

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

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE
NA RUGOSIDADE E NA FORÇA GERADAS NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL
AISI 420C

por

Renato Teixeira de Souza

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, dezembro de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Souza, Renato Teixeira de

Análise da influência dos métodos de aplicação do fluido de corte na rugosidade e na força geradas no torneamento do aço inoxidável AISI 420C / Renato Teixeira de Souza. -- 2019.

20 f.

Orientador: Heraldo José de Amorim.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Fluidos de corte. 2. Torneamento a seco. 3. Aços inoxidáveis. 4. Rugosidade. 5. Forças de usinagem. I. Amorim, Heraldo José de, orient. II. Título.

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

Renato Teixeira de Souza

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE
NA RUGOSIDADE E NA FORÇA GERADAS NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL
AISI 420C

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. Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: **Processos de Fabricação**

Orientador: Prof. Heraldo José de Amorim

Comissão de Avaliação:

Prof. André João de Souza

Prof. Heraldo José de Amorim

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, dezembro de 2019

*Aos meus queridos pais Marleci e Roberto
Aos meus irmãos Sharlene e Bruno
À minha amada esposa Priscila
E à minha doce filha Marina
Dedico este trabalho como prova do meu amor e gratidão.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde, força e luz nesta jornada.

A todo corpo docente da UFRGS, especialmente ao professor orientador Dr. Heraldo José de Amorim, pelo conhecimento compartilhado, orientação na pesquisa, disponibilidade e amizade.

Ao LAUS-UFRGS (Laboratório de Automação em Usinagem), pela disponibilidade de infraestrutura e suporte à realização deste trabalho, aos seus integrantes e em especial ao Técnico Guilherme Vargas Schirmer, pelo auxílio nos experimentos, dicas e amizade construída.

À empresa Aços Favorit Distribuidora pela doação do material.

Aos colegas da graduação pela troca de experiências, incentivo e amizade construída.

À empresa DANA pela disponibilidade de horas de trabalho e aos meus colegas de trabalho pelo incentivo, trocas de experiências e amizade.

Aos meus pais Marleci e Roberto e a toda a minha família pela educação, amor, apoio e motivação em todos os momentos da graduação.

À minha esposa Priscila e à minha filha Marina pelo amor, apoio, motivação, por compreenderem as horas de ausência em função deste trabalho e por fazerem os meus dias mais felizes.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE NA RUGOSIDADE E NA FORÇA GERADAS NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420C

Souza, Renato Teixeira de
renato.tsouza@hotmail.com

Resumo. *Visando reduzir os impactos negativos gerados pelo uso dos fluidos de corte sem reduzir a qualidade dos produtos e processos de usinagem, este estudo tem o objetivo de avaliar a influência de diferentes métodos de aplicação dos fluidos de corte, incluindo corte a seco, no torneamento do aço AISI 420C através da análise das componentes da força de usinagem e da rugosidade das superfícies usinadas. Para isto, um experimento fatorial completo foi realizado utilizando como fatores o método lubrificante em quatro níveis, corte a seco, com fluido em abundância, com Mínima quantidade de lubrificante (MQL) e com Mínima quantidade de lubrificante resfriado (MQCL), e a velocidade de corte em dois níveis (200 e 300 m.min⁻¹). Os resultados indicaram que o corte a seco, MQL ou MQCL são alternativas viáveis ao fluido em abundância, pois os parâmetros de saída foram pouco afetados pelos fatores analisados.*

Palavras-chave: *fluidos de corte, torneamento a seco, aços inoxidáveis, rugosidade, forças de usinagem.*

Abstract. *Aiming to reduce the negative issues associated to the use of cutting fluids without reducing the quality of manufactured products and productivity, this study aims to accessing the influence of different cutting fluid application techniques, including dry machining, in the turning of AISI 420C stainless steel through the analysis of the machining force components and the roughness of the machined surfaces. For this, a complete factorial experiment was performed, were the lubricooling methods were evaluated in four levels, dry cutting, flood, Minimum Quantity Lubrication (MQL) and Minimum Quantity Cooling Lubrication (MQCL), and the cutting speed in two levels (200 and 300 m.min⁻¹). The results showed low influence of the cutting fluid application technique over the response variables, thus indicating that dry cutting, MQL or MQCL are viable alternatives to flood lubrication when these response variables are considered.*

Keywords: *cutting fluids, dry turning, stainless steels, roughness, machining force.*

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis vêm ganhando cada vez mais destaque no setor industrial, constituindo uma parcela significativa dos materiais utilizados nas operações de usinagem (MACHADO et al., 2015). O AISI 420C é um aço inoxidável da classe martensítica com 12% a 14,5% de cromo, o que confere a essa liga propriedades importantes como alta resistência mecânica e boa resistência à corrosão (FAVORIT, 2019). Este material é utilizado na fabricação de hastes de válvulas e de bombas, moldes para injeção de plásticos, instrumentos cirúrgicos e dentários, lâminas de corte para a indústria alimentícia, turbinas a gás, engrenagens, eixos, cutelaria entre outras aplicações. Por isso, conhecer os parâmetros que influenciam na usinabilidade desse material é de grande importância para a melhoria da qualidade dos produtos, bem como para a redução dos custos de processo.

Em superfícies usinadas que exigem rugosidade baixa, o uso de lubrificação é indicado (DINIZ et al., 2013). Porém, o uso dos fluidos de corte aumenta os custos operacionais, exige o cumprimento de leis ambientais, e pode ser agressivo à saúde dos trabalhadores e ao meio ambiente. Essa questão justifica o estudo de métodos lubrificantes alternativos, como o corte a seco e as técnicas de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) e a Mínima Quantidade de Lubrificante Resfriado (MQCL), que pulverizam uma quantidade mínima de óleo misturada a um fluxo de ar comprimido (DINIZ et al., 2013).

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do corte a seco e de três métodos de aplicação de fluido de corte (MQL, MQCL e fluido em abundância) no torneamento do aço inoxidável AISI 420C. Serão analisadas as componentes ortogonais da força de usinagem e a rugosidade superficial.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1. Componentes da força de usinagem no torneamento

Nos processos de usinagem, identificar a magnitude das forças envolvidas no corte é de grande importância, pois elas afetam a temperatura de corte, o desgaste da ferramenta e a capacidade de obter tolerâncias mais restritas (DINIZ et al., 2013). Identificar a força de usinagem também é necessário para estimar as potências de usinagem e selecionar a máquina-ferramenta adequada para a operação (MACHADO et al., 2015).

