvidos no processo, promover um aumento na qualidade no que tange a precisão dimensional e o acabamento da superfície usinada e, conseqüentemente, promover menor geração de resíduos (Gabardo, 2008).

Os aços ferramentas possuem importante participação no setor metal mecânico como ferramentas de corte, moldes, matrizes, punções, dentre outras aplicações. Muitas vezes são tratados termicamente, tornando-os de difícil usinagem (Costa-e-Silva e Mei, 2010), principalmente devido às falhas geradas na ferramenta durante o processo de fresamento de materiais endurecidos. De modo geral, dentre as principais características dos aços ferramenta encontra-se elevada dureza a temperatura ambiente e a quente, boa tenacidade, elevada resistência ao desgaste, elevada resistência mecânica, boa usinabilidade e boa temperabilidade (Nieswald et al., 2022). O aço AISI D6 é um aço ferramenta para condições de trabalho a frio constituído de carbono, cromo e tungstênio, conferindo ao material elevada dureza, excelente resistência ao desgaste e à abração, boa tenacidade, boa estabilidade dimensional, mantendo propriedades de resistência mecânica mesmo em condições de elevadas temperaturas. Estas propriedades tornam o D6 adequado em aplicações de severo desgaste como em operações de conformação e corte a frio, em superfícies deslizantes e moldes para materiais cerâmicos, sendo largamente utilizados em ferramentas de corte como facas, matrizes, punções, tesouras, escariadores, mandris, fieiras de trefilação, calibres etc. (Aço Nobre, 2022; Oliveira, 2018).

Os diferentes processos de usinagem determinam o acabamento requerido na peça; por vezes, a textura gerada na superfície é decorrente do tipo e estado da ferramenta de corte, material da peça, parâmetros de corte, rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça e o meio lubrificante. A textura é composta basicamente por ondulações, falhas e rugosidades. Seu formato é apresentado como marcas, ranhuras e sulcos na superfície da peça. A rugosidade é definida como um conjunto de irregularidades (pequenas saliências e reentrâncias) que caracterizam o perfil da superfície da peça (Kalpakjian e Schmid, 2006). Dentre os parâmetros de amplitude analisados em um perfil de rugosidade, destacam-se o R_a e R_t . O parâmetro R_a é definido como sendo a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento em picos e vales dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, no comprimento de medição. R_a é o parâmetro mais utilizado no mundo, principalmente quando o objetivo é analisar superfícies em que o acabamento apresenta sulcos bem orientados. O parâmetro R_t corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de medição. R_t fornece informações complementares em relação ao parâmetro R_a (Machado et al., 2015).

Sabe-se que os meios lubrificantes promovem uma série de melhorias nos processos de usinagem, onde a obtenção de um bom acabamento superficial da peça usinada passa pela capacidade do fluido atuar na lubrificação reduzindo o coeficiente de atrito, refrigerar a ferramenta de corte, além de outras funções como minimizar a possibilidade de formação de aresta postiça de corte (APC), proteger a peça contra o processo de corrosão ou até mesmo auxiliar na expulsão de cavacos (Machado et al., 2015). A aplicação de meios lubrificantes mais eficientes aos processos de usinagem tem se tornado uma tarefa primordial, principalmente em função de suas características ecológicas. Dependendo da aplicação, os fluidos de corte podem acrescentar de 10 a 15% dos custos de fabricação, sendo necessário encontrar formas mais econômicas e eficientes que reduzam o impacto ambiental (Raj et al., 2018). Os meios lubrificantes têm por objetivo reduzir o atrito e a temperatura na região de corte e facilitar a formação e o escoamento do cavaco. No entanto, a aplicação do fluido de corte convencional não se mostra tão eficaz em processos de usinagem que adotam altas velocidades de corte, pois este tem dificuldade de penetrar nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, não conseguindo assim atuar de maneira eficiente na região de corte. Além disso, problemas ecológicos, sanitários e econômicos associados ao uso de fluidos de corte também precisam ser considerados (Dhar et al., 2007). Assim, a redução ou eliminação de fluidos de corte pode ser uma alternativa viável. Todavia, a eliminação completa ainda não é algo tão fácil de ser realizada, pois o corte a seco aumenta a temperatura na região de corte, a qual promove a diminuição da dureza da ferramenta, proporcionando maiores taxas de desgaste. Além disso, têm-se maiores forças de usinagem envolvidas no processo e maiores deformações na superfície usinada. Frente a tantas condições adversas, o corte a seco é empregado em poucas situações. Deste modo, a utilização da mínima quantidade de lubrificação (MQL) torna-se uma opção viável e sustentável (Goindi e Sarkar, 2017).

O MQL envolve a pulverização de gotículas de óleo na região de corte com auxílio de ar comprimido com intuito de reduzir o consumo de fluido de corte, gerar economia de custos, minimizar o impacto ao meio ambiente, aumentar o desempenho da operação de corte e aprimorar a qualidade da superfície usinada (Debnath et al., 2014). O MQL atua pelo princípio da utilização total do fluido de corte sem geração de resíduos, ou seja, com baixa vazão de fluido aplicado a elevadas pressões. Esta pequena quantidade de fluido permite reduzir o coeficiente de atrito durante o corte, diminuindo a tendência de material aderido à ferramenta (Anuj et al., 2016).

O nanofluido (NF) é basicamente composto por um fluido-base com adição de nanopartículas de um material que potencializa a transferência térmica e a redução do atrito pelo fluido (Sarkar et al., 2015). Diversos fatores como concentração, tipo, forma, tamanho, temperatura, aditivos, acidez, aglomerações e potencial interparticular das nanopartículas podem influenciar diretamente as propriedades do NF. A ideia de usar nanofluidos híbridos é devido à melhoria da transferência de calor, atribuída à boa fração de aditivo de grafeno (Carreteiro e Belmiro, 2006). Como exemplo de possibilidade, tem-se a adição de flocos de grafeno multicamadas (MLG – *Multilayer Graphene*) ao fluido de corte, formando os NF-MLG. O MLG pode ser descrito como a formação de estruturas hexagonais por átomos de carbono, em dimensões nanométricas (Novoselov et al., 2012), que conferem ao fluido maior condutividade térmica, capacidade de lubrificação, redução do coeficiente de atrito e melhor poder de refrigeração, removendo calor da região de interface da ferramenta-peça e ferramenta-cavaco quando aplicado em MQL (Sarkar et al., 2015). Contudo, estudos desenvolvidos com nanofluidos ainda apresentam algumas inconsistências em seus resultados, possivelmente pela insuficiente compreensão do mecanismo da transferência de calor do NF.

