

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

INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE MQCL SOBRE A VIDA DA FERRAMENTA DURANTE
O TORNEAMENTO DO HASTELLOY C-276

por

Wilson Trindade Urasato

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.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Urasato, Wilson Trindade
Influência da aplicação de MQL sobre a vida da
ferramenta durante o torneamento do Hastelloy C-276 /
Wilson Trindade Urasato. -- 2019.
16 f.
Orientador: André João de Souza.

Coorientador: Tiago Borba Oschelski.

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. Hastelloy C-276. 2. MQL. 3. Vida de ferramenta
. 4. Rugosidade. I. de Souza, André João, orient. II.
Oschelski, Tiago Borba, coorient. III. Título.

Wilson Trindade Urasato

INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE MQCL SOBRE A VIDA DA FERRAMENTA DURANTE
O TORNEAMENTO DO HASTELLOY C-276

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

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

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: Tiago Borba Oschelski

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Heraldo José de Amorim

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 19 de dezembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico todo o esforço que depus neste trabalho ao meu avô, Wilson (in memoriam), que foi um exemplo de caráter e dignidade

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

**INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE MQCL SOBRE A VIDA DA
FERRAMENTA DURANTE O TORNEAMENTO DO HASTELLOY C-276**

Wilson Trindade Urasato
wilsonurasato@icloud.com

Resumo. *Propriedades mecânicas e térmicas, combinadas com resistência à fadiga e boa resistência à corrosão, tornam o Hastelloy C-276 um dos materiais mais utilizados nas indústrias nucleares, aeroespaciais, químicas e petroquímicas, e em situações que exigem elevadas temperaturas. Isso faz com que este material seja difícil de usinar, exigindo estudos mais aprofundados. Devido à crescente tendência da usinagem ambientalmente amigável, eliminando ou reduzindo danos ao operador e ao meio ambiente consequentes do uso de fluidos de corte, técnicas alternativas vêm sendo empregadas, porém pouco exploradas no Hastelloy C-276. Assim, propôs-se investigar o efeito da aplicação de mínima quantidade de lubrificante refrigerado (MQCL) – em comparação ao método convencional e ao corte a seco – na vida da ferramenta de metal-duro com revestimento PVD durante o torneamento de acabamento do Hastelloy C-276 para dois níveis de velocidade de corte (80 e 120 m/min), mantendo constantes o avanço (0,1 mm/rev.) e a profundidade de corte (0,15 mm). Avaliou-se também o comportamento da rugosidade média (R_a) ao longo da vida da ferramenta. Concluiu-se que os maiores tempos de vida foram obtidos no corte a seco (7,12 e 4,35 min), e os menores valores de R_a foram gerados com MQCL (0,617 e 0,505 μm).*

Palavras-chave: *Hastelloy C-276, MQCL, vida da ferramenta, rugosidade média.*

Abstract. *Mechanical and thermal properties, combined with fatigue strength and excellent corrosion resistance, make Hastelloy C-276 one of the most widely used materials in the nuclear, aerospace, chemical and petrochemical industries, and for situations that requiring high temperatures. These properties make this material difficult to machine, which requires further study. Due to the growing trend of environmentally friendly machining, eliminating or reducing damage to the operator and the environment occasioning from the use of cutting fluids, alternative techniques have been employed but little explored in the Hastelloy C-276 machining. Thus, it was proposed to investigate the effect of the minimum quantity cooling lubrication (MQCL) – compared to wet and dry cutting – on the PVD-coated carbide tool life during the finishing turning of Hastelloy C-276 with two levels of cutting speed (80 and 120 m/min), keeping fixed the feed rate (0.1 mm/rev.) and depth of cut (0.15 mm). The average roughness (R_a) behavior throughout the tool life was also evaluated. It was concluded that the longest tool life was obtained with dry cutting (7.12 and 4.35 min), and the lowest R_a values were generated with MQCL cutting (0.617 and 0.505 μm).*

Keywords: *Hastelloy C-276, MQCL, tool life, average roughness.*

1. INTRODUÇÃO

A combinação de resistência a elevadas temperaturas e a ambientes corrosivos, além da resistência à fadiga, tornam o Hastelloy C-276 uma opção apropriada na aplicação em indústrias nucleares, aeroespaciais, químicas e petroquímicas, e em situações que exigem temperaturas elevadas. Devido às propriedades apresentadas, consequentemente, o Hastelloy C-276 é considerado um material difícil de usinar, exigindo estudos mais aprofundados em relação às técnicas empregadas (Xu *et al.*, 2015).

A grande procura das indústrias aeroespaciais e de energia, aliada à preocupação com a precisão dimensional e o acabamento superficial (utilizados como índice de qualidade de produto, parâmetro de avaliação de produtividade e, na maioria dos casos, um requisito técnico para produtos mecânicos), gerou a necessidade de modos economicamente viáveis para fabricar componentes destas ligas (Benardos e Vosniakos, 2003; Debnath *et al.*, 2014). Neste cenário, há um comprometimento cada vez maior em relação à textura e integridade da peça devido à necessidade de redução de custos e tempos sem perda de qualidade do produto. Por isso, pesquisas tendem a buscar meios que gerem a superfície técnica desejada no menor tempo possível, sem a necessidade de operações posteriores (Izquierdo *et al.*, 2013).

Além disso, a questão ambiental relacionada à utilização de fluidos de corte deve ser levada em consideração. O estudo de estratégias de lubrificação mais eficientes e mais limpas (usinagem ambientalmente amigável) está se tornando necessário à medida que as regulamentações sobre contaminação ambiental e poluição tornam-se cada vez mais rigorosas (Sartori *et al.*, 2018). Posto isso, destacam-se as aplicações de quantidades de lubrificante reduzida (RQL) e mínima (MQL), e o corte a seco (Diniz *et al.*, 2013; Santos e Sales, 2007).

O corte a seco (DRY) é considerado a principal abordagem, resultando em uma redução de custos e eliminação dos problemas causados pela utilização de fluido em abundância (WET). Entretanto, devido a maior geração de calor, a utilização do corte a seco pode gerar excessivo desgaste da ferramenta de corte e baixa qualidade da superfície usinada. A utilização de MQL ou RQL pode ser uma alternativa ao DRY, possuindo boa capacidade lubrificante. Entretanto, tal técnica não possui boa capacidade refrigerante, além de gerar uma névoa de óleo que pode ser prejudicial à saúde do operador (Shokrani *et al.*, 2012). Com o objetivo de compensar a baixa capacidade de refrigeração das técnicas RQL e MQL, a aplicação da técnica de mínima quantidade de fluido refrigerado (MQCL – *minimum quantity cooling lubrication*) tem sido utilizada na usinagem de materiais de difícil corte, combinando as vantagens do MQL e do ar comprimido refrigerado.

Os resultados de Zhang *et al.* (2012), quando avaliada a influência do MQCL no fresamento do Inconel 718, foram superiores à utilização de DRY, com a diminuição dos valores das forças de corte e o aumento da vida da ferramenta. Pervaiz *et al.* (2017), no torneamento do Ti-6Al-4V também obteve resultados vantajosos, comparando-se a utilização de MQCL com o WET e o DRY. Os valores de rugosidade, forças de usinagem e desgaste da ferramenta foram reduzidos devido ao melhor efeito de resfriamento e lubrificação.

Dhananchezian (2019), avaliou comparativamente a utilização de nitrogênio líquido (LN₂) e o DRY no torneamento da superliga Hastelloy C-276 utilizando ferramenta de metal-duro com revestimento PVD/TiAlN. Constatou que a utilização da criogenia resultou em menores valores de força, de rugosidade e da taxa de desgaste da ferramenta.