As forças de usinagem podem ser consideradas como a ação que a peça exerce sobre a ferramenta. Segundo Machado et al. (2015), no torneamento cilindro, a força de usinagem (F_u) possui três componentes básicas (Fig. 1), são elas:

- **Força de corte (F_c):** é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte.
- **Força de avanço (F_f):** é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço.
- **Força passiva (F_p):** é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

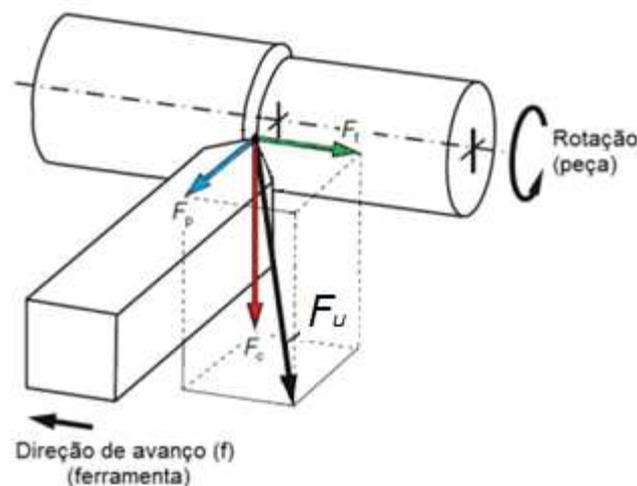


Figura 1. Força de usinagem (F_u) e suas componentes (F_c , F_f e F_p) para o processo de torneamento (adaptado de FERRARESI, 1970).

Dessa forma, conhecendo as componentes ortogonais (F_c , F_f e F_p), é possível calcular a força de usinagem de torneamento (F_u) utilizando a Eq. (1):

$$F_u = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

Segundo Machado et al. (2015), das componentes da força de usinagem, a força de corte é a que mais contribui com a potência de usinagem, e pode ser estimada através da relação linear entre a pressão específica de corte (k_s , em N/mm^2) e a área da seção de corte (A , em mm^2), conforme a Eq. (2).

$$F_c = k_s \cdot A \quad [\text{N}] \quad (2)$$

Admitindo-se que a ferramenta não possua raio de ponta (r_ϵ), a pressão específica de corte (k_s) é definida como a força necessária para a remoção de uma área de corte de 1 mm^2 . Machado et al., (2015) também mencionam que a pressão específica e as componentes da força de usinagem são afetadas por fatores como o material da peça, material e geometria da ferramenta, área da seção de corte, velocidade de corte, condição lubrificante e desgaste da ferramenta. A Figura 2 ilustra de forma qualitativa o efeito do avanço (Fig. 2a), da profundidade de corte (Fig. 2b) e da velocidade de corte (Fig. 2c) nas componentes da força de usinagem (F_c , F_f e F_p).

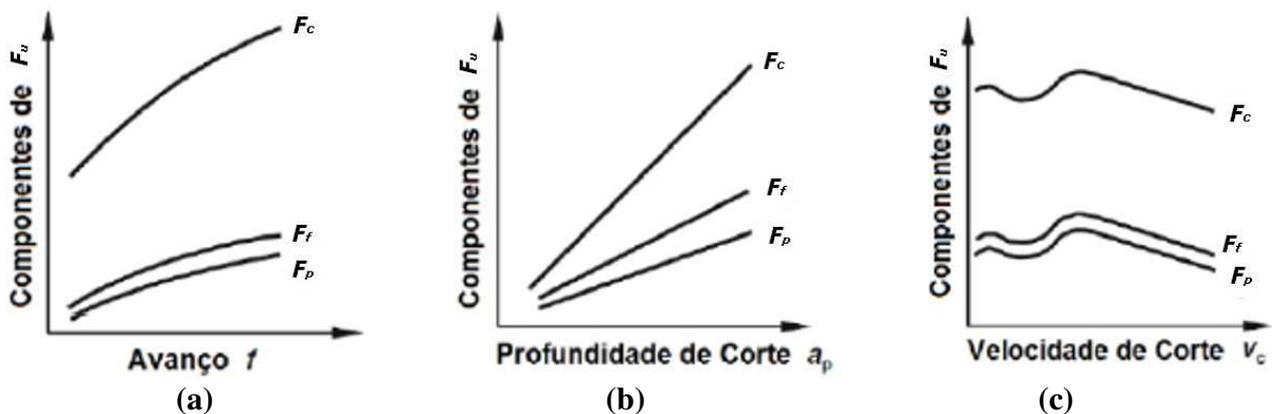


Figura 2. Comportamento das componentes da Força de usinagem em função de: (a) Avanço; (b) Profundidade de corte; (c) Velocidade de corte (adaptado de KLOCKE, 2011).

Verifica-se que o aumento das forças é diretamente proporcional a a_p e, quando f aumenta, as forças não crescem na mesma proporção, já que ocorre uma diminuição do valor de k_s . A diminuição das forças com o aumento da velocidade de corte a partir da velocidade crítica, velocidade onde não há formação de aresta postiça (APC), se dá devido à redução da resistência do material em alta temperatura (DINIZ et al., 2013).

2.2. Rugosidade e acabamento superficial

Independentemente do processo de acabamento utilizado, a superfície acabada sempre apresentará um nível de irregularidade, que depende de fatores como o material, o processo utilizado, a máquina, o tipo de ferramenta, os parâmetros de corte, entre outros (MACHADO et al., 2015). A textura de uma superfície usinada é formada basicamente por dois tipos de erros: macrogeométricos e microgeométricos (SOUZA, 2016).

Os macrogeométricos são erros de forma da superfície (ondulações, circularidade, planicidade, retinidade etc.) e devem ser evitados pois representam erros de fabricação, podem ser controlados

através de instrumentos de medição como micrômetros, perfilômetros e relógios apalpadores (SOUZA, 2016). Os microgeométricos, conhecidos como rugosidade, são formados por sulcos ou marcas da ferramenta de corte e se encontram superpostos a ondulação. A rugosidade pode ser usada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem, pois essa é uma característica tolerada, normalmente especificada no projeto e por isso deve atender à aplicação do produto (NOVALSKI, 2014; MACHADO et al., 2015).

Alguns parâmetros de rugosidade têm maior representatividade devido a sua maior aplicação na indústria, entre outros destacam-se os parâmetros R_a e R_t (Fig. 3):

O R_a (rugosidade média) é definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem e o R_t (rugosidade total) é definido como a soma da maior altura de pico e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação (l_m) (MACHADO et al., 2015).