Tendo em vista as dificuldades na usinagem de aço ferramenta endurecido, principalmente no que se refere à temperatura gerada e o efeito abrasivo do material sobre a ferramenta de corte, este trabalho apresenta um estudo sobre o efeito da aplicação de NF-MLG na rugosidade gerada durante o fresamento frontal de acabamento do aço AISI D6 em comparação ao corte a seco.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Testes de fresamento foram realizados no Centro de Usinagem ROMI modelo Discovery 308 em quatro corpos de prova de aço AISI D6 temperado e revenido a uma dureza de 52 HRC, com dimensões de 150 x 75 x 12 mm, utilizando insertos de metal-duro Dormer-Pramet classe H30 com revestimento PVD (ADMX 11T316SR-M: M8330), fixados a um cabeçote Black Tools com 16 mm de diâmetro, para dois insertos (BT999-16-2C-BDMT11).

Para analisar a influência da aplicação de nanofluido no acabamento da superfície fresada, foram selecionadas três condições de lubrificação: corte a seco (T), com fluido sintético aplicado em MQL (FS), com nanofluido 0,025% MLG em MQL (NF-1) e com nanofluido 0,050% MLG em MQL (NF-2). O fluido sintético Quimatic Jet é especialmente formulado para aplicação em MQL, enquanto o nanofluido conta com adição de flocos de grafeno multicamadas (MLG) a este fluido. A técnica utilizada para aplicação dos fluidos foi a mínima quantidade de lubrificante (MQL) através do Nebulizador IV Tapmatic. O MQL foi aplicado com vazão de 200 ml/h e pressão de 300 kPa. O bico foi posicionado a aproximadamente 20 mm de distância da superfície de saída da ferramenta (Fig. 1a). A fixação da peça foi realizada através de um dispositivo fabricado especialmente para acoplar no dinamômetro (Fig. 1b) visando a aquisição de dados de força, os quais não serão avaliados neste trabalho. O erro de batimento na montagem dos inserts no suporte foi verificado na máquina através do relógio apalpador Digimess com resolução de 10 μ m, apresentando valor igual ou menor que 5 μ m para todas as fixações (Fig. 1c).

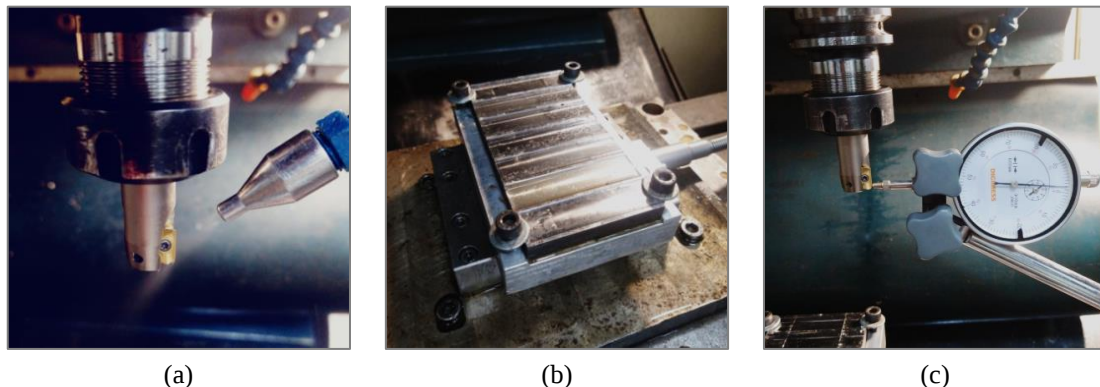


Figura 1. Sistema experimental: (a) aplicação em MQL; (b) fixação do corpo de prova; (c) verificação de batimento.

Por ser uma operação de acabamento, cada superfície do corpo de prova recebeu cinco passes de fresamento de topo com comprimento de usinagem de 75 mm, usando um par de arestas novas, e mantendo-se fixos a profundidade de corte axial ($a_p = 0,2$ mm) e o avanço por dente ($f_z = 0,04$ mm/dente). Uma velocidade de corte diferente foi usada em cada face do corpo de prova ($v_{c1} = 40$ m/min e $v_{c2} = 60$ m/min), totalizando 10 amostras em cada chapa. Uma condição lubrificante foi aplicada para cada corpo de prova. Após a usinagem, as 40 superfícies fresadas foram submetidas à avaliação da rugosidade através do rugosímetro digital Mitutoyo S-3000, considerando um comprimento de medição de 4,0 mm (NBR 4287, 2002). Além da medição dos valores de rugosidade média (R_a) e total (R_t), os perfis de rugosidade (textura primária) da superfície usinada também foram gerados. Em seguida, as imagens das superfícies usinadas no primeiro e no quinto passe foram adquiridas com auxílio do microscópio digital Haiz HZ, com resolução de 1920 x 1080 e ampliação de até 1600x. Por fim, o estéreo microscópio óptico Zeiss Stemi 508 foi utilizado para analisar o estado da aresta de corte ao final do último passe.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 mostra os valores de rugosidade média e total mensurados e a Figura 2 os gráficos dos valores médios de R_a e R_t para as condições de lubrificação e velocidades de corte avaliadas. Apesar da grande dispersão de valores, realizou-se a análise estatística de variância (ANOVA), considerando como variáveis controláveis as velocidades de corte, as condições de lubrificação e os desgastes de flanco da ferramenta. Para as variáveis de resposta, foram considerados os valores de rugosidade média (R_a) e total (R_t). O teste de Tukey para comparação das médias dos resultados foi realizado para detectar diferenças de efeitos entre tratamentos.