Sendo assim, o estudo da usinagem de superligas tem contribuído no aprimoramento das técnicas de processamento, bem como no desenvolvimento de novas ferramentas de corte. Assim, propõe-se um estudo do efeito da aplicação de MQCL – em comparação ao WET e ao DRY – na vida da ferramenta de metal-duro com grãos ultrafinos (< 0,5 µm) e revestimento PVD/TiAlN (HiPIMS) durante o torneamento de acabamento da superliga Hastelloy C-276.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1. Superliga Hastelloy C-276

Hastelloy C-276 é uma superliga à base de níquel (Ni) com grande quantidade de cromo (Cr) e molibdênio (Mo). Como as demais superligas, este material é dúctil, de boa soldabilidade, resistente a altas temperaturas, além de possuir excelente resistência a corrosão. Tais propriedades são obtidas principalmente por endurecimento, solução sólida e precipitação de carbonetos (Haynes, 2019; Silva e Mei, 2006). De acordo com Pollock e Tin (2006) e Zhu *et al.* (2013), as superligas à base de Ni são definidas como uma classe incomum de metais cuja combinação de suas propriedades mecânicas e

térmicas, aliadas com as suas resistências à corrosão e à fadiga, resultam em sua utilização nas indústrias nucleares, aeroespaciais, químicas e petroquímicas.

Entretanto, algumas características do Hastelloy C-276 dificultam a sua usinagem, como baixa condutividade térmica, afinidade química com materiais de ferramenta, resistência à deformação plástica em elevadas temperaturas, rápido endurecimento do material durante o corte e formação de rebarbas na peça (o que dificulta a sua manipulação) (Xu *et al.*, 2015).

2.2. Ferramenta de Metal-Duro

Metal-duro é um produto da metalurgia do pó composto por carboneto de tungstênio (WC) combinado com um metal aglomerante, geralmente o cobalto (Co). WC só, ou associado a outros carbonetos, confere a dureza em temperatura ambiente e a quente e resistência ao desgaste, enquanto o Co, responsável por aglomerar as partículas duras dos carbonetos, é o responsável pela tenacidade (Diniz *et al.*, 2013; Ferraresi, 1977). Um dos parâmetros mais importantes para o ajuste de dureza/tenacidade da ferramenta é o tamanho de grão dos carbonetos. Um grão mais refinado confere maior dureza e resistência ao desgaste a ferramenta, enquanto um grão menos refinado confere maior tenacidade a esta (Walter Tools, 2018; Santos e Sales, 2007).

As ferramentas de metal-duro revestidas apresentam desempenho superior em relação às não-revestidas devido ao aumento da resistência ao desgaste da camada diretamente em contato com o cavaco e a peça (Santos e Sales, 2007). Isto propicia tenacidade e dureza a quente no mesmo material (Diniz *et al.*, 2013; Santos e Sales, 2007). Os revestimentos podem ser do tipo CVD (deposição química de vapor) ou PVD (deposição física a vapor). O processo CVD, por necessitar de altas temperaturas, gera tensões de tração na aresta de corte da ferramenta durante seu resfriamento, reduzindo sua tenacidade, ao passo que o processo PVD garante a mesma tenacidade do substrato além de resultar em tensões compressivas que retardam a formação e propagação de trincas (Diniz *et al.*, 2013; Machado *et al.*, 2015).

Kadrigama *et al.* (2011), exploraram os mecanismos de desgaste para ferramentas de metal-duro, com revestimentos PVD e CVD, no torneamento da superliga Hastelloy C-22HS. Foi definido como critério de fim de vida $VB = 0,3$ mm. Foi constatado que para todos os tipos de ferramenta utilizados, os desgastes predominantes foram desgaste de flanco e entalhe, lascamentos, deformação plástica na aresta de corte além de quebra da ponta da ferramenta. Ademais, para os parâmetros utilizados, as ferramentas PVD obtiveram melhor performance do que as CVD.

2.3. Desgastes da Ferramenta de Corte

Durante sua operação, a ferramenta de corte está sujeita a dois tipos de fenômenos que resultam em perda de material e por consequência, a necessidade de substituição desta: avarias e desgastes. Por maiores que sejam a resistência ao desgaste e a dureza da ferramenta, sempre haverá desgaste durante a usinagem, sendo este fenômeno definido como a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte. Portanto, a compreensão do processo de desgaste é muito importante pois possibilita ações preventivas que resultem no prolongamento de sua vida útil (Diniz *et al.*, 2013; Machado *et al.*, 2015). A Figura 1 sumariza as causas, mecanismos, tipos e consequências dos desgastes.

O desgaste de flanco (VB) é o tipo mais comum e sempre ocorre nos processos de usinagem além disso, é um dos critérios mais utilizados para o fim de vida de ferramenta. Ocorre na superfície de folga da ferramenta (principal, lateral e ponta) devido ao contato entre a ferramenta e a peça usinada, resultando em aumento do atrito nesta interface (ferramenta/peça) (Diniz *et al.*, 2013). De acordo com Machado *et al.* (2015), a velocidade de corte é o parâmetro mais influente no desgaste da ferramenta, uma vez que quando aumentada, gera o aumento da temperatura na região de formação de cavacos, acelerando os mecanismos de desgaste.

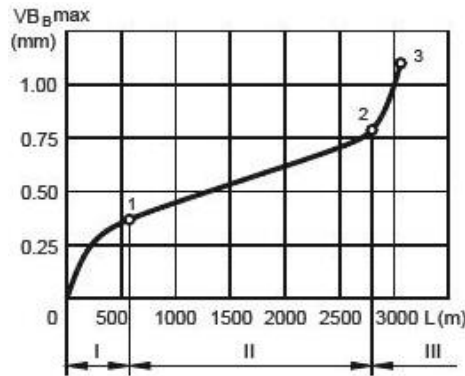


Figura 2 – Comportamento do desgaste VB_{max} em função do comprimento usinado (Astakhov, 2008).

2.4. Vida da Ferramenta

A vida da ferramenta de corte corresponde ao tempo que a ferramenta corta satisfatoriamente entre afiações e/ou trocas, sendo expressa em minutos. Sendo assim, é considerado um parâmetro importante na usinagem pelo fato de ser considerável a perda de tempo com afiação ou troca da ferramenta. Por sua facilidade de ser medido quantitativamente, a largura da marca de desgaste de flanco (VB) em um valor previamente estabelecido é um dos critérios de fim de vida mais utilizados, já que influencia as forças, a rugosidade e a precisão dimensional (Astakhov, 2008).

A partir do desgaste de flanco, Taylor deduziu a Eq. (1).

$$T = K \cdot v_c^{-x} \quad (1)$$

onde v_c [m/min] é a velocidade de corte, T [min] é o tempo de vida da ferramenta até atingir um valor predeterminado de VB , K e x são constantes do material para determinadas condições de usinagem (combinação ferramenta/material/parâmetros de corte).

Como os materiais da ferramenta/peça e os demais parâmetros de usinagem afetam os valores de K e x , deve-se geralmente construir gráficos auxiliares (Fig. 3) que forneçam os desgastes da ferramenta para diferentes velocidades de corte (Astakhov, 2008; Diniz *et al.*, 2013).