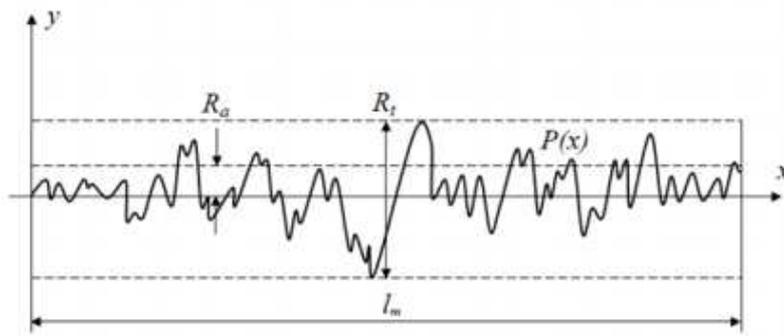


Figura 3. Parâmetros de rugosidades R_a e R_t em um perfil de superfície $P(x)$ de comprimento l_m (adaptado de NASSIF, 2012).

Segundo Machado et al. (2015), no processo de torneamento, os parâmetros de rugosidade R_a e R_t podem ser estimados através das Eq. (3) e (4) respectivamente, contudo o avanço (f) não pode ser maior que o raio de ponta da ferramenta (r_ϵ).

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_\epsilon} \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

$$R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad [\mu\text{m}] \quad (4)$$

2.3. Fluidos de corte

Grande quantidade de calor é gerada durante o corte no processo de usinagem, sendo as principais fontes a energia gerada pela deformação do cavaco (zona de cisalhamento primária) e a energia produzida pelo atrito ferramenta-peça e cavaco-ferramenta (zona de cisalhamento secundária), conforme ilustra a Fig. 4 (WALKER, 2013). Se o calor excessivo não for removido dessas interfaces poderá ocorrer desgaste prematuro da ferramenta, dilatação térmica da peça ou ainda danos à estrutura da superfície usinada (DINIZ et al., 2013). Esta remoção é feita com aplicação de fluidos de corte.

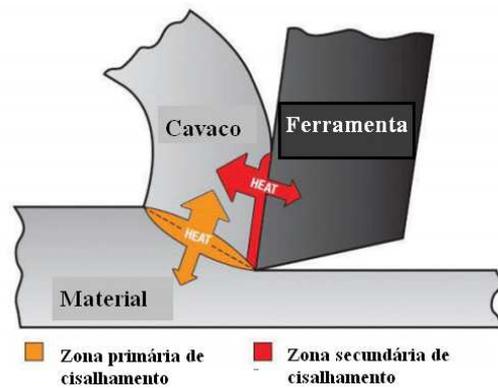


Figura 4. Zonas de geração de calor na usinagem (adaptado de WALKER, 2013).

Segundo Machado et al. (2015), as principais funções do fluido de corte são:

- Lubrificação a baixas velocidades de corte.
- Refrigeração a altas velocidades de corte.
- Remoção dos cavacos da zona de corte.
- Proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a oxidação.

Os fluidos de corte são mais usados na forma aquosa (líquida), embora também possam ser usados em forma gasosa (ar comprimido é o mais comum) ou sólida como a grafita e o bissulfeto de molibdênio. Os fluidos líquidos podem ser separados em óleos, emulsões e soluções.

Apesar do uso fluido de corte trazer benefícios de caráter funcional como o aumento da vida da ferramenta, redução dos esforços em usinagem e melhoria do acabamento superficial, o uso desses agentes gera impactos econômicos e ambientais. Os valores investidos em aquisição, preparo, uso e descarte são expressivos e podem chegar ao dobro do valor gasto em ferramentas em algumas operações (TELLES, 2018). Os fluidos de corte também são responsáveis por causar irritações alérgicas, dermatites, asma e até câncer em trabalhadores expostos ao contato direto com esses produtos. Por todas essas desvantagens, a tendência é que os fluidos de corte sejam eliminados das operações de usinagem quando possível ou utilizado em mínima quantidade de lubrificante (MQL) quando o corte a seco for extremamente custoso e gerar baixa qualidade superficial (SHOKRANI et al., 2012).

2.4. Quantidade Mínima de Lubrificante (MQL)

A Quantidade Mínima de Lubrificante (MQL) é uma alternativa ao fluido de corte em abundância convencional e também é uma alternativa para operações de usinagem nas quais a usinagem a seco não é aplicável, especialmente onde a eficiência de usinagem ou a qualidade da superfície são os fatores mais importantes. O MQL, como o próprio nome sugere, é a aplicação de uma pequena quantidade de fluido de corte misturado com fluxo ar comprimido para formar um aerossol, também chamado de método por atomização. O MQL utiliza vazões de fluido na faixa de 5 ml/h a 500 ml/h e pressões de até 10 bar (WALKER, 2013; SOUZA et al., 2016). Nessa condição, o lubrificante em forma de gotículas atinge a área de contato entre a ferramenta e o cavaco resultando em um menor coeficiente de atrito entre as duas partes, sendo após evaporado quase que totalmente (SHOKRANI et al., 2012).

Para Walker (2013), o uso do MQL, comparado ao método convencional em abundância, oferece vantagens econômicas, menores riscos à saúde dos funcionários e ao meio ambiente. A troca do fluido em abundância pelo MQL, além de manter a fábrica mais limpa, também melhora a vida útil da

ferramenta, o acabamento da superfície, aumenta o tempo médio entre falhas das máquinas com componentes eletrônicos e reduz drasticamente os custos relacionados a fluidos.

Souza et al. (2016), compararam as forças geradas no torneamento do aço AISI 420C utilizando ferramenta *wiper* e quantidade reduzida de fluido (RQL). Concluíram que a atomização do fluido de corte (vazão de 4l/h a pressão de 2kpa) propiciou uma leve redução dos valores das componentes F_c e F_f e um pequeno aumento de F_p , quando comparado com a aplicação de fluido em abundância. Para o corte a seco, os autores observaram um aumento de F_c e F_f e redução de F_p e concluíram que os menores valores da força F_u foram gerados com a aplicação de QRL devido a uma melhor penetração do lubrificante na região de corte, fator importante para a diminuição do coeficiente de atrito.

Uma variante do método MQL é o MQCL (*Minimum Quantity Cooling Lubrication*), que utiliza ar refrigerado na atomização do fluido de corte promovendo ação lubrificante e refrigerante na zona de corte. Essa combinação dos métodos tende a formar um bom sistema lubrificante e refrigerante, pois junta o bom poder de lubrificação do MQL com o resfriamento do ar refrigerado.

O autor Scandiffio (2000), em seu trabalho sobre torneamento do aço SAE 1045, concluiu que o MQL não apresentou vantagens quando comparado ao corte a seco ou com resfriamento por ar comprimido. Walker (2013) afirma que o torneamento com MQL ainda é um desafio, porque o torneamento é uma operação contínua, onde a aresta de corte fica enterrada na peça, dificultando a penetração do fluido de corte.