Percebe-se na Figura 2 uma tendência de aumento da rugosidade com o incremento da velocidade de corte. Para $v_{c1} = 40$ m/min, 90% dos valores obtidos estão situados na classe N5 ($R_a = 0,2$ a $0,4$ μ m) e 10% na classe N6 ($R_a = 0,4$ a $0,8$ μ m), enquanto para $v_{c2} = 60$ m/min, o percentual é de 65% para N5 e de 35% para N6. Isso provavelmente está relacionado ao material da ferramenta, que por sua vez altera a proporção de desgaste na ferramenta e possíveis vibrações resultantes do sistema de fixação da peça (Fallböhmer et al., 2000). No entanto, constatou-se através da ANOVA alta influência dos meios lubrificantes e a pouca influência dos desgastes da ferramenta.

A partir da ANOVA realizada, nota-se na Fig. 3 um melhor desempenho e boa estabilidade (pouca variação) no corte a seco (T) para ambas as velocidades de corte, possivelmente devido à velocidade de corte reduzida ser empregada em ambas as condições de corte (Ghani et al., 2008). Fallböhmer et al. (2000) também observou uma ligeira melhora na vida da ferramenta, pelo fato de a ferramenta apresentar menor tenacidade quando comparado com ferramentas PCBN, obtendo bons resultados de acabamento no corte a seco. Observa-se ainda desempenho semelhante ao fresamento a seco dos nanofluidos NF-1 (exceto no passe 1) e NF-2 aplicados em MQL com $v_{c1} = 40$ m/min. Em contrapartida, o resultado menos satisfatório foi obtido na usinagem com fluido sintético também em MQL (FS), independentemente da

velocidade de corte empregada (Fig. 2 e Fig. 3). No fresamento do AISI D6 endurecido, o fluido sintético utilizado nos testes pode ter comprometido a temperatura de corte, o desgaste da ferramenta, a morfologia do cavaco e consequentemente a rugosidade média (R_a), estabelecendo resultados contrários ao que foi observado por outros pesquisadores (Manimaran e Ross, 2020; Mulyadi et al., 2015), onde houve melhora na rugosidade resultante.

Tabela 1. Valores de rugosidade medidos nos cinco passes realizados.

$v_{c1} = 40 \text{ m/min}$								
Passe (amostra)	T		FS		NF-1		NF-2	
	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$
1	0,239	1,853	0,236	2,181	0,528	2,645	0,268	1,849
2	0,282	2,115	0,261	2,790	0,236	2,112	0,232	1,736
3	0,240	1,814	0,407	3,745	0,224	2,378	0,237	1,768
4	0,248	2,022	0,318	3,538	0,239	2,112	0,226	1,777
5	0,228	1,906	0,514	3,691	0,264	2,010	0,287	1,794
Média	0,247	1,942	0,347	3,189	0,298	2,191	0,250	1,785
Var. Máx.	+0,035	+0,173	+0,167	+0,556	+0,230	+0,394	+0,037	+0,064
Var. Mín.	-0,019	-0,128	-0,111	-1,008	-0,074	-0,241	-0,024	-0,049

$v_{c2} = 60 \text{ m/min}$								
Passe (amostra)	T		FS		NF-1		NF-2	
	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$
1	0,205	2,235	0,336	4,028	0,218	1,778	0,260	1,853
2	0,224	1,930	0,425	2,458	0,262	2,040	0,241	1,556
3	0,217	1,716	0,391	2,221	0,279	2,135	0,254	1,885
4	0,230	1,772	0,466	3,709	0,498	3,199	0,488	3,660
5	0,220	1,688	0,551	3,430	0,535	3,178	0,704	4,058
Média	0,219	1,868	0,434	3,169	0,358	2,466	0,389	2,602
Var. Máx.	+0,011	+0,367	+0,117	+0,859	+0,177	+0,733	+0,315	+1,456
Var. Mín.	-0,014	-0,180	-0,098	-0,948	-0,140	-0,688	-0,148	-1,046

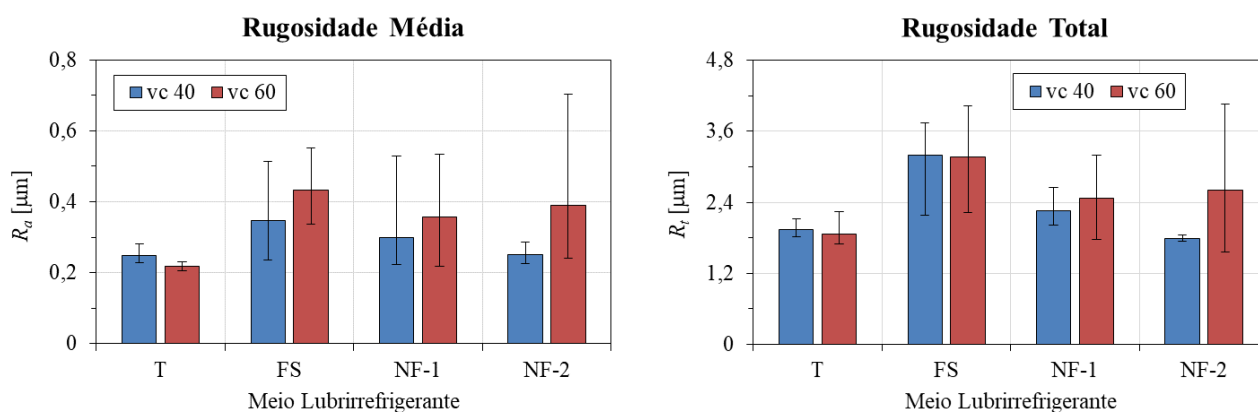


Figura 2. Gráfico dos valores médios de rugosidade média e total para os quatro meios lubrificantes nas duas velocidades de corte. As barras de erros representam as variações em torno da média.

A Figura 4 evidencia a significância nos resultados do teste de Tukey para rugosidade total (R_t) quando comparados os valores obtidos para ambas as velocidades de corte na condição de lubrificação NF-2, o que caracterizou apenas 14,76% de influência da velocidade de corte no acabamento resultante, indicando maior contribuição das características do material e do nanofluido NF-2 na rugosidade da superfície.