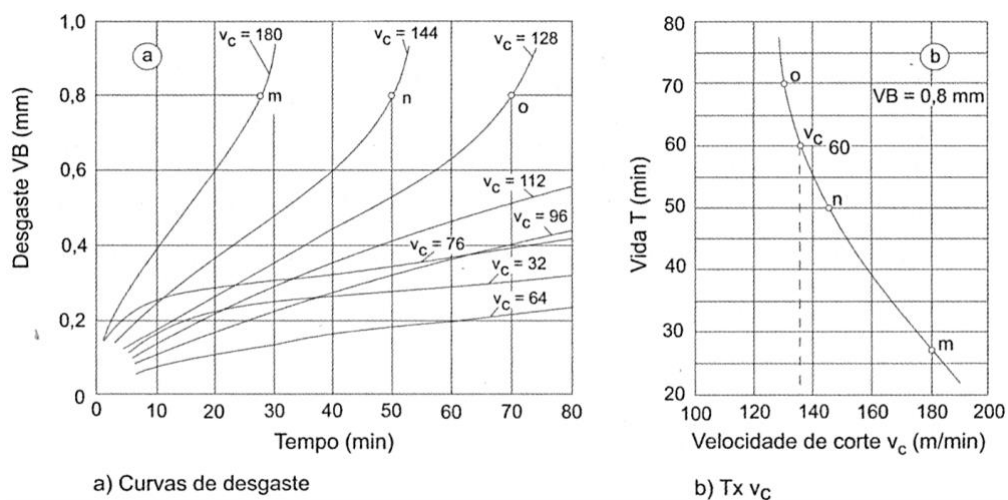


Figura 3 – Determinação da curva de vida da ferramenta: (a) curvas de desgaste em função do tempo de usinagem, para diferentes velocidades de corte; (b) curva de vida da ferramenta para $VB = 0,8$ mm (adaptado de Ferraresi, 1977).

2.5. Acabamento da Superfície Usinada

O estudo do acabamento da superfície usinada torna-se importante nos casos em que se exige uma precisão no ajuste entre peças unidas e naqueles em que precisões dimensional e de forma não são satisfatórias para garantir a funcionalidade do conjunto. O acabamento, comumente representado pela rugosidade e especificado em projetos mecânicos, consiste em um conjunto de irregularidades que tendem a criar um padrão, ou seja, uma textura em uma dada superfície. Tais irregularidades estão presentes em todas as superfícies reais, por mais perfeitas que aparentem ser e, na maioria das vezes, ocorrem devido ao próprio processo de geração (Machado *et al.*, 2015; Santos e Sales, 2007).

São considerados parâmetros de rugosidade os procedimentos adotados para avaliar a textura da superfície de um componente usinado. O valor de um parâmetro geralmente é definido para que o produto possa atender aos requisitos de resistência à fadiga e à corrosão, além de precisão dimensional, e padrões estéticos e tribológicos (Revankar *et al.*, 2014).

Dentre os principais parâmetros de avaliação de acabamento, a rugosidade média (ou desvio aritmético médio) é o mais utilizado para o controle da usinagem, uma vez que alterações no seu valor representam alterações no processo (p. ex. desgaste da ferramenta) e por se tratar de um parâmetro estável (isto é, não suscetível a efeitos ocasionais). Além disso, está disponível em praticamente todos os instrumentos de medição de rugosidade. Entretanto, R_a , isoladamente, não é suficiente para identificar algumas características importantes da superfície (Machado *et al.*, 2015; Petropoulos *et al.*, 2006). O valor teórico de R_a em torneamento pode ser calculado com a Eq. (2), onde r_ϵ é o raio de ponta do inserto e f é o avanço (Diniz *et al.*, 2013; Machado *et al.*, 2015).

$$R_a = \frac{1000 \cdot f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_\epsilon} = 32,075 \left(\frac{f^2}{r_\epsilon} \right) \quad (2)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 apresenta a composição química do material, medida pelo método de espectrometria de fluorescência de Raios-X no analisador Thermo Scientific®Niton® XL3t, disponível no Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais (LACOR/UFRGS). Os valores medidos foram comparados com os nominais (Haynes, 2019). A composição química é estabelecida em maior proporção por níquel (Ni), cromo (Cr), molibdênio (Mo), ferro (Fe) e tungstênio (W).

Tabela 1 – Composição química da superliga Hastelloy C-276 (% massa).

	Ni	Cr	Mo	Fe	W	Co	Mn	V	Si	C	Nb	Ti
Medido	57,6	16,3	15,5	6,01	3,82	0,18	0,40	0,02	0,04	0,006	0,070	0,031
Nominal	57	16	16	5,0	4,0	2,5	< 1,0	< 0,35	< 0,08	< 0,01	---	---

O procedimento experimental consistiu na realização do torneamento longitudinal externo do corpo de prova da superliga Hastelloy C-276, no torno CNC Mazak Quick Turn Nexus 100-II (Fig. 4), disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS/UFRGS), para três diferentes meios lubrificantes: corte a seco (DRY), com fluido de corte em abundância (WET) e em mínima quantidade de lubrificante refrigerado (MQCL). Foram realizados dois ensaios de vida para cada condição lubrificante utilizando a velocidade de corte em dois níveis ($v_c = 80$ e 120 m/min), totalizando seis ensaios. Os valores de avanço (f) e profundidade de corte (a_p) foram mantidos fixos para todas as condições, respectivamente $f = 0,1$ mm/rev. e $a_p = 0,15$ mm. O desgaste de flanco na ponta da ferramenta (VB_c) e a rugosidade média (R_a) foram medidos periodicamente após cada passe.

Para a condição de MQCL, foi utilizado o fluido sintético à base de água Quimatic Jet, desenvolvido especialmente pela Quimatic/Tapmatic para aplicação em nebulização. Antes da mistura óleo/ar, o ar comprimido com pressão de 450 kPa foi refrigerado a $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um tubo de vórtice (Vortex Turbo Air) modelo FTA-12-MC da Eurotools (Fig. 4). Em seguida, o MQCL é aplicado pelo sistema de Nebulizador Quimatic IV a uma vazão de 0,2 l/h. O bico do nebulizador foi posicionado perpendicularmente a 40 mm da aresta de corte. Para condição de abundância (WET) utilizou-se o fluido biodegradável isento de óleos BD-Fluid B90 (Bondmann Química) com vazão constante aproximada de 640 l/h.



Figura 4 – Disposição da máquina e equipamentos utilizados no experimento.

Os experimentos foram realizados em uma barra cilíndrica de 25 mm (diâmetro inicial) usinada até 18 mm (diâmetro final) em seções de 47 mm de comprimento, onde cada barra foi composta por quatro seções de mesmas dimensões divididas por canais para facilitar a saída da ferramenta e evitar interferência do porta-ferramentas com o contraponto (Fig. 5a). Foi utilizado um inserto Walter Tools de metal-duro com grãos ultrafinos ($< 0,5\text{ }\mu\text{m}$) código TNMG160404-NMS WSM01 com geometria triangular e quebra cavacos para torneamento de acabamento com formato básico negativo, raio de ponta $r_{\epsilon} = 0,4\text{ mm}$ e revestimento PVD/TiAlN (HiPIMS) (Fig. 5b). Tal inserto é recomendado para aços inoxidáveis e superligas. A profundidade de corte e o avanço recomendados pelo fabricante estão entre $0,6 \sim 2,5\text{ mm}$ e $0,09 \sim 0,22\text{ mm/volta}$, respectivamente. O suporte DTJNL 2020 K16 foi utilizado com um ângulo de posição de $\chi_r = 93^{\circ}$ e ângulos de saída (γ_o) e inclinação (λ_s) negativos (-6°).

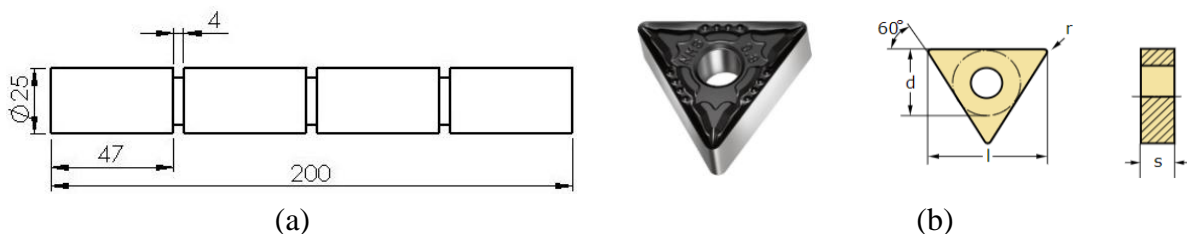


Figura 5 – (a) Esboço do corpo de provas (dimensões em mm); (b) Detalhes do inserto TNMG160404-NMS WSM01.