3. METODOLOGIA

O material utilizado nesse trabalho foi o aço inoxidável martensítico AISI 420C, na forma de barra cilíndrica recozida. A composição química do AISI 420C foi obtida no Laboratório de Fundição (LAFUM/UFRGS) através de espectroscopia óptica, com a utilização do Spectrolab – Analytical Instruments – LVFA18B, equipamento para análise de metais por meio de um sistema de leitura óptica. A Tabela 1 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 1. Composição química do aço AIS 420C

Elemento	% Fe	% Cr	% Ni	% C	% Si	% Mn	% Mo	% P	% S
Peso	86,50	12,10	0,37	0,33	0,26	0,25	0,09	0,01	0,01

Fonte: (ROSA, 2017)

O corpo de prova (CP) foi preparado previamente para os ensaios de modo que fosse possível o torneamento de oito amostras. A Figura 5 mostra as principais dimensões e o perfil do CP.

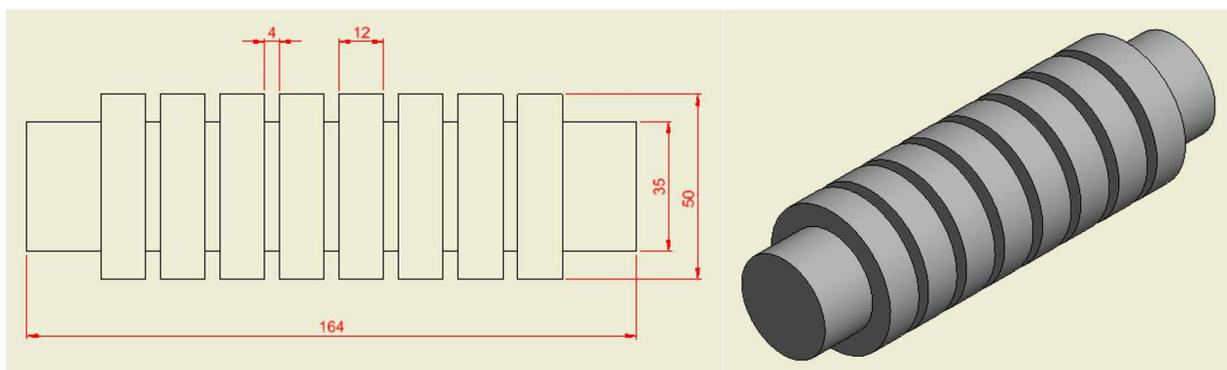


Figura 5. Principais dimensões (valores em mm) e o perfil do corpo de prova de aço AISI 420C.

O torneamento cilíndrico longitudinal das amostras foi realizado no torno CNC Mazak modelo Quik Nexus 100-II (Fig. 6a), disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS). Foram utilizados insertos de metal duro Mitsubishi classe MC6025, modelo TNMG 160404-MP, com revestimento triplo de $TiCN+Al_2O_3+(Ti \text{ composto})$ e raio de ponta (r_e) 0,4 mm (MITSUBISHI MATERIALS, 2019). Os insertos foram fixados a um suporte de ferramenta Sandvik, modelo MTJNL 2020K (Fig. 6b). Os parâmetros de cortes foram definidos dentro da faixa recomendada pelo fabricante do inserto.

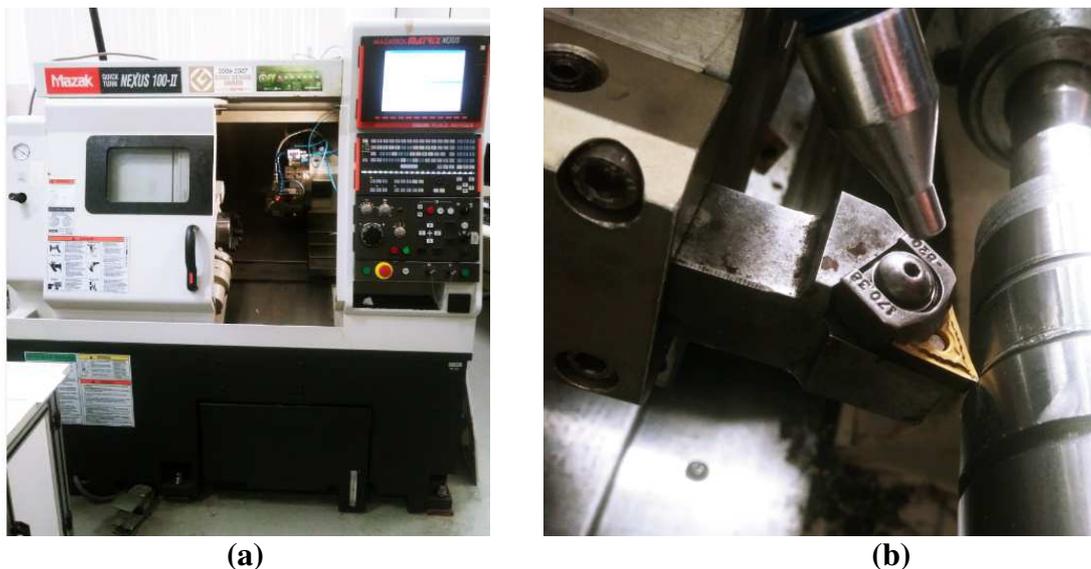


Figura 6. Máquina e inserto utilizados: (a) Torno CNC Mazak modelo Quik Nexus 100-II; (b) Inserto de metal duro TNMG 160404-MP classe MC6025 (Mitsubishi).

A fim de verificar a influência da técnica lubrificante utilizada e da velocidade de corte (v_c) na rugosidade e nas componentes das forças de usinagem, montou-se um experimento fatorial completo, com dois níveis de v_c (200 e 300 $m \cdot min^{-1}$) e quatro métodos lubrificantes (corte a seco, fluido em abundância, MQL e MQCL), resumidos na Tab. 2. A profundidade de corte (a_p) e o avanço (f) foram mantidos constantes em 1 mm e 0,15 $mm \cdot rev^{-1}$, gerando assim oito condições de corte diferentes. A ordem de torneamento das amostras foi aleatorizada para cada um dos três ensaios, totalizando vinte e quatro amostras (três repetições para cada uma das oito condições).

Tabela 2. Fatores, níveis e valores aplicados no experimento fatorial completo.

