

AVALIAÇÃO DO USO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX N4501 (UNS S32760)

Gabriela Tonin Bisolo

Fabio Telles

Claudio André Lopes de Oliveira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense – Avenida Perimetral Leste, 150, bairro São Cristóvão II, CEP 99064-440, Passo Fundo, RS

gabitoninbisolo@gmail.com; fabiotelles@ifsul.edu.br; claudiooliveira@ifsul.edu.br

Resumo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade de adoção de uma estratégia de fabricação ambientalmente amigável no torneamento do aço inoxidável super duplex N4501 (UNS S32760). Para isso, o material foi ensaiado com duas velocidades de corte e três diferentes condições de lubrificação: usinagem a seco, com fluido em abundância e com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). Os parâmetros de resposta avaliados, para cada combinação das variáveis de entrada, foram o desgaste máximo de flanco da ferramenta ($VB_{\max}$), a rugosidade média (Ra) e a rugosidade total (Rt) da peça. Os resultados apontaram que menor velocidade de corte proporciona melhores resultados em relação à vida de ferramenta e acabamento da peça para todas as condições lubrificantes testadas. Por fim, verificou-se que a técnica de MQL foi a única que promoveu resultados satisfatórios em ambas as velocidades de corte ensaiadas, tornando esse método uma opção econômica e ambientalmente viável no torneamento de acabamento do aço inoxidável super duplex N4501 (UNS S32760).

Palavras chave: Torneamento. Desgaste da Ferramenta. Rugosidade. Aço inoxidável Super Duplex N4501 (UNS S32760). Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL).

1. INTRODUÇÃO

O setor de óleo e gás necessita de materiais que possuam alta resistência mecânica para suportar as altas pressões e temperaturas a que estão submetidos, bem como alta resistência à corrosão, em virtude do ambiente agressivo em que estão inseridos. Nessa perspectiva, os aços inoxidáveis super duplex se destacam por conciliar ambas as características supracitadas (Martins e Casteletti, 2007). Contudo, as mesmas propriedades que tornam esse material adequado para tal aplicação também comprometem sua usinabilidade. Por possuir baixa condutividade térmica, os aços inoxidáveis em geral (incluindo o super duplex) concentram maior quantidade de calor na região de corte, reduzindo a vida útil da ferramenta de corte por acelerar os mecanismos de desgaste. As altas tenacidade e ductilidade provocam encruamento do material durante a usinagem, causando vibrações e propiciando a formação de cavacos longos e flexíveis que aderem à ferramenta, com tendência ao aumento da formação de rebarbas. Tal mecanismo de aderência do material da peça deformado e endurecido na superfície de saída da ferramenta é caracterizado como aresta postiça de corte (APC), a qual aparece sob condições de usinagem apropriadas. Além disso, os cavacos formados na usinagem do aço inoxidável super duplex são resistentes e abrasivos para as ferramentas e podem gerar altas forças de corte, possibilidade de lascamento da ferramenta e congestionamento na máquina-ferramenta devido ao acúmulo de volume de cavaco. Todos esses aspectos tendem a diminuir o tempo de vida da ferramenta e gerar acabamento inadequado da superfície usinada (Bordinassi, 2006; Machado *et al.*, 2015; Marques, 2007; Oliveira Junior, 2013).

A superação dessas dificuldades é um desafio na obtenção de componentes mecânicos usinados com as especificações desejadas. Dentre os parâmetros funcionais de peças mais comumente avaliados, a rugosidade tem importância amplamente reconhecida, sendo geralmente utilizada tanto como um índice da qualidade do produto quanto um indicador para avaliação da produtividade de máquinas-ferramenta e peças usinadas. Nesse sentido, a medição e a caracterização da qualidade da superfície usinada pode ser considerada como um tradutor do desempenho da usinagem (Revankar *et al.*, 2014). Outro parâmetro significativo do processo de produção é o desgaste de ferramenta. Quando a progressão do desgaste da ferramenta é estudada e controlada corretamente, há uma tendência no aumento da produtividade. Por mais que o custo das ferramentas de corte seja relativamente baixo, representando de 1 até 3% do custo total de usinagem para grandes volumes de produção, a maior vida útil da ferramenta acarreta em menos paradas de máquina para troca de ferramenta, obtendo-se uma produção mais efetiva (Diniz *et al.*, 1999; Stephenson e Agapiou, 2016).

Em geral, a otimização do processo de usinagem e o aumento da produtividade estão associados ao consumo de fluidos de corte. Sua utilização promove benefícios como melhor acabamento, estabilidade dimensional da peça, aumento da vida da ferramenta e redução das forças de corte (Espindola, 2016; Machado *et al.*, 2015). Por isso, a aplicação de fluido na

forma jorrada ou em abundância é muito comum. Entretanto, fluidos de corte são agentes nocivos ao meio ambiente e seu manuseio e descarte causam uma série de problemas dentro das indústrias do setor metalomecânico (Dias, 2000). Sob esse aspecto, a melhor forma de eliminar esses empecilhos seria a eliminação do uso de fluido de corte (usinagem a seco). No entanto, esse método não é aplicável em todas as operações de usinagem, principalmente por ocasionar alto desgaste da ferramenta e/ou acabamento inadequado devido às altas temperaturas geradas (Shokrani, *et al.* 2012).