Em cada ensaio de vida, a rugosidade média (R_a) foi registrada a cada passe (considerando-se três medições em pontos equidistantes de 120°) através do rugosímetro Mitutoyo SJ-201P (Fig. 6a). Também foi utilizado o software dedicado SurfTest SJ Tools para auxiliar na geração do perfil de rugosidade de cada superfície. O comprimento de amostragem utilizado (l_e) foi 0,8 mm e o comprimento de avaliação foi $l_m = 5 \cdot l_e = 4\text{ mm}$ em todas as medições. De acordo com a NBR ISO

4287 (2002), esta configuração é recomendada para valores de R_a entre 0,1 e 2,0 μm registrados em perfis de rugosidade não-periódicos (como os causados pela ferramenta desgastada).

O desgaste de flanco da ferramenta foi acompanhado e medido a cada passe, a fim de que quando atingisse o valor de $VB_c \geq 200 \mu\text{m}$, devido ao experimento se tratar de uma usinagem de acabamento (diferente do valor especificado pela norma NBR ISO 3685 (2017) que determina $VB = 0,3 \text{ mm}$), o ensaio fosse encerrado. O desgaste de cratera foi acompanhado apenas qualitativamente. Para acompanhar os desgastes da ferramenta, foi utilizado o microscópio digital USB Dino-Lite modelo AM-413ZT, com uma escala de 0,2 mm, resolução 1024x768 e ampliação de 200x (Fig. 6b). A medição procedeu com a retirada do inserto do porta-ferramenta e colocado em um suporte devidamente projetado para mantê-lo na posição.

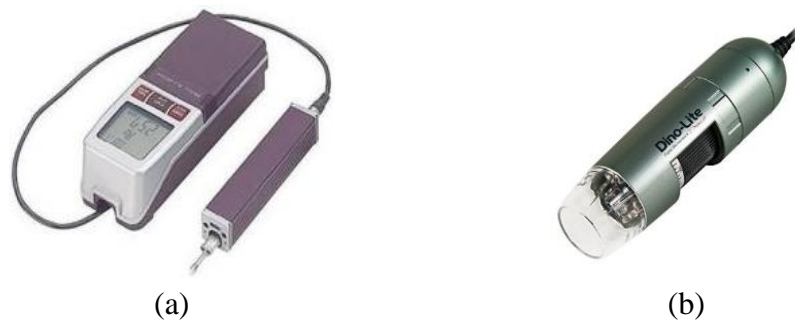


Figura 6 – (a) Rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201P; (b) Microscópio digital USB Dino-Lite AM-413ZT.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para os ensaios foram avaliados de forma comparativa sob dois aspectos: análise do desgaste de flanco da ferramenta e da rugosidade gerada na peça.

4.1. Desgaste e Vida da Ferramenta

Os valores de desgaste de flanco na ponta da ferramenta VB_C [mm] em função do tempo de corte t_c [s], foram avaliados e mostrados nas Figuras 7 e 8.

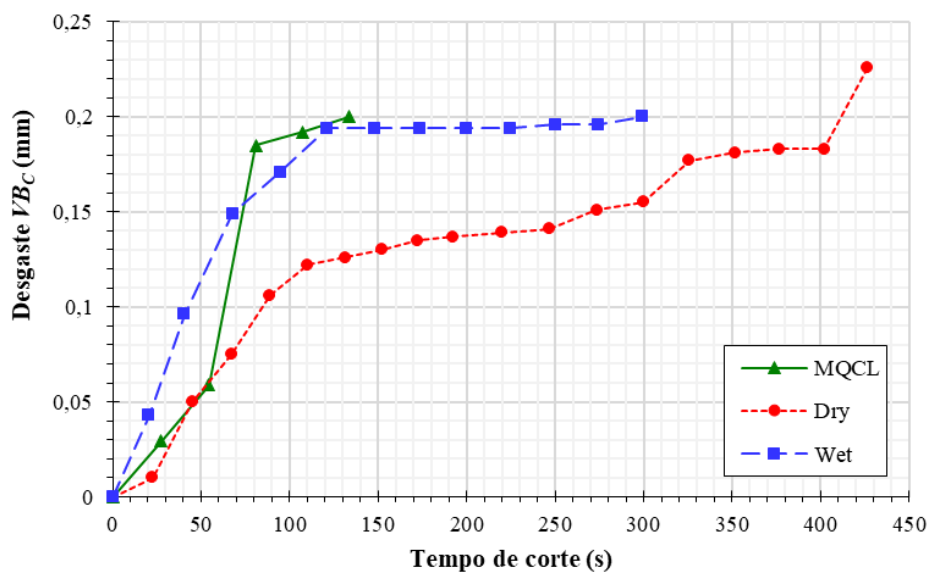


Figura 7 – Desgaste de flanco na ponta (VB_C) em função do tempo de corte para $v_c = 80 \text{ m/min}$.

Para o nível baixo de velocidade de corte ($v_c = 80$ m/min), Figura 7, a utilização de MQCL gerou o menor tempo de vida, 133 s (2,22 min). Superligas à base de Ni possuem alta taxa de encruamento. A alta redução da temperatura imposta pela refrigeração do fluido de corte tende a aumentar o encruamento do material. Como consequência, há a formação de rebarba bastante dura ao final da profundidade de corte, o que provoca um efeito de serrilhamento no revestimento da ferramenta, resultando no aumento da tendência ao desgaste, principalmente o de entalhe (Antoniali *et al.*, 2016; Diniz *et al.*, 2013). A utilização de fluido em abundância (WET) gerou uma vida de 300 s (5 min), sendo um valor intermediário. A elevada temperatura gerada na zona de corte na usinagem de materiais de baixa usinabilidade resulta na possível evaporação do refrigerante. Como resultado, a extração de calor de tal região se torna deficitária. Entretanto, há ação lubrificante, causando a possível formação de um filme de óleo que reduz significativamente o atrito e a geração de calor e, conseqüentemente, diminui a temperatura na zona de corte (Ezugwu e Bonney, 2004). Por fim, o maior tempo de vida, 427 s (7,12 min), foi resultante do corte a seco (DRY). Além da diminuição nos custos do processo (aquisição, manutenção, consumo de energia e descarte dos fluidos) e aos baixos efeitos nocivos à saúde do operador, há a questão ambiental, não havendo necessidade de descartar o fluido e a não poluição da água, do solo e do ar (Lisboa *et al.*, 2013).

A utilização do nível alto de velocidade de corte ($v_c = 120$ m/min), resultou em diferenças em relação aos resultados do nível baixo de v_c (Fig. 8).