Fatores	Níveis	Valores
Lubrificação	4	Seco; Abundância; MQL; MQCL
Velocidade de Corte [$m \cdot min^{-1}$]	2	200; 300

Os ensaios realizados com aplicação de fluido de corte em abundância foram realizados com FLUID B90, do fabricante Bondmann Química, com diluição de 1:5 em água e vazão da bomba de refrigeração de aproximadamente 720 $l \cdot h^{-1}$. No torneamento das amostras com MQL e MQCL foi utilizado o fluido de corte sintético Quimatic Jet com o nebulizador IV Tapmatic. A vazão utilizada foi de 240 $ml \cdot h^{-1}$ e a pressão manométrica de 3 bar. A saída do fluido foi direcionada para a ponta da ferramenta, posicionada a uma distância de 25 mm e inclinada a 45° conforme representado na Fig. 7a. Na aplicação da técnica MQCL foi utilizado um tubo de vórtice Eurotools (Fig. 7b), o que fez baixar a temperatura do ar na entrada no nebulizador para 11° C.

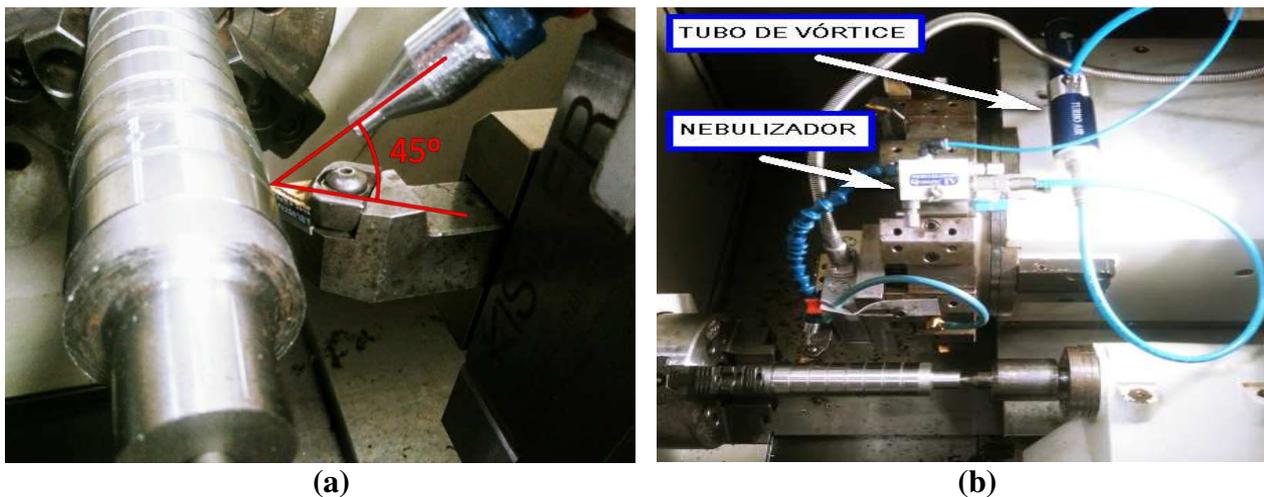


Figura 7. (a) Ângulo de aplicação do fluido com MQL e MQCL, (b) Configuração do sistema MQCL.

Para fazer a aquisição das componentes ortogonais da força de usinagem foi utilizado um sistema composto por um dinamômetro piezelétrico modelo Kistler 9129AA, onde a ferramenta é acoplada, um condicionador de sinais Kistler modelo 5070A10100, um microcomputador com placa de aquisição de dados e o software LabVIEW™ 9.0. Foi utilizada a taxa de aquisição de 1000 Hz. A Figura 8 representa a configuração do sistema de aquisição de sinais das forças.

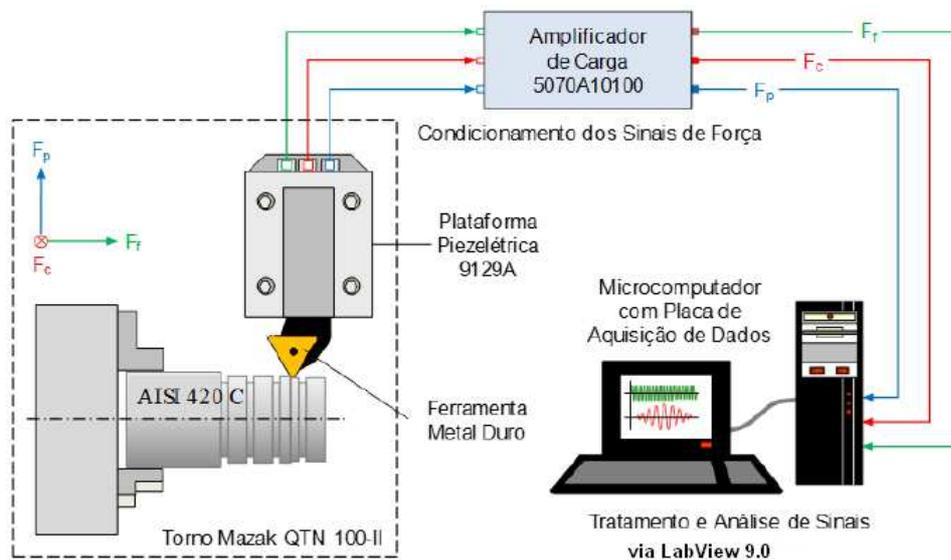


Figura 8. Estrutura experimental para aquisição de forças do LAUS/UFRGS (adaptado de Rosa, 2017).

Com o rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201 (resolução de $0,01 \mu\text{m}$) disponível no LATRIB-UFRGS foram medidas as rugosidades (R_a e R_t). Cada amostra foi medida em três pontos diferentes (0° , 120° e 240°). Foi utilizado o comprimento de amostragem $l_e = 0,8 \text{ mm}$ e comprimento de avaliação $l_m = 4 \text{ mm}$ (5 vezes l_e), conforme indicados pela norma NBR ISO 4288 (2008), para valores de rugosidade R_a de $0,1$ até $2 \mu\text{m}$.

4. RESULTADOS

4.1. Componentes da força de usinagem

Os valores médios das forças de usinagem (F_u) e das componentes ortogonais (F_p , F_c e F_f) foram calculados e são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3. Valores médios das forças de usinagem (F_u) e componentes ortogonais (F_p , F_c e F_f).

Amostra	v_c [m·min ⁻¹]	Método	F_p [N]	F_c [N]	F_f [N]	F_u [N]
#1	200	Seco	105	381	218	451
#2	200	Abundância	105	385	220	455
#3	200	MQL	104	385	217	454
#4	200	MQCL	106	381	218	452
#5	300	Seco	101	366	201	429
#6	300	Abundância	103	375	204	439
#7	300	MQL	106	372	207	438
#8	300	MQCL	101	375	201	437

Os valores dos componentes ortogonais (F_p , F_c e F_f) da Tab. 4 são apresentados na Fig. 9 em forma de gráfico de barras agrupadas.