Uma alternativa à usinagem a seco ou ao uso de fluido em abundância é a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), em que uma mistura de ar e óleo forma pequenas quantidades de lubrificante em gotículas que são direcionadas à zona de corte na forma de névoa (Astakhov, 2008). A usinagem com MQL é considerada ambientalmente amigável, pois reduz o consumo de fluido de corte, obtendo benefícios ambientais, econômicos e de segurança à saúde do operador (Attanasio *et al.*, 2006). Além disso, esse método tem mostrado grande potencial em diversos processos de usinagem por proporcionar resultados satisfatórios em aspectos relativos a desgaste de ferramenta, rugosidade, temperatura e forças de corte (Boswell *et al.*, 2017).

A partir do exposto, este trabalho busca analisar o desgaste da ferramenta e a rugosidade da peça no torneamento do aço inoxidável super duplex N4501 (UNS S32760) sob diferentes velocidades de corte e condições lubrificantes, a fim de avaliar a viabilidade da adoção de técnicas de usinagem ambientalmente amigáveis para o material em questão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A matéria-prima utilizada foi o aço inoxidável super duplex N4501 (UNS S32760), disponibilizada em uma barra de seção circular de $\varnothing 38,1 \times 550$ mm de comprimento. Primeiramente, foi dado um passe no material para homogeneizar o diâmetro da peça ($\varnothing 37$ mm). Após, quatro corpos de prova foram seccionados com comprimentos aproximadamente iguais. Estipulou-se um comprimento de usinagem de 115 mm para cada corpo de prova. Foi feito um canal de 3 mm de largura ao final do comprimento definido para a usinagem, com o intuito de evitar o atrito excessivo entre ferramenta e peça na saída da ferramenta ao final de cada passe. Foi definido que a usinagem dos corpos de prova seria realizada até atingir o diâmetro mínimo de 12 mm, para evitar que maiores vibrações na peça, ocasionadas pela diminuição do diâmetro, não influenciassem negativamente os parâmetros analisados (Fig. 1).

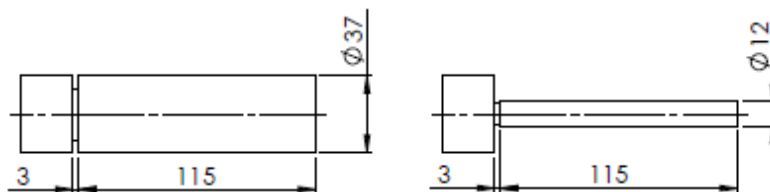


Figura 1. Corpo de prova inicial (esquerda) e no final do experimento (direita)

A preparação dos corpos de prova e a execução dos experimentos foram realizadas em torno CNC Romi modelo Centur 30D, potência de 10kW, rotação máxima de 4000 rpm e comando CNC Siemens 802, o qual está instalado no Laboratório de CNC do Instituto Federal Sul-rio-grandense, campus Passo Fundo. Para os ensaios, foram utilizados insertos de metal-duro do fabricante Sandvik, modelo TNMG 160404 - MF 1115 ($r_e = 0,4$ mm), com revestimento PVD de $\text{TiAlN} + \text{AlCr}_2\text{O}_3 + \text{TiAlN}$. O suporte da ferramenta utilizado foi o modelo MTJNR 2525M 16M1 da Sandvik.

O experimento foi desenvolvido sob três condições de lubrificação: usinagem com fluido jorrado (abundante), com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) e torneamento a seco. Para os ensaios com fluido em abundância, foi utilizado o óleo solúvel sintético biodegradável BIO 100E, do fabricante Biolub Química, com vazão de 960 l/h. Nas aplicações com MQL utilizou-se o lubrificante Quimatic Jet, fluido sintético a base de água específico para aplicação por névoa ou gotejamento do fabricante Quimatic Tapmatic, e indicado para metais ferrosos e aços inoxidáveis. A aplicação de MQL foi realizada por meio do dispositivo nebulizador Quimatic IV da mesma empresa. Para a utilização do método MQL a vazão do fluido foi fixada em 100 ml/h e pressão de ar comprimido foi regulada em 4 bar. Devido às dificuldades no ajuste da vazão de fluido do sistema MQL, optou-se por realizar todos os ensaios para cada condição de lubrificação em separado, ou seja, todos os ensaios com uma condição lubrificante específica foram feitos de uma só vez, repetindo-se o processo para as demais condições.

Os parâmetros estabelecidos para o experimento, bem como seus respectivos níveis, são mostrados na Tab. 1.

Tabela 1. Condições de usinagem estabelecidas para o experimento.

Fatores controláveis					Fatores fixos	
Condição de lubrificação			Velocidade de corte (v_c)		Avanço (f)	Profundidade de corte (a_p)
Seco	MQL	Jorro	90 m/min	150 m/min	0,1 mm/rev	0,5 mm

As velocidades de corte (v_c) selecionadas para o experimento foram 90 m/min e 150 m/min. A escolha do menor valor teve como referência o trabalho de Jesus (2013), para o qual maior vida útil da ferramenta no torneamento do aço inoxidável super duplex N4501 foi conseguida com esse parâmetro. Já a velocidade de 150 m/min foi selecionada com base nos parâmetros recomendados pelo fabricante da ferramenta. Optou-se por fixar os valores de avanço (f) e de profundidade de corte (a_p) em níveis recomendados pelo fabricante.