A Figura 5 mostra os perfis de rugosidade gerados pelo passe 1 com $v_{c1} = 40 \text{ m/min}$ nas condições a seco (T), com fluido sintético aplicado em MQL (FS) e com nanofluido 0,025% MLG em MQL (NF-1). De acordo com a Tab. 1, os valores de rugosidade foram semelhantes para as condições T e FS ($R_a \approx 0,24 \mu\text{m}$ e $R_t \approx 2,04 \mu\text{m}$). No entanto, para a NF-1 o valor de rugosidade média foi aproximadamente 120% maior ($R_a = 0,53 \mu\text{m}$) e o valor de rugosidade total cerca

de 32% maior ($R_t = 2,65 \mu\text{m}$). Isso provavelmente ocorreu devido a contribuição da geometria da aresta de corte e os parâmetros de corte que influenciam o desempenho da ferramenta e a estabilidade durante o processo de usinagem, além de impactar na vida da ferramenta e na qualidade da superfície usinada (Elbestawi et al., 1997). Observa-se ainda na superfície usinada com NF-1 uma maior presença de picos (elevados) e vales (profundos) de rugosidade, possivelmente devido à ação lubrificadorante do nanofluido durante a formação de cavacos (Manimaran e Ross, 2020).

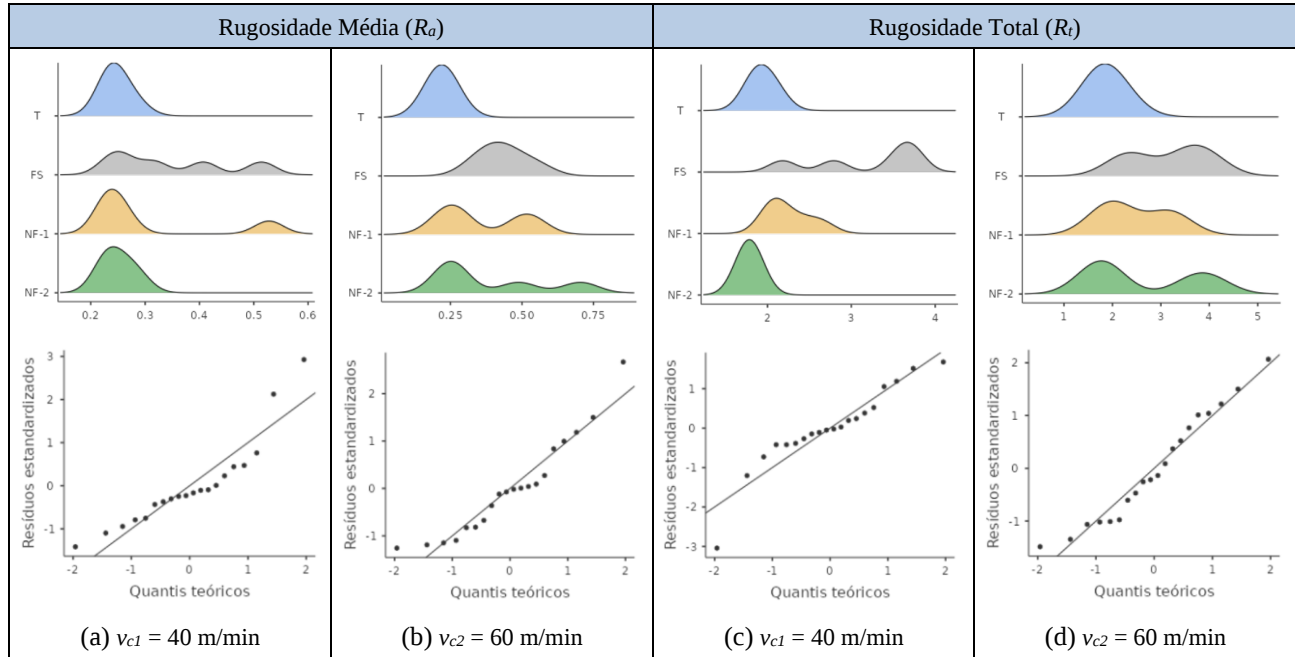


Figura 3. ANOVA dos valores médios de rugosidade média (R_a) e total (R_t) para os quatro meios lubrificantes nas duas velocidades de corte.

Diferença Mínima Significativa (R_a)					
dms	0,14481373	T	FS	NF-1	NF-2
		0,0282	0,0866	0,0602	0,1394

Diferença Mínima Significativa (R_t)					
dms	0,795319678	T	FS	NF-1	NF-2
		0,0738	0,0198	0,2146	0,8176

Figura 4. Teste de Tukey dos valores médios de rugosidade média (R_a) e total (R_t) para os quatro meios lubrificantes nas duas velocidades de corte.

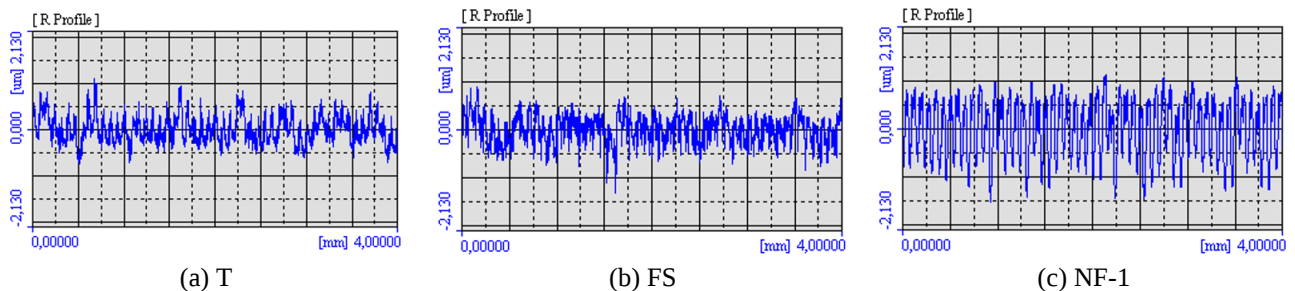


Figura 5. Perfil de rugosidade da amostra 1 com $v_{c1} = 40 \text{ m/min}$: (a) a seco; (b) com fluido sintético aplicado em MQL; (c) com nanofluido 0,025% MLG em MQL (amplitude $\pm 2,0 \mu\text{m}$).