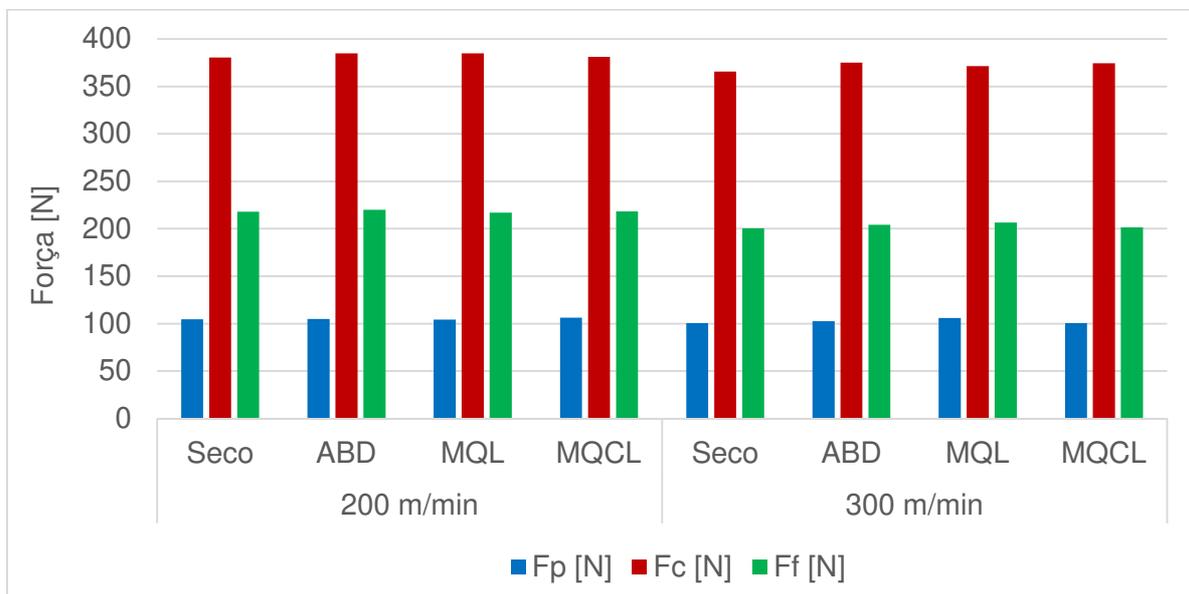


Figura 9. Componentes ortogonais das forças de usinagem.

Na análise inicial das componentes ortogonais das forças verifica-se que a magnitude da força de corte (F_c) é a maior em todas as amostras, seguida pela força de avanço (F_f) e pela força passiva (F_p). A maior magnitude de F_f em relação a F_p se deve a uma maior influência da aresta lateral de corte provocada pela relação $a_p/f > 5$ e pelo grande ângulo de posição da ferramenta ($\chi_r = 93^\circ$) (FERRARESI, 1970; KLOCKE, 2011). Para facilitar o entendimento, as forças de usinagem (F_u) e suas componentes (F_p , F_c e F_f) foram analisadas separadamente, a fim de verificar a influência do método de aplicação do fluido de corte e da velocidade de corte (v_c) em seus comportamentos. Todos

os resultados foram analisados através de uma análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

A Figura 8 apresenta um gráfico de dois fatores para a força de corte (F_c) em função da velocidade de corte para os diferentes métodos lubrificadorrefrigerantes avaliados. A análise de variância dos resultados de força de corte não indicou influência significativa dos parâmetros avaliados. A comparação múltipla de médias também não apresentou diferença superior a três desvios padrão (nível de confiança igual a 99,7%).

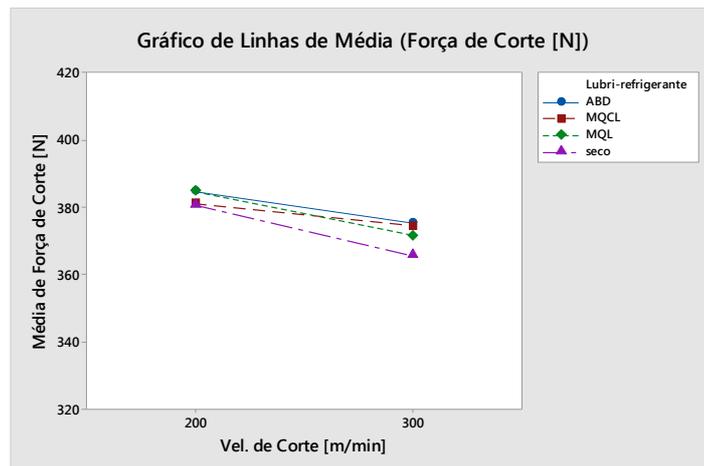


Figura 8. Força de corte (F_c) em função da velocidade de corte (v_c), para os diferentes métodos de aplicação dos fluidos de corte.

A Figura 9 apresenta um gráfico de dois fatores para a força de avanço (F_f) em função da velocidade de corte para os diferentes métodos lubrificadorrefrigerantes avaliados. Foi identificada, através da ANOVA, influência significativa da velocidade de corte sobre a força de avanço, com redução média de 7% (15 N) de F_f associada ao aumento de v_c ; a ANOVA porém não indicou influência significativa dos métodos de aplicação do fluido de corte sobre F_f .

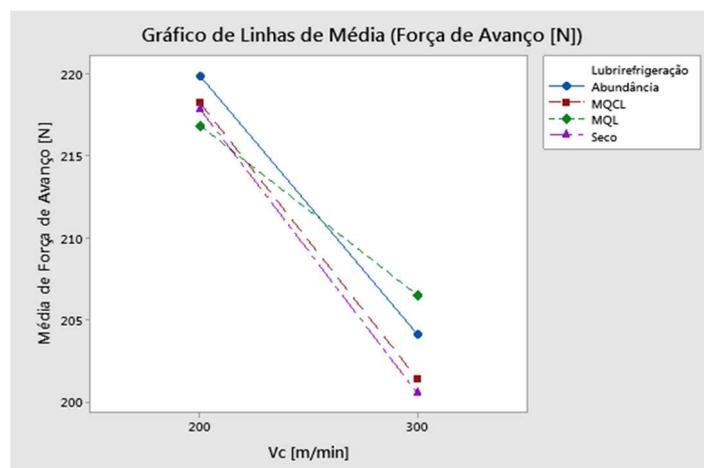


Figura 9. Força de avanço (F_f) em função da velocidade de corte (v_c), para os diferentes métodos de aplicação dos fluidos de corte.