Para cada passe dado na peça, foram coletados dados de desgaste de flanco máximo da ferramenta ($VB_{m\acute{a}x}$), rugosidade média (Ra) e rugosidade total (Rt) da peça. Para cada ensaio, o critério de parada da coleta de dados foi estabelecido pela presença de pelo menos um dos seguintes fatores: (i) $VB_{m\acute{a}x} = 0,2$ mm; (ii) comprimento de usinagem da peça igual a 2258 m (25 passadas); e/ou (iii) presença de entalhe. As imagens do desgaste do inserto foram capturadas por meio do microscópio digital modelo U1000X com ampliações de até 1000x, fixado a um traçador de altura por meio de um suporte especialmente construído para este fim. Um gabarito serviu para padronizar o posicionamento do inserto no processo de captura das imagens, facilitando a coleta de dados. Uma escala física transparente inserida no gabarito junto com a ferramenta serviu como um padrão de referência para a medição do desgaste. As imagens do microscópio foram captadas e processadas através de computador pelo software Yawcam 0.6.2 e o software AutoCAD® 2016 auxiliou no processo de medição do desgaste $VB_{m\acute{a}x}$ de cada aresta de corte. Foi aplicado um fator de escala em cada imagem para dimensionar o desgaste, tendo por base a escala física colocada junto ao inserto na captura das fotos.

Os parâmetros escolhidos para análise da textura da peça foram rugosidade média (Ra) e rugosidade total (Rt), os quais são suficientes para caracterizar o perfil de uma superfície torneada na maioria das situações (Stephenson e Agapiou, 2016). Os dados de rugosidade foram obtidos com o rugosímetro digital portátil marca TIME, modelo TR200. Após cada passe, foram feitas três medições de rugosidade aproximadamente equidistantes ao redor da peça, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados. Tanto os valores de desgaste quanto das rugosidades foram compilados no software Microsoft® Excel 2016, a partir do qual os gráficos para avaliação desses parâmetros foram gerados. Figura 2 apresenta um esboço esquemático do *setup* experimental e procedimentos de medições realizados no experimento.

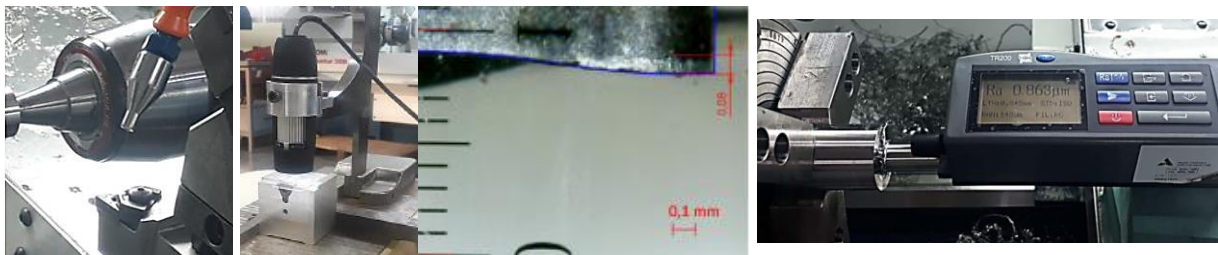


Figura 2. *Setup* experimental: posição do bico aspersor de MQL (esquerda); coleta de imagens do inserto e medição do desgaste (centro); medição da rugosidade (direita)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Desgaste da ferramenta

Figura 3 mostra as imagens relativas ao fim dos ensaios para todas as condições lubrificadoras, quando utilizada velocidade de corte de 90 m/min.



Figura 3. Ensaios com $v_c = 90$ m/min: material aderido na ferramenta na usinagem a seco (esquerda); caracterização do fim de vida da ferramenta para torneamento com MQL (centro) e com fluido em abundância (direita)

Para os ensaios com $v_c = 90$ m/min, verificou-se a impossibilidade de medição do desgaste para o torneamento a seco (Fig. 3, esquerda). Tal situação decorreu da quantidade excessiva de APC (aresta postiça de corte) aderida na ferramenta, a qual preencheu as porções deterioradas do inserto, não permitindo aferir a profundidade do desgaste, nem a possível ocorrência dos demais critérios de fim de vida da ferramenta. Dessa forma, não foi possível quantificar o desgaste de flanco nessa velocidade de corte, razão pela qual esse parâmetro não foi avaliado nessa condição lubrificante. Na usinagem com MQL e jorro, o fim da vida da ferramenta foi determinado por surgimento de entalhe e pelo alcance do

desgaste de flanco máximo estipulado, respectivamente. A presença de entalhe na condição MQL possivelmente decorre da alta tendência de encruamento do material, que leva à formação de uma camada endurecida na superfície da peça, removida sob a forma de cavaco e que pode formar rebarbas duras que martelam a superfície da ferramenta, provocando esse tipo de desgaste. O mecanismo de aderência e arrastamento (*attrition*) também pode contribuir para o surgimento de entalhe por possibilitar a remoção de partículas da aresta de corte. Outrossim, a adesão propicia o surgimento de APC (muito recorrente em todo o experimento) formada devido à ductilidade do material, o que também possibilita o surgimento do desgaste por entalhe (Aguiar *et al.*, 2015; Machado *et al.*, 2015; Oliveira Junior, 2013).