Ao analisar o passe 5 (Fig. 6), nota-se que T e NF-1 geraram perfis com comportamentos e valores de rugosidade semelhantes ($R_a \approx 0,25 \mu\text{m}$ e $R_t \approx 1,95 \mu\text{m}$). A única diferença é a maior presença de picos e vales com NF-1 em comparação à usinagem a seco. Contudo, a amplitude de rugosidade na superfície fresada com FS é maior, refletindo em valores superiores em 105% para R_a ($0,51 \mu\text{m}$) e 88% para R_t ($3,69 \mu\text{m}$). No caso, este aumento se deve a provável necessidade de otimização de f_z , por este ser o parâmetro mais significativo do processo (Do et al., 2018).

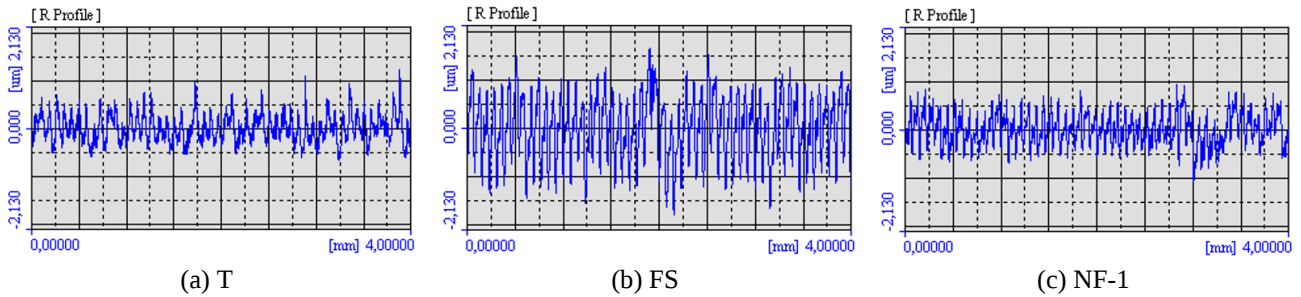


Figura 6. Perfil de rugosidade da amostra 5 com $v_{c1} = 40$ m/min: (a) a seco; (b) com fluido sintético aplicado em MQL; (c) com nanofluido 0,025% MLG em MQL (amplitude $\pm 2,0$ μm)

Pelos dados da Tabela 1, os valores de rugosidade média do passe 1 com $v_{c2} = 60$ m/min foram semelhantes nas condições a seco (T) e com nanofluido 0,025% MLG (NF-1), ou seja, $R_a \approx 0,21$ μm . Porém, para os valores de rugosidade total, a semelhança foi entre as duas condições com nanofluido: NF-1 e NF-2 (0,050% MLG), isto é, $R_t \approx 1,82$ μm . Assim, R_a foi aproximadamente 24% maior com NF-2 e R_t cerca de 23% maior em T. Observando a Figura 7, os perfis de rugosidade nas superfícies com T e NF-1 são semelhantes e diferem pouco daquela com NF-2 por causa da maior presença de picos e vales de rugosidade.

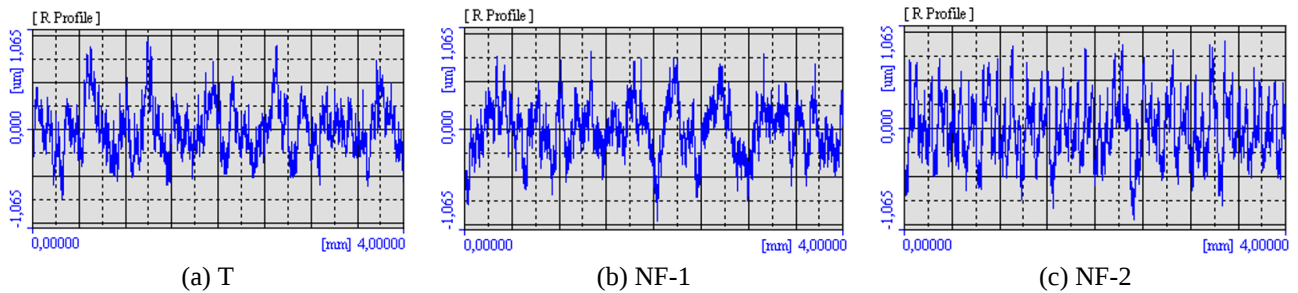


Figura 7. Perfil de rugosidade da amostra 1 com $v_{c2} = 60$ m/min: (a) a seco; (b) com nanofluido 0,025% MLG em MQL; (c) com nanofluido 0,050% MLG em MQL (amplitude $\pm 1,0$ μm)

Na Figura 8, os três perfis gerados apresentam valores de rugosidade média situados na classe N6. No caso, as superfícies fresadas com FS e NF-1 apresentam comportamentos e amplitudes semelhantes, com vales profundos, enquanto NF-2 mostra a maior amplitude dentre todas as 40 amostras analisadas. Tem-se com NF-2 uma grande incidência de picos elevados. Este padrão se deve as características de resistência à abrasão do material e dificultam a remoção de material sem a presença de lubrificação, fator este que pode indicar falha na lubrificação justamente pelo fato do fluido conter maior concentração de flocos de MLG (Bensaid et al., 2021). Ainda assim a otimização dos parâmetros pode colaborar para a redução da rugosidade e aumento da estabilidade do processo (Sória, 2016).

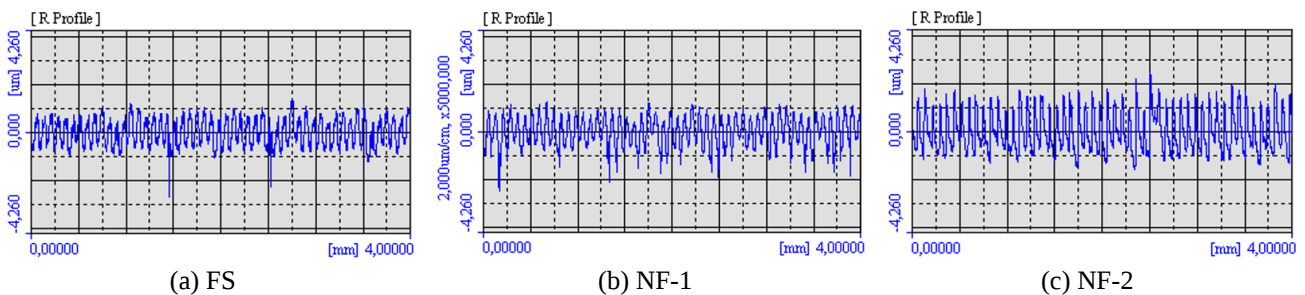


Figura 8. Perfil de rugosidade da amostra 5 com $v_{c2} = 60$ m/min: (a) com fluido sintético aplicado em MQL; (b) com nanofluido 0,025% MLG em MQL; (c) com nanofluido 0,050% MLG em MQL (amplitude $\pm 4,0$ μm).