A Figura 10 apresenta um gráfico de dois fatores onde os valores médios das forças passivas (F_p) estão em função da velocidade de corte para os diferentes métodos lubrificadorrefrigerantes avaliados. A

ANOVA indica influência significativa da velocidade de corte sobre a força passiva. No entanto, a comparação múltipla de médias só apresentou diferenças superiores a três desvios padrão para os resultados de MQCL, onde o aumento da velocidade de corte para $300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ reduziu a F_p em 4,7%. Um leve aumento de F_p ocorreu na velocidade de corte mais elevada para os resultados obtidos com MQL; para as demais condições, uma leve queda é observada, ainda assim inferior a três desvios padrão. A comparação múltipla de médias realizada para a velocidade de corte mais elevada mostrou diferenças significativas entre F_p medida nos testes com MQL e as demais condições, com exceção da aplicação em abundância.

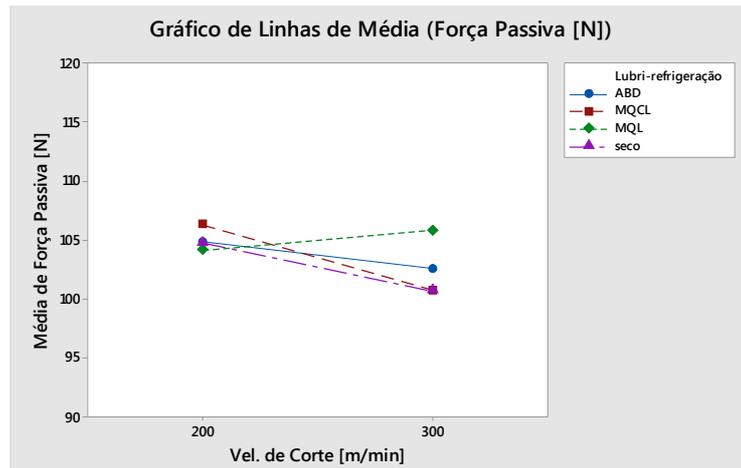


Figura 10. Força de passiva (F_p) em função da velocidade de corte (v_c), para os diferentes métodos de aplicação dos fluidos de corte.

Para a força de usinagem (Fig. 11) não foi identificada nenhuma influência significativa para um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). No entanto, para 10% ($\alpha = 0,10$), a análise de variância mostra influência significativa da velocidade de corte sobre F_u . Para os diferentes métodos de aplicação do fluido de corte, o aumento de v_c resultou em uma redução média de 3,8% (17 N) de F_u . Essa redução é uma consequência da redução de F_f com o aumento de v_c .

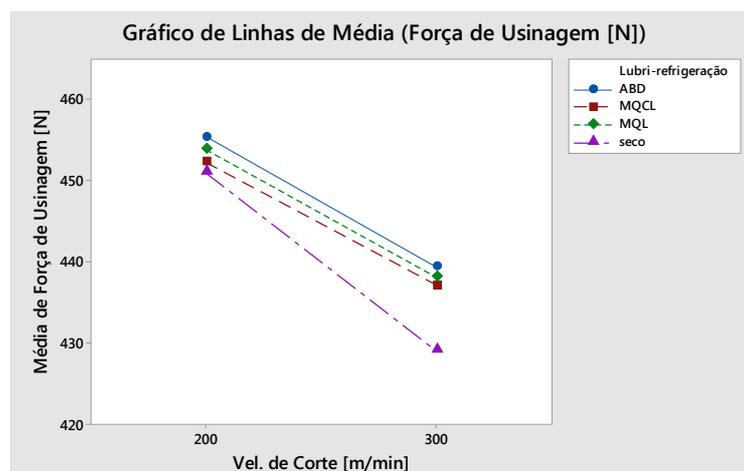


Figura 11. Força de usinagem (F_u) em função da velocidade de corte (v_c), para os diferentes métodos de aplicação dos fluidos de corte.

4.1. Rugosidade

Os valores médios das rugosidades para cada uma das oito condições foram calculados e os resultados de R_a e R_t são apresentados na Tab. 4. Analisando a magnitude das rugosidades verifica-se que os valores estão relativamente próximos aos estimados através das Equações 1 e 2 ($R_a = 1,80 \mu\text{m}$ e $R_t = 7,03 \mu\text{m}$).

Tabela 4. Valores médios das rugosidades (R_a e R_t) das oito condições analisadas.

Amostra	Método	v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	R_a [μm]	R_t [μm]
#1	Seco	200	1,87	8,13
#2	Abundância	200	1,86	8,30
#3	MQL	200	1,81	7,50
#4	MQCL	200	1,87	7,85
#5	Seco	300	1,76	7,93
#6	Abundância	300	1,85	7,95
#7	MQL	300	1,91	10,02
#8	MQCL	300	1,81	7,60

A Figura 12 apresenta um gráfico de dois fatores para a rugosidade (R_a) em função da velocidade de corte (v_c) para os diferentes métodos lubrificadorantes avaliados. Através da ANOVA verificou-se a influência significativa de todas as fontes avaliadas, inclusive da interação entre a velocidade de corte e o método lubrificadorante usado; sendo assim, o aumento de v_c modifica a declividade das curvas, desde uma mais negativa para o corte a seco até uma positiva para o corte com MQL. O melhor acabamento encontrado com v_c de $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ foi para o uso do MQL ($R_a = 1,81 \mu\text{m}$) que se destacou em relação aos demais métodos de lubrificadorantes. Porém o pior acabamento com v_c de $300 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ($R_a = 1,91 \mu\text{m}$) também foi verificado com o uso do MQL. Um possível motivo para esse aumento da rugosidade é o fato de que a amostra #7 (MQL e $v_c = 300 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$) foi a primeira, mais próxima do contraponto, o que propicia maiores vibrações. Esse efeito poderia ter sido amenizado se fossem realizadas mais repetições, porém os resultados das demais repetições foram descartados pois foi identificada uma falha no rugosímetro e o resultados eram incondizentes com o processo.