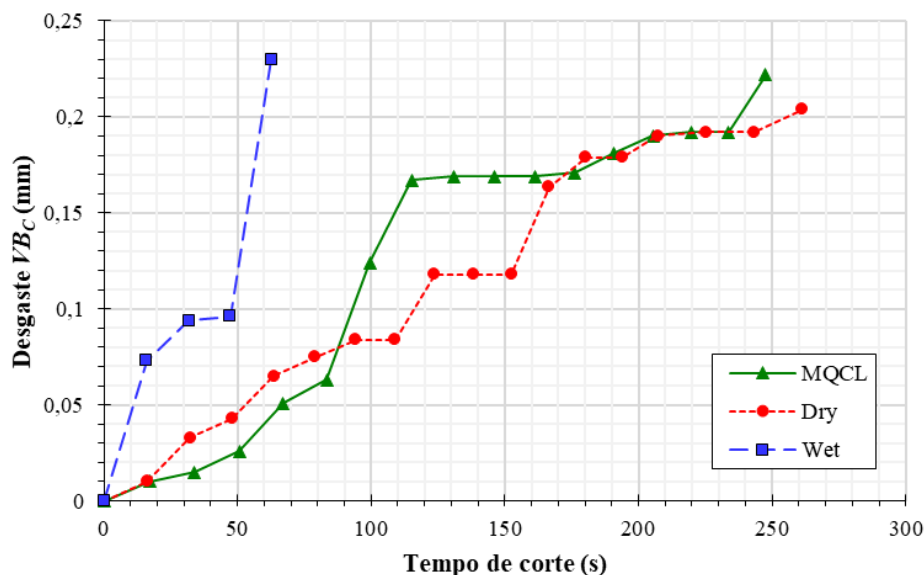


Figura 8 – Desgaste de flanco na ponta (VB_C) em função do tempo de corte para $v_c = 120$ m/min.

A utilização de fluido em abundância (WET) resultou no menor tempo de usinagem, 63 s (1,05 min). O aumento de v_c resulta no aumento da temperatura. Como consequência, o fluido de corte tende a vaporizar, reduzindo assim, seu coeficiente de transferência de calor por convecção e resultando em uma drástica redução do efeito refrigerante do fluido de corte (Sun *et al.*, 2010). Ezugwu *et al.* (2003), descrevem que a utilização de WET não é um caminho a ser seguido na usinagem de superligas à base de Ni, uma vez que as altas temperaturas geradas no processo resultam na formação de uma manta de vapor na zona de corte, dificultando a penetração do fluido. Ademais, o fluxo do cavaco formado também pode dificultar a penetração do fluido de corte. Os valores de vida encontrados para MQCL e o corte a seco (DRY) foram muito próximos, 247 s (4,12 min) e 261 s (4,35 min), respectivamente. No caso do MQCL, o filme de óleo formado nas interfaces cavaco/ferramenta e ferramenta/peça geram uma redução de atrito. A ação do ar comprimido refrigerado também é eficiente na redução da temperatura na zona de corte, aumentando a duração do revestimento (Zhang *et al.*, 2012). Para o caso do DRY, o aumento da temperatura na zona de corte

pode ter gerado o amolecimento do material, reduzindo assim o encruamento e melhorando a eficiência do corte. Porém, a névoa difundida pelo MQCL lubrifica a interface cavaco-ferramenta, reduzindo o atrito e, conseqüentemente, a temperatura de usinagem. Esta redução de temperatura poderia facilitar o encruamento do material diminuindo, assim, o amolecimento térmico. Assim, para um mesmo nível de velocidade de corte, a usinagem a seco tende a potencializar o efeito do amolecimento térmico, uma vez que não há fluido de corte envolvido (Shokrani *et al.*, 2012).

4.1.1. Tipos de Desgaste Observados

A Figura 9 mostra o desgaste de entalhe (a), a ponta da ferramenta após rompimento da aresta postiça de corte (b) e após lascamento (c) observados nos insertos durante a execução dos testes.

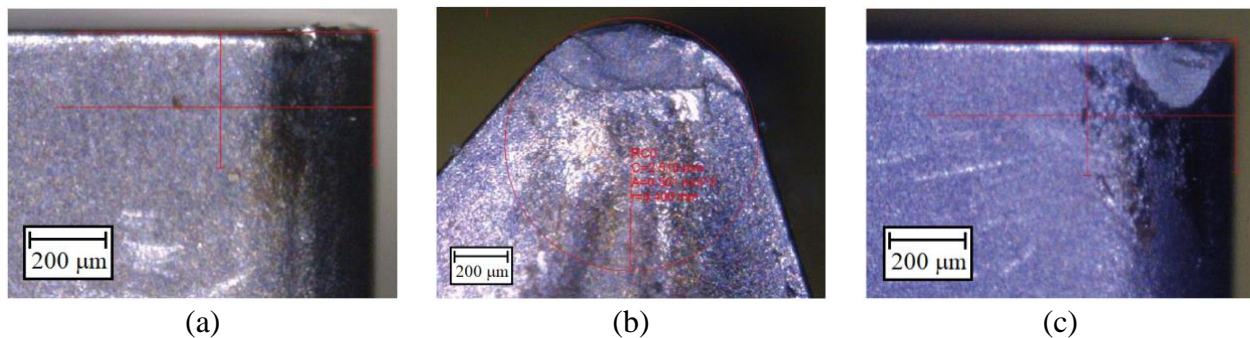


Figura 9 – Desgastes presentes: (a) de entalhe na condição com MQCL e $v_c = 120$ m/min; (b) quebra da ferramenta na condição a seco com $v_c = 80$ m/min; (c) lascamento da ferramenta na condição com MQCL e $v_c = 80$ m/min.

O entalhe apresentou-se em todas as combinações experimentais. Entretanto, este foi melhor representado na condição com MQCL e $v_c = 120$ m/min (Fig. 9a). A Fig. 9b registrada no último passe da condição a seco com $v_c = 80$ m/min, mostra a fratura da ferramenta causada pelo rompimento da aresta postiça de corte. Tal mecanismo se mostrou presente em todas as condições, resultando na aderência do material (cavaco) à ferramenta o qual, quando arrancado, removeu o revestimento e parte do inserto. A Fig. 9c, mostra o lascamento da ferramenta devido ao excessivo aumento do desgaste que resultou na fragilização da ponta e conseqüentemente, a quebra. Tal comportamento pode ser explicado pelo aumento do desgaste da ferramenta que do segundo para o terceiro passe (Fig. 9c), teve um aumento de 0,059 para 0,185 mm.

Ezugwu *et al.* (2003) citam que na usinagem das superligas à base de Ni, devido as altas temperaturas geradas, a ferramenta de corte é exposta a altas tensões mecânicas e térmicas, resultando em deformação plástica, entalhes severos e desgaste no flanco, além da diminuição da vida útil. Devillez *et al.* (2011) detectaram desgaste de entalhe na largura de corte (devido ao serrilhado do cavaco gerado) e desgaste de flanco (resultante do mecanismo de aderência e arrastamento) na ferramenta de metal-duro com revestimento TiCN/Al₂O₃/TiN durante o torneamento do Inconel 718 com e sem a utilização de fluido de corte. Na usinagem da mesma superliga, porém, com ferramentas cerâmicas, Altin *et al.* (2006), notaram elevado desgaste de entalhe, principalmente para baixas v_c , e desgaste de flanco. Desgastes de flanco e entalhe, além de deformação plástica na aresta de corte da ferramenta, foram observados por Kadirgama *et al.* (2011) na usinagem do Hastelloy C-22HS. Cantero *et al.* (2013) explicam que o excessivo calor gerado durante a usinagem em alta v_c acelera o processo de difusão. Como conseqüência, as falhas causadas pelos desgastes do flanco (menos) e de cratera (mais) podem ser parcialmente atribuídas a este mecanismo.

4.2. Análise da Rugosidade Gerada

Os valores de rugosidade média R_a [μm] em função do tempo de corte t_c [s], foram avaliados e mostrados nas Figuras 10 ($v_c = 80$ m/min) e 12 ($v_c = 120$ m/min). A linha tracejada na cor preta corresponde ao valor teórico calculado pela Eq. (2), ($R_a = 0,802$ μm), levando-se em consideração o avanço ($f = 0,1$ mm/rev.) e o raio de ponta da ferramenta ($r_\epsilon = 0,4$ mm).