Figura 4 mostra imagens do fim de vida do inserto no torneamento com $v_c = 150$ m/min, da qual se verifica que a causa do fim da vida da ferramenta foi o surgimento de entalhe para as três condições de lubrificação ensaiadas.



Figura 4. Caracterização do fim de vida da ferramenta pelo surgimento de entalhe quando utilizada $v_c = 150$ m/min, nas condições de lubrificação a seco (esquerda), MQL (centro) e jorro (direita)

Figura 5 mostra a evolução do desgaste de flanco da ferramenta para as condições lubrificantes analisadas nas velocidades de corte de 90 m/min e 150 m/min.

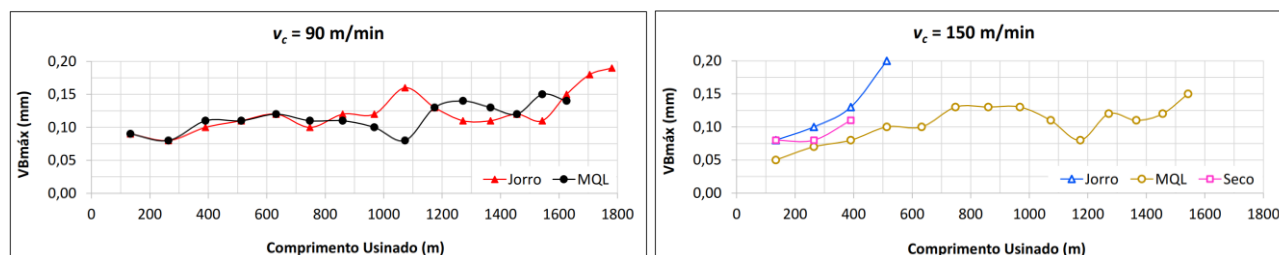


Figura 5. Variação do desgaste de flanco máximo da ferramenta ($VB_{máx}$) em função do comprimento usinado para as condições de lubrificação testadas na usinagem com velocidade de corte de 90 m/min (esquerda) e com velocidade de corte de 150 m/min (direita)

Para a v_c menor (Fig. 5, esquerda), o crescimento do desgaste ao longo da vida da ferramenta foi lento tanto na condição com MQL quanto com fluido jorrado, tendo inicialmente mínima variação entre os seus valores. Somente a partir do sexto passe no material (748 m), a variação começa a ser maior. O comportamento do desgaste é relativamente semelhante para ambas as condições. Logo, pelos resultados alcançados nesse parâmetro de corte, não se pode afirmar com convicção que uma condição lubrificante proporciona menor desgaste que a outra. A aparente diminuição do desgaste em determinados pontos de coleta de dados ao longo do ensaio pode estar relacionada a um possível preenchimento (aderência) do material da peça na superfície desgastada da ferramenta (assim como identificado nos ensaios na condição de torneamento a seco com $v_c = 90$ m/min) nestes pontos específicos do experimento, dificultando a análise do valor real de desgaste.

Em relação à velocidade de corte de 150 m/min (Fig. 5, direita), a alta taxa de crescimento do desgaste reduziu drasticamente a vida útil da ferramenta nas condições seco e jorro. Para o torneamento a seco, já era esperado elevado desgaste em virtude das altas temperaturas de corte geradas e da dificuldade de remover o calor do processo pela ausência de fluido. No entanto, chama atenção que o torneamento com fluido em abundância tenha apresentado o maior desgaste da ferramenta, mesmo que, teoricamente, proporcione maior refrigeração entre as condições testadas, o que, em tese, promoveria maior redução do calor, com consequente diminuição da temperatura na região de corte. A despeito disso, Krolczyk *et al.* (2017) afirmam que, para a usinagem do aço inoxidável super duplex, altas temperaturas de corte aumentam a ductilidade do material da peça e podem reduzir o coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta, reduzindo as forças de corte e proporcionando maior vida do inserto. Sob essa ótica, estima-se que, para esse nível de v_c , a refrigeração dada pelo jorro não tenha permitido o incremento da ductilidade do material da peça, promovendo maiores esforços de corte na comparação com as demais condições lubrificantes, o que impactou na vida da ferramenta.