A Figura 9 mostra as imagens das superfícies usinadas das amostras 1 e 5 para as quatro condições lubrificantes com $v_{c1} = 40$ m/min e a Fig. 10 com $v_{c2} = 60$ m/min. Conforme observado nos perfis de rugosidade (Fig. 5 e Fig. 6), as texturas da amostra 1 com NF-1 e da amostra 5 com FS geradas com $v_{c1} = 40$ m/min distinguem-se das demais. Na amostra 1 (NF-1), as marcas de avanço deixadas pela ferramenta estão mais evidentes provavelmente por causa de ação lubrificante do fluido de corte e o desgaste provocado na ferramenta de corte. Outro ponto relevante

seria a presença de vibrações, oriundas pelo sistema de fixação da peça. Na amostra 5 (FS), nota-se a presença de falhas na superfície possivelmente devido à falta de ação lubrificante do fluido sintético associado a vibrações do sistema de fixação da peça e desgaste da ferramenta (Elbestawi et al., 1997; Manimaran e Ross, 2020). Apesar de o perfil não ter sido registrado, a amostra 1 com FS apresentou os maiores valores de rugosidade com $v_{c2} = 60$ m/min. A textura da superfície usinada apresenta algumas saliências e reentrâncias mais evidentes, indicando que as marcas de avanço não são homogêneas e caracterizando a presença de vibrações. Com exceção da usinagem a seco (T), as texturas geradas com MQL apresentaram marcas e falhas na superfície, provavelmente devido a características do fluido sintético, que não contribuíram para o aumento de vida da ferramenta e, conseqüentemente, melhor estabilidade no acabamento resultante, o que pode ter comprometido a qualidade da superfície (Fallböhmer et al., 2000).

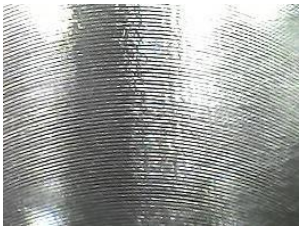
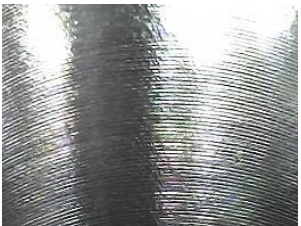
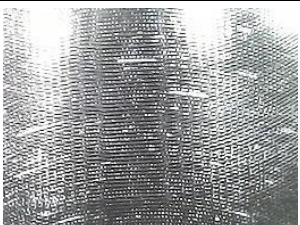
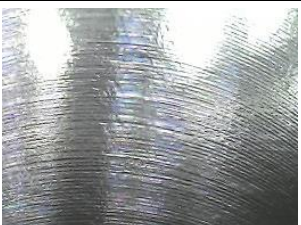
	T	FS	NF-1	NF-2
Amostra 1	 $R_t = 1,853 \mu\text{m}$	 $R_t = 2,181 \mu\text{m}$	 $R_t = 2,645 \mu\text{m}$	 $R_t = 1,849 \mu\text{m}$
Amostra 5	 $R_t = 1,906 \mu\text{m}$	 $R_t = 3,691 \mu\text{m}$	 $R_t = 2,010 \mu\text{m}$	 $R_t = 1,794 \mu\text{m}$

Figura 9. Imagens das superfícies usinadas com $v_{c1} = 40$ m/min (ampliação 60x).

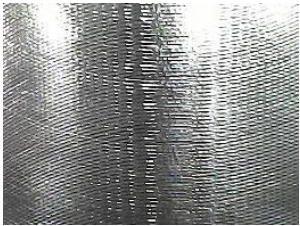
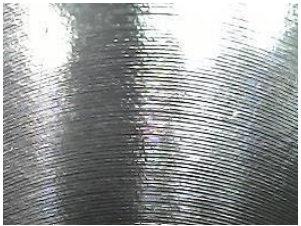
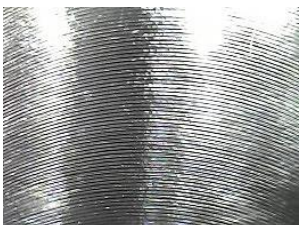
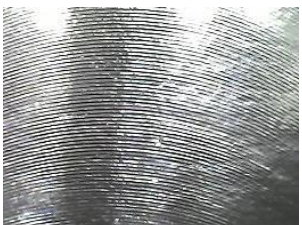
	T	FS	NF-1	NF-2
Amostra 1	 $R_t = 2,235 \mu\text{m}$	 $R_t = 4,028 \mu\text{m}$	 $R_t = 1,778 \mu\text{m}$	 $R_t = 1,853 \mu\text{m}$
Amostra 5	 $R_t = 1,688 \mu\text{m}$	 $R_t = 3,430 \mu\text{m}$	 $R_t = 3,178 \mu\text{m}$	 $R_t = 4,058 \mu\text{m}$

Figura 10. Imagens das superfícies usinadas com $v_{c2} = 60$ m/min (ampliação 60x).

A Figura 11 mostra o estado da ferramenta após o passe 5 para as duas velocidades de corte e a Fig. 12 o gráfico ilustrando a diferença entre os valores para as diferentes condições lubrificantes. Nota-se que as larguras das marcas de desgaste de flanco foram maiores nas condições com FS e NF-1, independentemente da velocidade de corte empregada. A presença do desgaste pode ter comprometido o acabamento nestas duas situações. Entretanto, a maior rugosidade registrada foi gerada na amostra 5 com NF-2, cuja aresta empregada não apresentou falha aparente. Essa

menor qualidade da superfície possivelmente ocorreu por causa das características abrasivas do material, menor ação lubrificante do nanofluido por apresentar maior concentração de MLG (Bensaid et al., 2021).