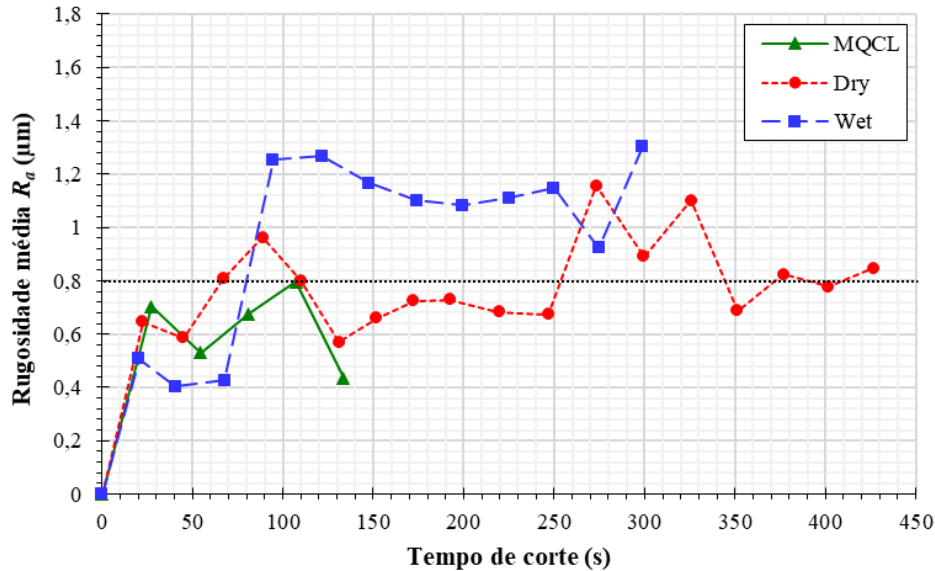


Figura 10 – Rugosidade (R_a) em função do tempo de corte para $v_c = 80$ m/min.

Para o nível mais baixo de v_c (Fig. 10), apesar da reduzida vida útil da ferramenta, a utilização de MQCL resultou em valores de R_a abaixo do valor teórico. Tal resultado pode ser explicado pela redução da temperatura na zona de corte, imposta pelo ar comprimido refrigerado e pelo menor atrito entre ferramenta e peça, resultante do efeito lubrificante do fluido (Dhananchezian, 2019). Para a condição em abundância (WET), apenas os três primeiros passes geraram valores de R_a abaixo do teórico. Tal comportamento pode ter sido consequência do excessivo aumento do VB_C , que após os três passes iniciais, subiu de 0,073 para 0,149 mm (Fig. 11).

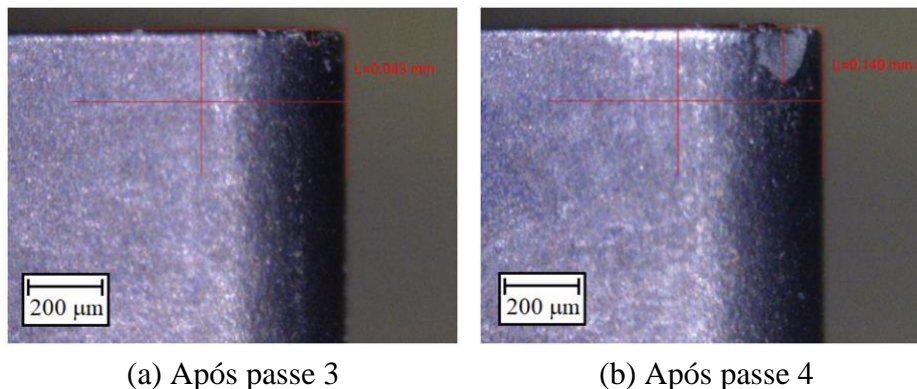


Figura 11 – Ferramenta na condição WET com $v_c = 80$ m/min: (a) $VB = 0,043$ mm; (b) $VB = 0,149$ mm.

Sarikaya *et al.* (2016), em estudos com a superliga a base de cobalto Haynes-25, obtiveram menores valores de rugosidade a partir do aumento da velocidade de corte, pois em baixas velocidades, ocorre a formação de aresta postiça de corte. Na condição a seco, R_a apresentou uma

elevação no início e em seguida, uma estabilidade, resultando em uma melhora dos valores de rugosidade, atingindo assim valores abaixo do valor teórico por um determinado tempo. Com o aumento do desgaste da ferramenta, o raio de ponta (r_c) sofre um aumento, aumentando assim, a superfície de contato ferramenta-peça e diminuindo os picos de rugosidade. Como consequência, a redução dos valores de rugosidade está diretamente ligada à forma do desgaste ocorrido (Matsumoto *et al.*, 1999). Um grande raio de ponta de ferramenta melhora o acabamento superficial. Entretanto, resulta em maior tendência de vibração durante a usinagem, dificultando desta forma a quebra dos cavacos gerados e redução da vida da ferramenta (Javidi *et al.*, 2008).

Na Figura 12, com o nível mais alto de v_c , devido ao desgaste muito rápido apresentado na condição abundante (WET) conforme supracitado, não se conseguiu gerar um número de amostras suficiente. Os valores de R_a na condição MQCL apresentaram o mesmo comportamento, mantendo-se sempre abaixo do valor teórico. Tal resultado pode ser explicado pela ação lubrificante, atuando na redução do coeficiente de atrito (menor esforço de corte) e pela ação refrigerante, reduzindo a temperatura na zona de corte (menor desgaste da ferramenta), favorecendo assim as interações entre cavaco-ferramenta e ferramenta-peça (Polly, 2019). Tais valores corroboram os resultados obtidos por Dhananchezian (2019) na usinagem da superliga Hastelloy C-276.

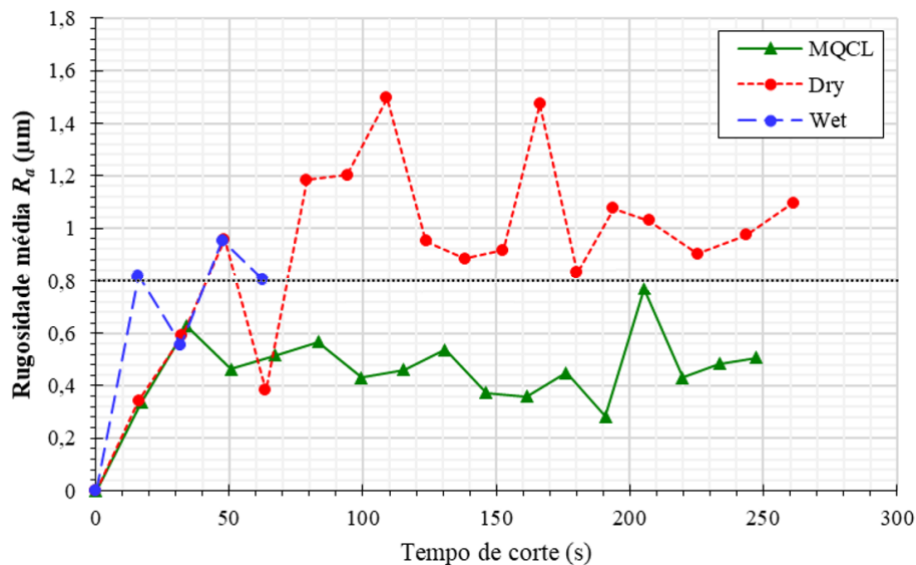


Figura 12 – Rugosidade (R_a) em função do tempo de corte para $v_c = 120$ m/min.