Por sua vez, a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante se sobressaiu em relação aos outros métodos, sendo, nesse aspecto, a condição que possibilita o menor desgaste e, consequentemente, a maior vida útil do inserto. Tal resultado pode estar relacionado ao reconhecido poder de lubrificação dado pelo método MQL. A habilidade do sistema em formar

uma fina camada de fluido na interface cavaco-ferramenta reduz as forças de usinagem e o atrito na região de corte, facilitando o escoamento do cavaco e promovendo, consequentemente, maior vida da ferramenta pelo menor desgaste de flanco (Gupta *et al.*, 2019; Krolczyk *et al.*, 2019). Outrossim, consoante Quimatic Tapmatic (2019), a técnica MQL pode reduzir em até 50% a temperatura no processo de usinagem em relação à usinagem a seco, contribuindo para a redução do desgaste pelo menor calor gerado. Embora a temperatura mais alta seja supostamente benéfica para tornar o material mais dúctil e facilitar a usinagem, como anteriormente mencionado, supõe-se que temperaturas de corte demasiadamente elevadas minimizem sobremaneira a vida da ferramenta, já que o aumento da temperatura tende a acelerar os mecanismos de desgaste, reduzindo consideravelmente a vida útil do inserto (Machado *et al.*, 2015). Sob esse aspecto, possivelmente haveria que se ter um ponto de equilíbrio da temperatura que facilita a usinagem pelo incremento da ductilidade da peça, sem acelerar demasiadamente o desgaste e comprometer a vida da ferramenta.

Figura 6 apresenta gráficos da evolução de $VB_{máx}$ para as condições MQL e jorro, visando comparar o comportamento do desgaste da ferramenta entre as velocidades de corte ensaiadas para cada condição lubrificante. Observando os gráficos, percebe-se não haver grandes variações nos níveis de desgaste para ambas as v_c no uso de MQL. Sob esse aspecto, não há grande impacto do aumento da v_c na diminuição da vida da ferramenta, o que aparentemente comprova a boa lubricidade do meio lubrificante na redução do atrito, facilitando a usinagem mesmo em condição mais severa de utilização. No entanto, para a condição jorrada, o aumento da v_c reduziu de forma significativa a vida da ferramenta. Dessa forma, a utilização de fluido em abundância não proporcionou resultados tão eficientes quanto o sistema MQL.

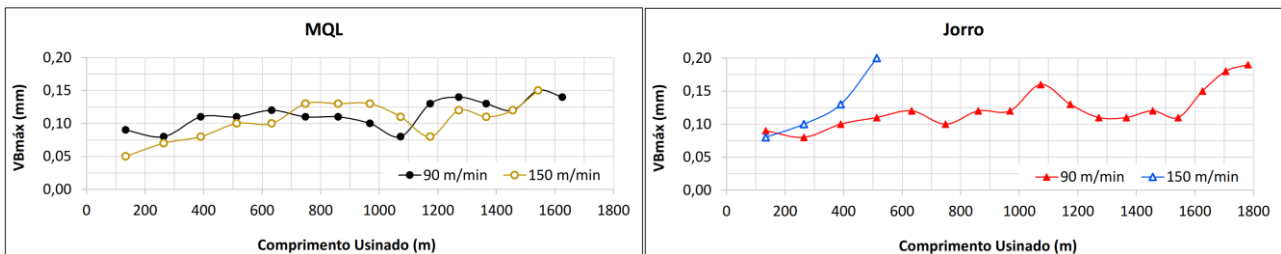


Figura 6. Comparação da variação do desgaste da ferramenta ($VB_{máx}$) em função do comprimento usinado para ambas as velocidades de corte ensaiadas, nas condições de lubrificação MQL (esquerda) e jorro (direita)

3.2. Rugosidade

Figura 7 apresenta os resultados obtidos para R_a e R_t no torneamento com $v_c = 90$ m/min, enquanto que a Fig. 8 mostra a variação da rugosidade média e total na usinagem com $v_c = 150$ m/min. Cabe ressaltar, como já mencionado, que o desgaste da ferramenta não foi medido para a usinagem a seco na $v_c = 90$ m/min devido às dificuldades encontradas para realizar a coleta de dados, o que, consequentemente, também prejudicou a coleta de dados de rugosidade.

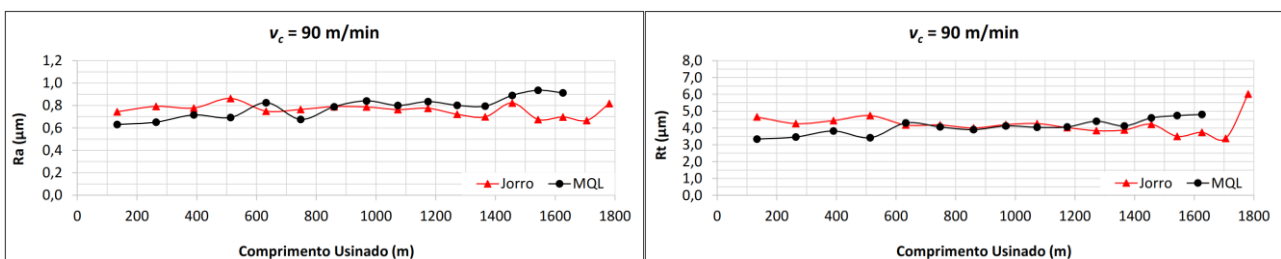


Figura 7. Variação da rugosidade média (esquerda) e rugosidade total (direita) em função do comprimento usinado para os métodos de lubrificação jorro e MQL, na usinagem com velocidade de corte de 90 m/min:

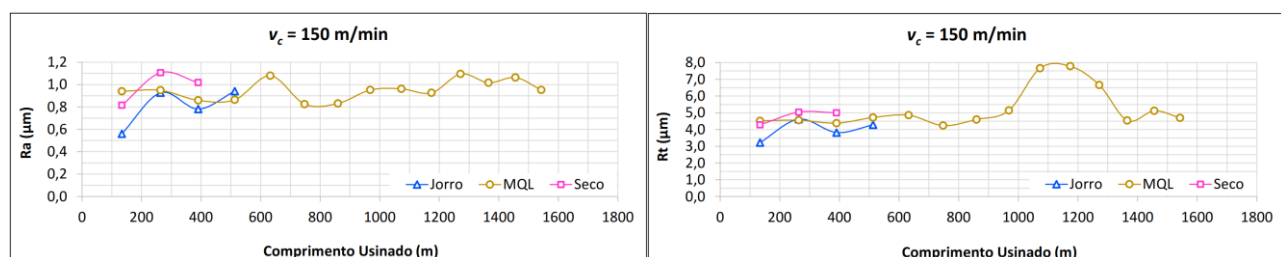


Figura 8. Variação da rugosidade média (esquerda) e rugosidade total (direita) em função do comprimento usinado para os métodos de lubrificação jorro, MQL e seco, na usinagem com velocidade de corte de 150 m/min

Para $v_c = 90$ m/min (Fig. 7), tanto Ra quanto Rt apresentaram, em geral, um comportamento similar entre si. O torneamento com MQL mostrou menores valores absolutos de rugosidade média e total (com algumas exceções) em relação ao jorro até cerca da metade da vida útil da ferramenta, a partir da qual a situação inverte. Há alguma semelhança nesse comportamento em relação ao verificado no desgaste da ferramenta, embora esse último não seja tão evidente por apresentar maior variação entre as condições de jorro e MQL. Mesmo assim, cabe ressaltar que a diferença entre valores de rugosidade na comparação entre fluidos não é tão expressiva na maioria das medições, já que, na prática, os valores obtidos entre as condições lubrificantes são próximos.

Para a velocidade de corte de 150 m/min (Fig. 8), o drástico aumento da altura de pico do perfil de rugosidade Rt do sistema MQL, entre os valores de comprimento usinado entre 1000 e 1300 m, provavelmente decorre da formação da APC, que estava aderida à ferramenta nesses pontos. Segundo Trent e Wright (2000 *apud* Gamarra, 2017), alguns fragmentos podem ser arrancados da APC e passar entre a superfície de folga e a peça, piorando o acabamento da superfície usinada. Ainda em relação à v_c mais alta, a comparação entre as condições de lubrificação ficou prejudicada em vista do desgaste prematuro da ferramenta no torneamento a seco e com fluido jorrado. À parte isso, fica claro que o sistema MQL teve destaque na usinagem do aço inoxidável super duplex N4501 no nível mais alto de v_c utilizada no experimento, proporcionando maior vida útil dentre as condições lubrificantes testadas.

Figuras 9 e 10 apresentam uma comparação entre os perfis de Ra e Rt , respectivamente, obtidos no torneamento com MQL e jorro nos dois níveis de velocidade de corte ensaiados (90 m/min e 150 m/min).

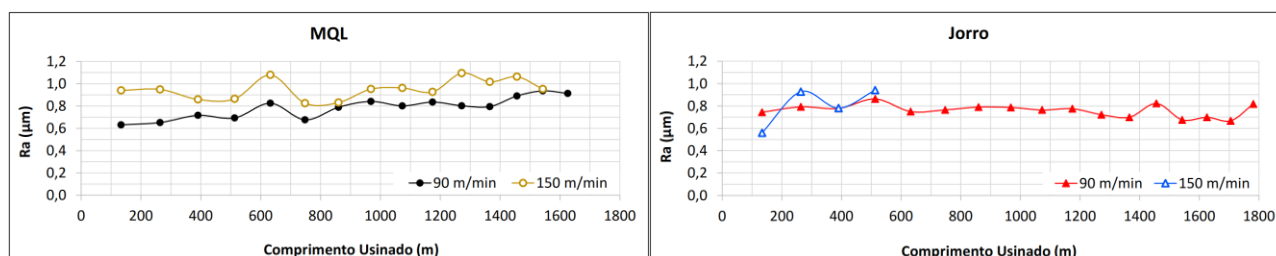


Figura 9. Comparação da variação da rugosidade média (Ra) em função do comprimento usinado para ambas as velocidades de corte ensaiadas, nas condições de lubrificação MQL (esquerda) e jorro (direita)

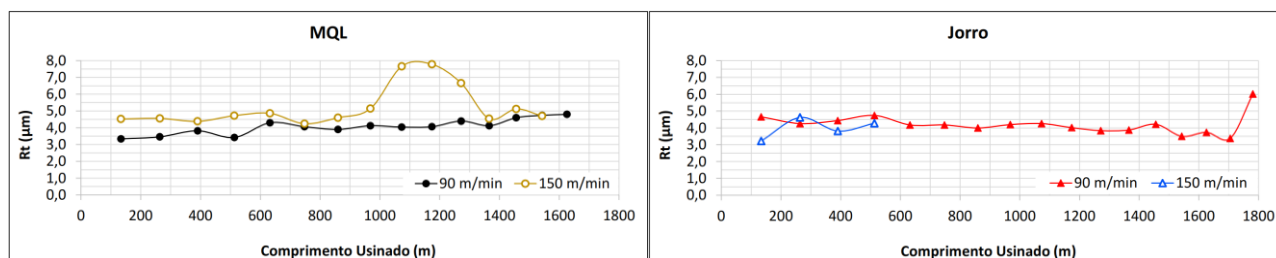


Figura 10. Comparação da variação da rugosidade total (Rt) em função do comprimento usinado para ambas as velocidades de corte ensaiadas, nas condições de lubrificação MQL (esquerda) e jorro (direita)