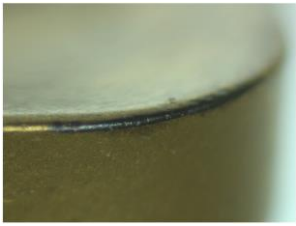
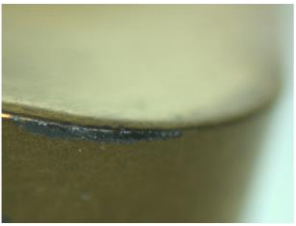
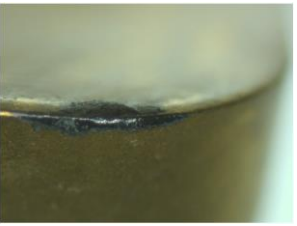
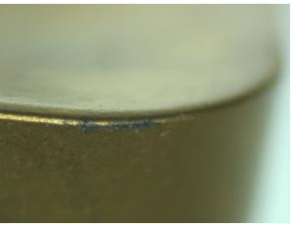
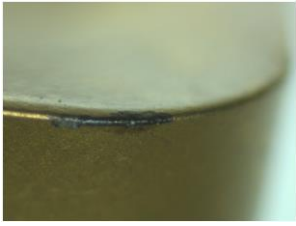
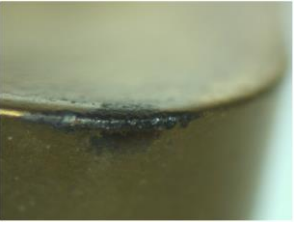
	T	FS	NF-1	NF-2
$v_{c1} = 40 \text{ m/min}$	 VB = 0,211 mm	 VB = 0,395 mm	 VB = 0,471 mm	 VB = 0,198 mm
$v_{c2} = 60 \text{ m/min}$	 VB = 0,156 mm	 VB = 0,361 mm	 VB = 0,423 mm	 VB = 0,173 mm

Figura 11. Imagens das arestas de corte das ferramentas após o 5º passe (ampliação 100x).

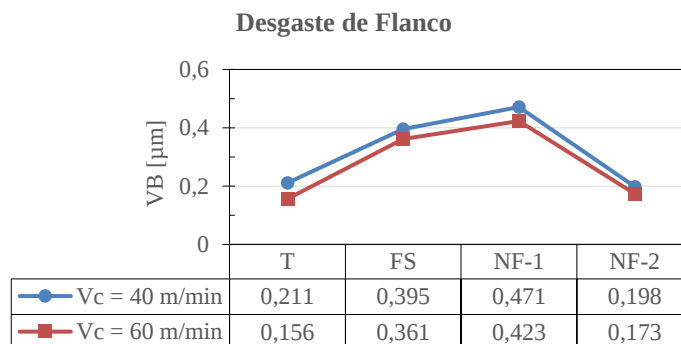


Figura 12. Valores de desgaste de flanco das ferramentas após o 5º passe.

4. CONCLUSÕES

O trabalho envolveu o estudo comparativo da influência do nanofluido à base de grafeno multicamadas (MLG) na rugosidade da superfície resultante do fresamento frontal de acabamento do aço AISI D6 endurecido, mantendo a profundidade de corte axial ($a_p = 0,2 \text{ mm}$) e o avanço por dente ($f_z = 0,04 \text{ mm/dente}$) constantes e variando a velocidade de corte em dois níveis ($v_{c1} = 40 \text{ m/min}$ e $v_{c2} = 60 \text{ m/min}$). Assim, algumas conclusões podem ser apontadas:

- A maior velocidade de corte tende a gerar maiores valores de rugosidade média (R_a) e total (R_t). Considerando R_a , 90% dos valores obtidos com v_{c1} estão situados na classe N5, enquanto para v_{c2} , o percentual é de 65%.
- O corte a seco gerou os menores valores de R_a e R_t para ambas as velocidades de corte, pelo fato de a ferramenta obter maior tempo de vida e menor desgaste, ambos associados a características do material da ferramenta, que contribuiu para estabilidade no processo e melhor acabamento.
- A usinagem com MQL utilizando fluido sintético sem MLG apresentou os piores resultados de rugosidade, onde as características do fluido não foram eficazes para se obter maior lubrificação e refrigeração da ferramenta. Além disso, gerou desgaste na aresta de corte para v_{c1} e v_{c2} , o que pode ter relação com a menor qualidade do acabamento.
- A aplicação de NF-1 (mistura de 250 mg de MLG por litro de fluido) apresentou resultados satisfatórios de rugosidade. No entanto, gerou desgaste na aresta tanto para v_{c1} quanto para v_{c2} . Possivelmente a concentração de MLG não foi suficiente para melhorar a lubrificação e a transferência de calor da região de corte, aumentando o desgaste na ferramenta e prejudicando o acabamento.

- Bons resultados foram obtidos com NF-2 (mistura de 500 mg de MLG por litro de fluido) no fresamento com v_{c1} . No entanto, a v_{c2} foi prejudicial ao acabamento, provavelmente devido à característica abrasiva do AISI D6 e à possível falta de eficiência lubrificante do NF, em contrapartida, a ferramenta não apresentou desgaste significativo, indicando certa capacidade de refrigeração do nanofluido.