Para o caso do corte a seco (DRY), apesar de comportamento semelhante, os valores de R_a obtidos foram maiores comparados à utilização do nível baixo de v_c . Tal comportamento pode estar atrelado à formação de aresta postiça de corte (APC) devido às altas temperaturas geradas (Fig. 13). Os resultados corroboram com os relatos de Arunachalam *et al.* (2004) e Devillez *et al.* (2011) os quais confirmam o efeito da aresta postiça de corte sobre a superfície usinada, resultando em maiores valores de rugosidade no corte do Inconel 718. Ademais, a redução dos valores de rugosidade para os passes finais pode ser atribuída ao amolecimento térmico do material devido ao calor acumulado (Arunachalam *et al.* 2004). Já para o caso de corte com fluido abundante (WET), o efeito refrigerante reduz a temperatura e assim as superfícies são consideravelmente mais frias do que no DRY, impedindo assim a formação de APC. A aresta postiça de corte altera a geometria da cunha cortante, ocasionando efeitos em todo o processo de usinagem, como na força e temperatura de corte, desgaste das ferramentas e acabamento superficial (Machado *et al.*, 2015).

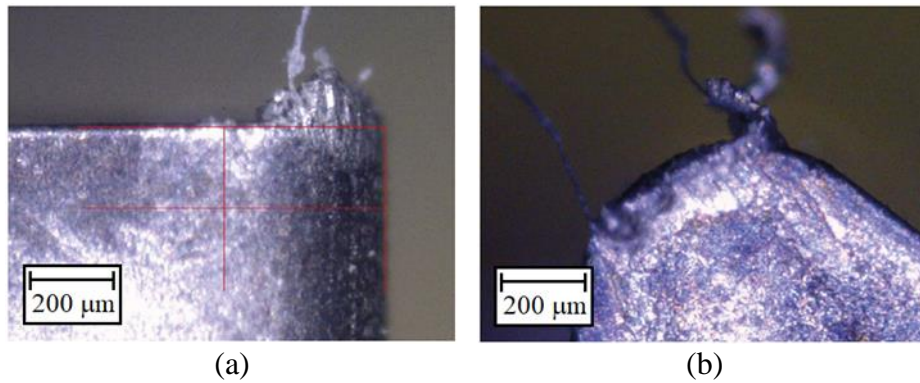


Figura 13 – Ferramenta com presença de APC na condição a seco com $v_c = 120$ m/min:
(a) vista lateral (flanco); (b) vista superior (face).

4.3. Efeito do Estado da Ferramenta sobre a Rugosidade

A Figura 14 ilustra o comportamento da rugosidade média (R_a) com o nível baixo de v_c , para as três condições de lubrificação, avaliando diferentes intervalos de desgaste na ponta da ferramenta ao considerar três regiões (ver Fig. 2): Região I ($VB_c < 50 \mu\text{m}$), Região II ($50 \leq VB_c < 150 \mu\text{m}$) e Região III ($VB_c \geq 150 \mu\text{m}$). A utilização de MQCL resultou em valores de rugosidade abaixo do valor teórico em todas as regiões analisadas, o que possivelmente está relacionado ao menor atrito na interface cavaco-ferramenta proveniente do efeito lubrificante do fluido. O excessivo valor de rugosidade para a condição WET na Região III, é resultado de o corte ter ocorrido quase que inteiramente com uma ferramenta com desgaste excessivo (ver Fig. 7). Ademais, o aumento dos valores de R_a na última região para o DRY pode estar associado ao crescimento do desgaste da ferramenta que acaba comprometendo o acabamento da peça (Ferreira *et al.*, 2016).

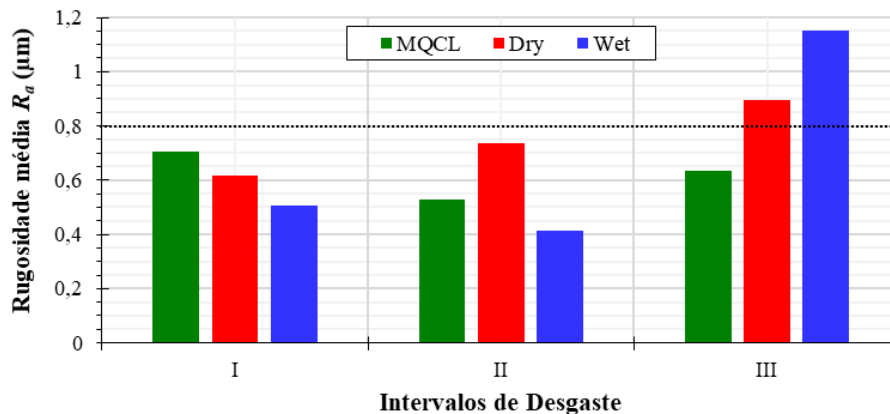


Figura 14 – Variação da rugosidade média (R_a) para as regiões I, II e III nas condições com $v_c = 80$ m/min.

Com o nível alto de v_c (Fig. 15), o desgaste na ferramenta para a condição WET foi muito elevado, sendo possível a análise apenas para as Regiões II e III. Entretanto, o valor de R_a manteve-se aproximadamente igual ao valor teórico o que pode ser explicado pelo resfriamento da superfície, impedindo assim a formação de APC e prejuízos ao acabamento da superfície usinada. A utilização de MQCL manteve valores de rugosidade abaixo do teórico, sendo tal meio uma boa alternativa no que diz respeito à preocupação com precisão dimensional e acabamento. Devido a forma do desgaste gerado, o DRY resultou em um decréscimo de R_a à medida que o tempo de corte foi crescendo.

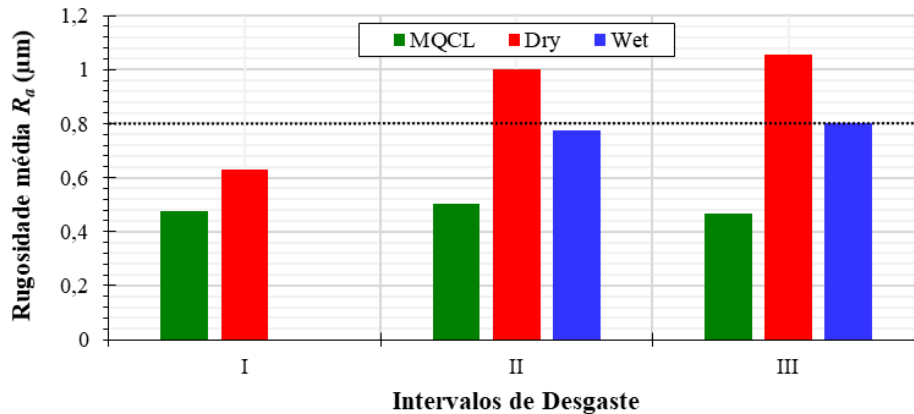


Figura 15 – Variação da rugosidade média (R_a) para as regiões I, II e III nas condições com $v_c = 120$ m/min.

5. CONCLUSÕES

A investigação comparativa sobre o efeito do MQCL na vida da ferramenta de metal-duro durante o torneamento de acabamento do Hastelloy C-276 resultou nas seguintes conclusões:

- Considerando a usinagem ambientalmente amigável, o corte a seco (DRY) com $v_c = 80$ m/min, para um critério de fim de vida $VB_c \geq 200$ μm , gerou a maior vida da ferramenta (7,12 min).
- Para $v_c = 120$ m/min, a utilização de MQCL resultou em um tempo de vida muito próximo ao gerado no DRY (4,12 e 4,35 min, respectivamente). Por outro lado, a condição abundante (WET) gerou um tempo de vida de apenas 1,05 min.
- O desgaste de flanco na ponta (VB_c) foi o mais evidente durante o experimento, enquanto que os desgastes de entalhe e cratera estiveram presentes de maneira discreta em todas as condições.
- Em relação à rugosidade média (R_a), a aplicação de MQCL, em ambas velocidades de corte, proporcionou os menores valores de R_a , pois sempre se mantiveram abaixo do valor teórico (0,802 μm), mesmo após o aumento de VB_c . Desta forma, pode-se inferir que o método é uma excelente alternativa para operações de acabamento, colaborando ainda com a visão de usinagem ambientalmente correta.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por proporcionar a possibilidade de realização deste estudo. À empresa Matrifios, pela doação do material e pela pré usinagem do corpo de prova. À Walter Tools, pela doação das ferramentas de corte. À Quimatic/Tapmatic, pela doação do nebulizador e do fluido de corte para aplicação de névoa de óleo. À Bondmann Química, pela doação do bio-lubrificante usado na condição abundante. Ao Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais (LACOR-UFRGS), pela análise química do material. Aos bolsistas e voluntários do Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS), pelo auxílio durante os testes. Ao técnico do LAUS, Guilherme Vargas Schirmer pela colaboração durante os estudos e experimento. Ao aluno de mestrado do PROMEC, Tiago Borba Oschelski, e ao Prof. Dr. André João de Souza, pelas orientações e sugestões.