Na comparação entre as velocidades de corte, até onde foi possível realizar a análise comparativa dos meios de lubrificação, observa-se uma variação relativamente menor na amplitude da rugosidade quando utilizada $v_c = 90$ m/min na comparação com a $v_c = 150$ m/min (maior estabilidade do processo para v_c menor). Essa diferença de amplitudes pode ser explicada por Diniz *et al.* (1999) e Machado *et al.* (2015), que afirmam que a rugosidade oscila entre valores altos e baixos pelo aumento da velocidade de corte, que gera maiores vibrações e prejudica o acabamento. Para a aplicação de MQL, percebe-se claramente que a menor v_c proporciona melhor acabamento, o que possivelmente decorre, como supracitado, da menor vibração a que a peça está submetida com o nível mais baixo de v_c , tendo efeito benéfico na melhora da qualidade da superfície usinada. No que tange à utilização de fluido em abundância, a comparação ficou prejudicada em face da baixa vida de ferramenta para a v_c mais alta. Ainda assim, levando em consideração acabamento da superfície da peça e vida de ferramenta, o uso de velocidade de corte mais baixa é desejável, pois é o único parâmetro de corte que consegue entregar resultados satisfatórios para essa condição lubrificante.

4. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados de desgaste da ferramenta e rugosidade da peça no torneamento do aço inoxidável super duplex N4501 (UNS S32760), com vistas a avaliar a adoção de uma estratégia de usinagem ambientalmente amigável, alguns apontamentos podem ser delineados.

Como observado nos experimentos, as condições necessárias para o torneamento do material em questão, tendo em vista sua baixa usinabilidade, devem ser cuidadosamente avaliadas. Este fato ficou bastante evidente na usinagem sem o uso de fluido de corte, que, a despeito de ser a técnica mais desejável sob a ótica da fabricação sustentável, mostrou-se uma condição altamente severa e que proporciona resultados insatisfatórios, tanto que limitou drasticamente a comparação com as demais condições lubrificantes.

Em contrapartida, a usinagem com MQL apresentou melhor estabilidade e menor desgaste para as duas velocidades de corte ensaiadas (90 m/min e 150 m/min), na comparação com os outros métodos de lubrificação utilizados. Inclusive, o nível de desgaste apresentado para os dois níveis de velocidade de corte foi relativamente similar, mostrando que não há grande impacto do aumento desse parâmetro de corte na diminuição da vida da ferramenta no uso de Mínima Quantidade de Lubrificante. Tal resultado suplantou inclusive o torneamento com fluido em abundância, que apresentou resultados muito inferiores ao método MQL no ensaio à velocidade de corte mais alta, embora os resultados tenham sido relativamente similares na velocidade de corte mais baixa.

No que tange aos parâmetros de corte avaliados, a velocidade de 90 m/min apresentou maior vida útil da ferramenta para ambos os meios lubrificantes avaliados nessa condição (jorro e MQL). Ademais, mostra menor dispersão nos valores de rugosidade entre todos os métodos de lubrificação e, para o método MQL, os valores de rugosidade são menores em relação à velocidade de 150 m/min. Portanto, considera-se que a velocidade de corte de 90 m/min é a melhor alternativa entre os parâmetros de corte testados no experimento.

Por fim, o único método de lubrificação utilizado que proporcionou resultados satisfatórios tanto em relação ao desgaste quanto em relação à qualidade superficial da peça, para as duas velocidades de corte testadas, foi a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante, já que os demais meios não tiveram bons resultados com o nível mais alto de velocidade de corte. Além disso, proporcionou resultados de desgaste de ferramenta e rugosidade da peça comparáveis ao uso de fluido em abundância para a menor velocidade de corte utilizada. Sob essa ótica, o MQL se sobressai às demais condições lubrificantes, além de ser mais econômico e ambientalmente sustentável na comparação com o método em jorro por utilizar menor quantidade de fluido de corte no processo e, consequentemente, demandar menor custo de aquisição e aplicação, bem como minimizar os impactos ambientais. Por tudo isso, é possível considerar a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante como uma opção econômica e ambientalmente viável no torneamento do aço inoxidável super duplex N4501 (UNS S32760).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Villares Metals, pela doação da matéria-prima utilizada na pesquisa; à empresa IC Usinagem Industrial, pela doação do inserto; e aos professores do Instituto Federal Sul-rio-grandense, campus Passo Fundo, Luis Fernando Melegari e Maurício Rodrigues Policena, pelo auxílio na aquisição do nebulizador de MQL.