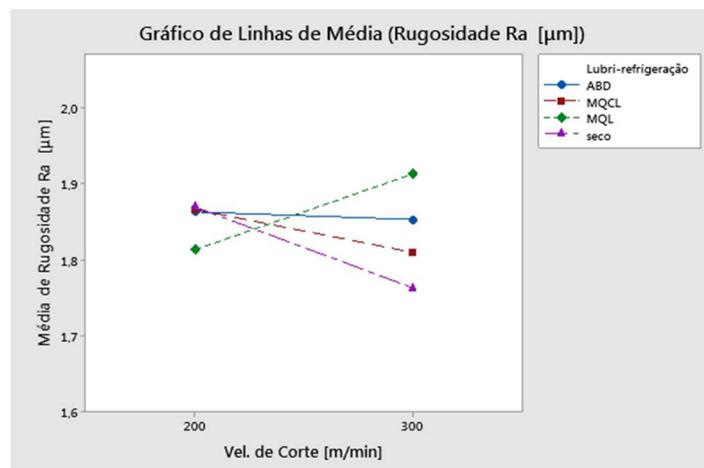


Figura 12. Rugosidade média (R_a) em função da velocidade de corte (v_c), para os diferentes métodos de aplicação dos fluidos de corte.

O comportamento da rugosidade total (R_t) foi similar ao de R_a para o uso do MQL (Fig. 13), apresentando a melhor rugosidade ($R_t = 7,5 \mu\text{m}$) em na baixa v_c e o pior acabamento ($R_t = 10,02 \mu\text{m}$) com o aumento de v_c . Ainda na alta v_c , o MQCL foi o método lubrificador que apresentou o menor nível de rugosidade ($R_t = 7,6 \mu\text{m}$).

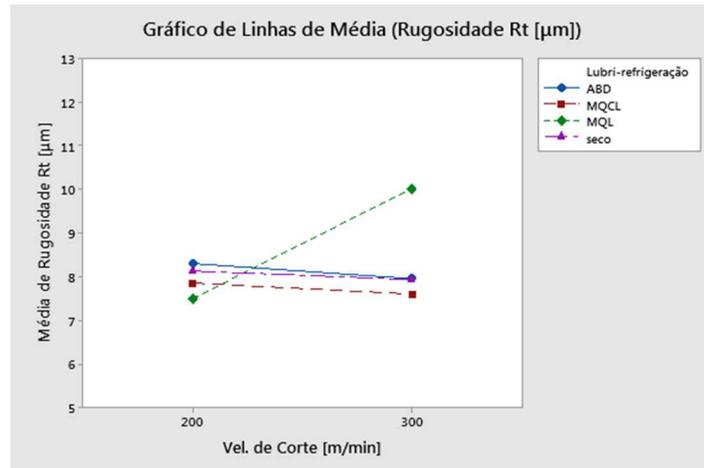


Figura 13. Rugosidade total (R_t) em função da velocidade de corte (v_c), para os diferentes métodos de aplicação dos fluidos de corte.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que, para os parâmetros testados, as componentes da força de usinagem e a rugosidade geradas no torneamento do aço AISI 420C com inserto de metal duro são pouco afetadas pela velocidade de corte e pelo método de aplicação do fluido de corte.

Na comparação dos diferentes métodos lubrificantes, verificou-se que o corte a seco não gerou maior força de corte (F_c) nem maior força de usinagem (F_u) que os cortes com aplicação de MQL, MQCL ou fluido em abundância.

O aumento da velocidade de corte de 200 para 300 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ influenciou na redução das forças de avanço (F_f) e de usinagem (F_u), sendo o corte a seco o mais influenciado pelo aumento de v_c . O aumento da velocidade de corte também influenciou na redução da força passiva (F_p), mas somente com MQCL.

A rugosidade teve seu comportamento influenciado pelos fatores testados, sendo que o uso de MQL propiciou a melhor rugosidade R_a na velocidade de corte mais baixa e as maiores rugosidades R_a e R_t na v_c mais elevada. O menor valor de R_a foi obtido com corte a seco em alta v_c .

Tendo em vista os custos e os problemas gerados com uso dos fluidos de corte, o corte a seco nas condições testadas é o mais recomendado quando o objetivo é a redução de custos, danos à saúde do operador e passivo ambiental sem aumento dos esforços ou piora do acabamento superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DINIZ, A. E.; MARCONDES, C. F.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.

FAVORIT. **Catálogo técnico Favorit aços especiais**. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br/sites/default/files/catalogo-favorit-abril-2019.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2019.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo, Blücher, 1970.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Londres, Editora Springer, p. 517, 2011.

- MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Blücher, São Paulo, 3 edição, 2015.
- MITSUBISHI MATERIALS. **Metal duro com cobertura (CVD)**. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/6115/1859/5067/tec_turning_diacoat_cvd_pt-br.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2019.
- NASSIF, F. DE B. **Análise das forças resultantes da aplicação de ferramentas de corte alisadora (wiper) e convencional (standard) no torneamento de acabamento do aço inoxidável AISI 420F**. 2012. 21 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- NBR ISO 4288. **Especificações geométricas de produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2014.
- ROSA, G. C. DA. **Estudo da usinabilidade no torneamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 420C endurecido com ferramenta de metal duro**. Porto Alegre, 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PROMEC-UFRGS, 2017. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/165625>>
- SCANDIFFIO, I. **Uma contribuição ao estudo do corte a seco e ao corte com mínima quantidade de lubrificante em torneamento de aço**. p. 78, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2000.
- SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 57, p. 83–101, 2012.
- SOUZA, A. J. **Processos de fabricação por usinagem**. Apostila do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 123–130, 2016.
- SOUZA, A. J. DE; RODRIGUES, R. I.; ROSA, G. C. DA. Verificação das forças geradas no torneamento com fluido em abundância, em quantidade reduzida e a seco do aço inoxidável AISI 420C utilizando Ferramenta Wiper. **Anais do IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2016.
- TELLES, F. **Avaliação da rugosidade no torneamento de acabamento em Titânio comercialmente puro grau 4 sob uma perspectiva de usinagem ambientalmente amigável**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PROMEC-UFRGS, 2018.
- WALKER, T. **The MQL handbook: A guide to machining with Minimum Quantity Lubrication**. Unist Guide, p. 64, 2013.

NOMENCLATURA

A	Área da seção de corte	[mm ²]
a_p	Profundidade de corte	[mm]
F	Avanço por revolução	[mm rev ⁻¹]
F_f	Força de avanço	[N]
F_c	Força de corte	[N]
F_p	Força passiva	[N]
F_u	Força de usinagem	[N]
k_s	Pressão específica de corte	[N mm ⁻²]
l_e	Comprimento de amostra	[mm]
l_m	Comprimento de medição	[mm]
r_ϵ	Raio de ponta	[mm]
R_a	Rugosidade média	[µm]

R_t	Rugosidade total	[μm]
v_c	Velocidade de corte	[m min^{-1}]

Abreviaturas e acrônimos

ABD	Fluido em Abundância
AISI	American Iron and Steel Institute
ISO	International Organization for Standardization
MQCL	Minimum Quantity Cooling Lubrication
ML	Minimum Quantity Lubrication