REFERENCIAS

ABNT NBR ISO 3685. **Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2017.

- ANBT NBR ISO 4287. **Especificações Geométricas do Produto (GPS) - Rugosidade: Método do Perfil - Termos, Definições e Parâmetros da Rugosidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2002.
- ALTIN, A.; NALBANT, M.; TASKESSEN, A. “The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools”. **Materials and Design**, v. 28, p. 2518-2522, 2006.
- ANTONIALI, A. I. S.; MAGRI, A.; DINIZ, A. E. “Tool life and tool wear in taper turning of a nickel-based superalloy”. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, p. 2023-2032, 2016.
- ARUNACHALAM, R. M.; MANNAN, M. A.; SPOWAGE, A. C. “Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools”. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, p. 879-887, 2004.
- ASTAKHOV, V. P.; DAVIM, J. P. “Tools (geometry and material) and tool wear”. In: DAVIM, J.P. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**, Springer-Verlag, London, p. 29-57, 2008.
- BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. C. “Predicting surface roughness in machining: a review”. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, p. 833-844, 2003.
- CANTERO, J. L.; DÍAZ, Á. J.; MIGUÉLEZ, M. H. “Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718[J]”. **Wear**, v. 297, n. 1-2, p. 885–894, 2013.
- DEBNATH, S., REDDY, M. M.; YI, Q. S. “Environmentally friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review”. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33-47, 2014.
- DEVILLEZ, A.; COZ G. L.; DOMINIAK S.; DUDZINSKI D. “Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity”. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, p. 1590-1598, 2011.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Artliber, São Paulo, 8 Ed., 2013.
- DHANANCHEZIAN, M. “Study the machinability characteristics of nicked-based Hastelloy C-276 under cryogenic cooling”. **Measurement**, v. 136, p. 694-702, 2019.
- EZUGWU, E. O.; BONNEY, J. “Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel based, Inconel 718, alloy with coated carbide tools”. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153-154, p. 145-1050, 2004.
- EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. “An overview of the machinability of aeroengine alloys”. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 134, n. 2, p. 233-253, 2003.
- FERRARESI, D., **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Blücher, São Paulo, 1977.
- FERREIRA, R.; CAROU, D.; LAURO, C. H.; DAVIM, J. P. “Surface roughness investigation in the hard turning of steel using ceramic tools”. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 31, p. 648-652, 2016.
- HAYNES, 2019. “Hastelloy C-276 alloy”. **Haynes International**. Disponível em: www.haynesintl.com/docs/default-source/pdfs/new-alloy-brochures/corrosion-resistant-alloys/brochures/c-276.pdf?sfvrsn=6 . Acesso em: 08 Set. 2019.
- IZQUIERDO, R. C.; ROSA, G. C.; COLPES, K. M.; SOUZA, A. J.; PASE, G. S.; HUBLER, R.; VARGAS, A. L. M. “Desempenho das ferramentas alisadora e convencional no torneamento do aço AISI 420”. **Máquinas e Metais**, v. 51, n. 585, p. 88-104, 2014.
- JAVIDI, A.; RIEGER, U.; EICHLSEDER, W. “The effect of machining on the surface integrity and fatigue life”. **International Journal of Fatigue**. v. 30, n. 10-11, p. 2050-2055, 2008.
- LISBOA, F. C., MORAES, J. J.B., HIRASHITA, M. A. “Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências”, **33º Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP 2013)**, Salvador, BA, 16 p., 2013.
- KADIRGAMA, K.; ABOU-EL-HOSSEIN, K. A.; NOOR, M. M.; MOHAMMAD, B. “Tool life and wear mechanism when machining Hastelloy C-22HS”. **International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**, v. 270, p. 258-268, 2011.

- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Blücher, São Paulo, 3. Ed., 2015.
- MATSUMOTO, H.; PEDROSA, E. A.; DINIZ, A. E., 1999. “Análise do Torneamento de Aços Endurecidos Utilizando Ferramentas de PCBN”. **2º Congresso Internacional de Engenharia Mecânica** (CONEM 1999), João Pessoa, PB, 10 p., 1999.
- PERVAIZ, S.; DEIAB, I.; RASHID, A.; NICOLESCU, M., 2017. “Minimal quantity cooling lubrication in turning of Ti-6Al-4V: Influence on surface roughness, cutting force and tool wear”, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 231, p. 1542-1558, 2017.
- PETROPOULOS, G. P.; PANDAZARAS, C. N.; DAVIM, J. P. “Surface texture characterization and evaluation related to machining”, In: DAVIM, J. P. (ed). **Surface Integrity in Machining**. Springer-Verlag, London, p. 37-66, 2010.
- POLLOCK, T. M., TIN, S. “Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure, and properties”. **Journal of Propulsion and Power**, v. 22, n. 2, p. 361, 2006.
- POLLY, M. S. **Análise Comparativa de Ferramentas de Metal-duro Classe S e Cerâmica Mista no Torneamento a Seco e com MQL do Aço SAE 4340 endurecido**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2019.
- REVANKAR, G. D., SHETTY, R., RAO, S. S.; GAITONDE, V. N. “Analysis of surface roughness and hardness in titanium alloy machining with polycrystalline diamond tool under different lubricating modes”. **Materials Research**, v. 17, n. 4, p. 1010-1022, 2014.
- SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. Artliber, São Paulo, 2007.
- SILVA, A. L. V. C., MEI, P. R.; **Aços e Ligas Especiais**. Blucher, São Paulo, 2 Ed., 2006.
- SARIKAYA, M.; YILMAZ, V.; GULLU, A. “Analysis of cutting parameters and cooling/lubrication methods for sustainable machining in turning of Haynes 25 superalloy”. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 172-181, 2016.
- SARTORI, S.; GHIOTTI, A.; BRUSCHI, S. “Solid lubricant-assisted minimum quantity lubrication and cooling strategies to improve Ti-6Al-4V machinability in finishing turning”. **Tribology International**, v. 118, p. 287-294, 2018.
- 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.
- SUN, S.; BRANDT, M.; DARGUSCH, M. S. “Machining Ti-6Al-4V alloy with cryogenic compressed air cooling”. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, p. 933-942, 2010.
- WALTER TOOLS, **Product highlights: Driving the future of metal cutting**, 2018. Disponível em: waltertools.blaetterkatalog.de/blaetterkatalog/catalogs/innovation/en/18-1/pdf/complete.pdf. Acesso em: 18 Set. 2019.
- XU, K.; ZOU, B.; HUANG, C.; YAO, Y.; ZHOU, H.; LI, Z. “Machinability of Hastelloy C-276 using Hot-pressed sintered Ti(C7N3)-based cermet cutting tools”. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 28, p. 599-606, 2015.
- ZHANG, S.; LI, J. F.; WANG, Y. W. “Tool life and cutting forces in en milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions”. **Journal of Cleaner Production**, v. 32, p. 81-87, 2012.
- ZHU, D.; ZHANG, X.; DING, H. “Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys”. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 64, p. 60-77, 2013.