6. REFERÊNCIAS

- Aguiar, H.C.G.D., Hassui, A. e Correa, F.D.S., 2015. Estudo do desgaste das ferramentas de metal duro no torneamento do aço inoxidável superduplex. In *Anais do 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF2015*. Salvador, Brasil.
- Astakhov, V.P., 2008. “Ecological Machining: Near-dry Machining”. In *Machining – Fundamentals and Recent Advances*. Springer, p. 195-223.
- Attanasio, A. et al., 2006. “Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear”. *Wear*, Vol. 260, p. 333-338.
- Boswell, B., Islam, M.N., Davies, I.J., Ginting, Y.R. e Ong, A.K., 2017. “A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 92, p. 321-340.
- Bordinassi, É.C., 2006. *Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável super-duplex após usinagem*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Dias, A.M.D.P., 2000. *Avaliação ambiental de fluidos de corte utilizados em processos convencionais de usinagem*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Diniz, E.A., Marcondes, F.C. e Coppini, N.L., 1999. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. MM, São Paulo, 1ª edição.
- Espindola, E.S.C., 2016. *Aplicação de técnicas de usinagem ambientalmente amigáveis no processo de torneamento radial do aço SAE 1045*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Gupta, M.K., Mia, M., Pruncu, C.I., Kapłonek, W., Nadolny, K., Patra, K., Mikolajczyk, T., Pimenov, D.Y., Sarikaya, M. e Sharma, V.S., 2019. “Parametric optimization and process capability analysis for machining of nickel-based superalloy”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, p. 3995-4009.
- Jesus, R.E.C.D., 2013. *Avaliação dos esforços, temperatura e integridade superficial em torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32760 quando alterado o ângulo de posição da ferramenta e os parâmetros de corte*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São João Del Rei. São João Del Rei.

- Krolczyk, G.M., Maruda, R.W., Krolczyk, J.B., Wojciechowski, S., Mia, M., Nieslony, P. e Budzik, G., 2019. "Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production – A review", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 218, p. 601-615.
- Krolczyk, G.M., Nieslony, P., Maruda, R.W., e Wojciechowski, S., 2017. "Dry cutting effect in turning of a duplex stainless steel as a key factor in clean production", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, p. 3343-3354.
- Machado, Á.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T. e da Silva, M.B., 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Blücher, São Paulo, 3ª edição.
- Martins, D.C. e Casteletti, L.C., 2007. "Aços inoxidáveis duplex e super duplex – obtenção e caracterização". *Fundição e Serviços*, Vol. 17.
- Marques, D.C., 2007. *Torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 e influência na resistência à corrosão*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Oliveira Junior, C.A., 2013. *Estudo da influência do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe-Cr-Ni*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Quimatic Tapmatic, 2019. "Técnica MQL reduz em até 50% temperatura nos processos de usinagem". 16 Out. 2019 <<https://www.quimatic.com.br/blog/2016/06/tecnica-mql-reduz-em-ate-50-temperatura-nos-processos-de-usinagem/>>.
- Revankar, G.D., Shetty, R., Rao, S.S. e Gaitonde, V.N., 2014. "Analysis of Surface Roughness and Hardness in Titanium Alloy Machining with Polycrystalline Diamond Tool under Different Lubricating Modes". *Materials Research*, Vol. 17, p. 1010-1022.
- Shokrani, A., Dhokia, V. e Newman, S.T., 2012. "Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 57, p. 83-101.
- Stephenson, D.A. e Agapiou, J.S., 2016. *Metal Cutting Theory and Practice*. CRC Press, Boca Raton, 3ª edição.
- Trent, E.M. e Wright, P.K. "Metal Cutting". In Gamarra, J.R., 2017. *Estratégias de Usinagem no Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex (UNS S32750)*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Evaluation of the use of Minimum Quantity Lubrication in super duplex stainless steel N4501 (UNS S32760) turning

Gabriela Tonin Bisolo

Fabio Telles

Claudio André Lopes de Oliveira

Sul-rio-grandense Federal Institute of Education, Science, and Technology – Avenida Perimetral Leste, 150, São Cristóvão II, CEP 99064-440, Passo Fundo, RS

gabitoninbisolo@gmail.com; fabiotelles@ifsul.edu.br; claudiooliveira@ifsul.edu.br

Abstract. This work aimed to evaluate the use of an environmentally friendly manufacturing strategy in super duplex stainless steel N4501 (UNS S32760) turning. The material was tested with two cutting speeds and three different lubricating conditions: dry machining, flood coolant, and Minimum Quantity Lubrication (MQL). For each combination of the input variables, the response parameters evaluated were the maximum tool flank wear (VBmax), average surface roughness (Ra), and maximum height of the profile (Rt) of the workpiece. The results showed that lower cutting speed provides higher tool life and better workpiece finishing for all tested lubricating conditions. Finally, it was found that the MQL technique was the only one that promoted satisfactory results at both cutting speeds tested. Therefore, MQL is an economical and environmentally viable option in super duplex stainless steel N4501 (UNS S32760) turning.

Keywords: Turning. Tool Wear. Surface Roughness. Super Duplex Stainless Steel N4501 (UNS S32760). Minimum Quantity Lubrication (MQL).

RESPONSIBILITY NOTICE

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