5. REFERÊNCIAS

- Aço Nobre, 2023. *Tudo sobre o Aço D6 para ferramentas*. Disponível em: <<https://acosnobre.com.br/blog/aco-d6-vc131-preco-caracteristicas-propriedades-tratamento-termico/>>. Acesso em 23/05/2023.
- Anuj, K.S., Arun, K.T. and Amit, R.D., 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.
- Bensaid, K., Dhiflaoui, H., Bouzaiene, H., Yahyaoui, H., and Fredj, N. B., 2021. Effects of the cooling mode on the integrity and the multi-pass micro-scratching wear resistance of Hardox 500 ground surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 113, p. 2865-2882.
- Carreteiro, R.P. e Belmiro, P.N.A., 2006. *Lubrificação Industrial*. Interciência, Rio de Janeiro, Brasil.
- Costa-e-Silva, A.L.V e Mei, P.R., 2010. *Aços e Ligas Especiais*. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 3 ed.
- Debnath, S., Reddy, M.M. and Yi, Q.S., 2014. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 83, p. 33-47.
- Dhar, N.R., Islam, S. and Kamruzzaman, M., 2007. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4340 steel. *Gazi University Journal of Science*, Vol. 20, No. 2, p. 23-32.
- Do, T.V., Vu, N.C. and Nguyen, Q.M., 2018. Optimization of cooling conditions and cutting parameters during hard milling of AISI H13 steel by using Taguchi method. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing – ICAM 2018*, Yunlin, Taiwan, p. 396-398.
- Elbestawi, M.A., Chen, L., Becze, C.E. and El-Wardany, T.I., 1997. High-speed milling of dies and molds in their hardened state, *CIRP Annals*, Vol. 46, p. 57-62.
- Fallböhmer, P., Rodríguez, C.A., Özel, T. and Altan, T., 2000. High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, No. 1, p. 104-115.
- Gabardo, J. F., 2008. *Estudo da Tenacidade do Aço Ferramenta H13*. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná.
- Ghani, M.U., Abukhshim, N.A. and Sheikh, M.A., 2008. An investigation of heat partition and tool wear in hard turning of H13 tool steel with CBN cutting tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 39, p. 874-888.
- Goindi, G.S. and Sarkar, P., 2017. Dry machining: A step towards sustainable machining - Challenges and future directions. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 165, p. 1557-1571.
- Kalpajian, S. and Schmid, S.R., 2006. Joining processes and equipment. In: *Manufacturing Engineering and Technology*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, p. 936-1016, 5 ed.
- Machado, A.R. Abrão, A.M. Coelho, R.T. e Silva, M.B. 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 3 ed.
- Manimaran G. and Ross, K.N., 2020. Surface behavior of AISI H13 alloy steel machining under environmentally friendly cryogenic MQL with PVD-coated tool. *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 48, No. 4, p. 3269-3280.
- Mulyadi, I., Balogun, V. and Mativenga, P., 2015. Environmental performance evaluation of different cutting environments when milling H13 tool steel. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 108, p. 110-120.
- NBR 4287, 2002. *Especificações Geométricas do Produto (GPS)-Rugosidade: Método do Perfil - Termos, Definições e Parâmetros da Rugosidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, Brasil.
- Nieswald, R. Soltau, L., Tier, M.A.D, 2022. Análise da resistência ao desgaste e das propriedades mecânicas do Aço AISI H13 submetido ao tratamento criogênico. *Anais do 14º SIEPE – Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Federal do Pampa*, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Novoselov, K.S., Falko, V.I., Colombo L., Gellet, P.R., Schwab, M.G. and Kim, K., 2012. A road map for graphene. *Nature*, Vol. 940, p. 192-200.
- Oliveira, W. C., 2018. *Estudo da Viabilidade de Uso do Aço Ferramenta AISI D6 para Corte de Placas de Baterias Chumbo-Ácido*. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande.
- Raj, D.S. Praveen C. J.A. and Kumaran, A.S. 2018. Studies on cryogenic treated drills under nanofluid based reduced quantity lubrication conditions for machining Ti6Al4V. *Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition - IMECE 2018*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- Sarkar, J., Ghosh, P. and Adil, A., 2015. A review on hybrid nanofluids: recent research, development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, p. 164-177.

Sória, B.S. 2016. *Estudo do Comportamento das Vibrações em Fresamento Frontal do Aço Inoxidável AISI 316 Utilizando Transformada de Wavelet*. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE OF THE NANOFLUID APPLICATION ON SURFACE FINISH RESULTING FROM END MILLING OF AISI D6 HARDENED STEEL

Maikon da Silva Cabral Frank

Everton Luis Fernandes do Amaral

André João de Souza

Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Department of Mechanical Engineering (DEMEC), Laboratory of Automation in Machining (LAUS), 425 Sarmento Leite St., Zip Code 90050-170, Porto Alegre, RS, Brazil. maikon.frank@ufrgs.br; evertonlfa@gmail.com; ajsouza@ufrgs.br

Abstract. AISI D6 tool steel is widely used to manufacture molds and dies, characterized by high hardness and wear resistance, factors that reduce its machinability. Frictions at the chip-tool and tool-workpiece interfaces are responsible for generating high temperatures in the cutting region, significantly influencing the dimensional accuracy, the machined surface finish, and the cutting tool life. Thus, aiming to reduce these effects, nanofluids (NF) applied in machining processes have become increasingly frequent. Therefore, the study sought to verify the influence of the NF application, with different concentrations of multilayer graphene platelets (MLG), on the surface finish resulting from end milling of AISI D6 steel quenched and tempered at 52 HRC. The machining process used H30 carbide tool inserts, keeping the axial cutting depth and feed per tooth constants and applying two different cutting speeds (40 m/min and 60 m/min). The effects of dry cutting (T), synthetic cutting fluid (FS), and the same fluid with MLG (NF-1 and NF-2) applied in minimum quantity lubrication (MQL) on the generated surface roughness (profiles and parameters) were comparatively investigated through analysis of variance and Tukey's test, totaling eight tests. NF-1 consists of a mixture of 250 mg of MLG per liter of fluid, and NF-2 by a mixture of 500 mg of MLG per liter. MQL was applied at a flow rate of 200 ml/h and a pressure of 300 kPa. The machined length of each test involved the execution of five passes of 75 mm, totaling 40 samples. After machining, the samples were submitted for surface roughness evaluation using a digital roughness tester. The images of the machined surface textures produced in the first and fifth runs were acquired with a digital microscope, whereas the images of the cutting tool edges after the last run were collected by a stereo-optical microscope. It was concluded that the best results occurred in the T condition for both cutting speeds and using NF-2 with 40 m/min. These conditions demonstrated excellent tool-material characteristics. Probably, the lubrication capacity of NF-2 increased, but its cooling capacity reduced at 60 m/min. The NF-1 condition produced satisfactory results, and the FS generated the worst results, possibly due to the presence of wear on the cutting tool edge.

Keywords: End milling; hardened AISI D6 steel; dry cutting; minimum quantity lubrication; nanofluids.

RESPONSIBILITY NOTICE

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