

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

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE E DAS CONDIÇÕES
LUBRIRREFRIGERANTES NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL
SUPER AUSTENÍTICO ULTRA® 254 SMO

por

Diego da Silva Meyer Lopes

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, setembro de 2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Lopes, Diego da Silva Meyer
Análise da Influência dos Parâmetros de Corte e das
Condições Lubrificantes no Fresamento de Topo do
Aço Inoxidável Super Austenítico Ultra® 254SMO / Diego
da Silva Meyer Lopes. -- 2023.
21 f.
Orientador: André João de Souza.

Coorientador: Emerson dos Santos Passari.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. aço inoxidável super austenítico. 2. fresamento
de topo. 3. condições lubrificantes. 4. força de
usinagem. 5. rugosidade. I. Souza, André João de,
orient. II. Passari, Emerson dos Santos, coorient.
III. Título.

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

Diego da Silva Meyer Lopes

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE E DAS CONDIÇÕES
LUBRIRREFRIGERANTES NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL
SUPER AUSTENÍTICO ULTRA® 254 SMO

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. Ignácio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: **Processos de Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Coorientador: Me. Émerson dos Santos Passari

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza (Presidente)

Prof. Dr. Darci Barnech Campani

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Porto Alegre, 05 de setembro de 2023

*Aos meus pais,
por todo o apoio e paciência ao longo da minha formação.*

*À minha namorada,
pela compreensão, amor e incentivo.*

*Aos meus colegas da GKN,
cujos ensinamentos contribuíram enormemente para minha formação profissional.*

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS), pela disponibilização e da infraestrutura para realização do trabalho.

Ao Prof. André J. Souza pela sua orientação ao longo da elaboração do trabalho.

Ao doutorando Émerson dos S. Passari, coorientador do trabalho, por todo o auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

Ao Téc. Guilherme V. Schirmer, cuja atuação foi fundamental durante a realização dos experimentos que compõe este trabalho.

Ao Eng. Abdiel M. Vilanova, pela doação do material, e à empresa Liess – Máquinas e Equipamentos Ltda., pela preparação dos corpos de prova.

À empresa Walter Tools, pela doação das ferramentas utilizadas.

*“Qualquer um que parar de aprender é velho, seja aos 20 ou aos 80 anos.
Qualquer pessoa que mantém a aprendizagem continua jovem.
A coisa mais importante da vida é manter sua mente jovem.”*

Henry Ford

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2023

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE E DAS CONDIÇÕES LUBRIRREFRIGERANTES NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER AUSTENÍTICO ULTRA® 254 SMO

Diego da Silva Meyer Lopes
diego.meyerlopes@gmail.com

Resumo. Os aços inoxidáveis possuem elevada importância na indústria mecânica, com diversas aplicações em instrumentos cirúrgicos, utensílios domésticos, componentes automotivos etc., principalmente por sua característica de resistência a oxidação. Um tipo particular é o aço inoxidável super austenítico (SASS), que apresenta alta resistência à corrosão por pites e é usado em setores industriais como alimentício, farmacêutico e químico. No entanto, a usinagem do SASS é um desafio devido à sua alta resistência mecânica, baixa condutividade térmica e tendência ao endurecimento por deformação. Assim, o presente estudo aborda a influência dos parâmetros de corte e das condições lubrificadoras nas forças de usinagem e nas rugosidades geradas durante o fresamento do aço inoxidável super austenítico Ultra® 254 SMO. Os resultados indicaram que a profundidade de corte é o parâmetro mais sensível sobre os valores de força. O MQL (mínima quantidade de lubrificante) gerou uma menor taxa de desgaste da ferramenta que as usinagens a seco e com fluido em abundância. Os valores de rugosidade foram, em geral, baixos e não foram expressivamente afetados pelo desgaste da ferramenta ou pelos parâmetros de corte, mas sim pelas condições de lubrificação.

Palavras-chave: aço inoxidável super austenítico, fresamento de topo, condições lubrificadoras, força de usinagem, rugosidade.

Analysis of the influence of cutting parameters and lubricating conditions on end milling of Ultra® 254 SMO super austenitic stainless steel

Abstract. Stainless steels hold significant importance in the mechanical industry, finding diverse applications in surgical instruments, household utensils, automotive components, etc., mainly due to their oxidation resistance characteristic. A particular type is super austenitic stainless steel (SASS), which exhibits high resistance to pitting corrosion and is employed in industrial sectors like food, pharmaceutical, and chemical. However, machining SASS is challenging due to its high mechanical strength, low thermal conductivity, and susceptibility to work hardening. Thus, this current study addresses the influence of cutting parameters and lubricating conditions on the machining forces and surface roughnesses generated during the milling of Ultra® 254 SMO super austenitic stainless steel. The results indicated that the depth of cut is the most sensitive parameter over the force values. MQL (minimum quantity lubrication) generated a minor tool wear rate than dry or flood machining. Roughness values were generally low and were not expressively affected by tool wear or cutting parameters but rather by the lubricating conditions.

Keywords: super austenitic stainless steel, end milling, lubricating conditions, machining force, surface roughness

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis passaram a ocupar uma posição de destaque entre os materiais de construção mecânica. Atualmente, as diferentes ligas de aços inoxidáveis são utilizadas para as mais diversas aplicações: instrumentos cirúrgicos, utensílios domésticos, joias, componentes automotivos, aeronáuticos, navais, e para as indústrias química, farmacêutica e petrolífera. Muitas dessas aplicações estão atreladas a características como ductilidade, resistência mecânica, durabilidade do material, incluindo a possibilidade de reciclagem [Kaladhar et al., 2012]. Porém, a propriedade dos aços inoxidáveis que está mais intimamente ligada à sua extensa utilização é a que lhes confere sua principal característica: a resistência à corrosão. Essa propriedade é dada pela composição básica dos inoxidáveis, formados principalmente por uma liga à base de ferro (Fe) e cromo (Cr), proporcionando a formação de uma camada de óxido de cromo na superfície do material, com excelente aderência, baixa porosidade, baixa volatilidade e solubilidade praticamente nula a diversos agentes corrosivos. Essa camada protege o aço do meio externo, garantindo uma elevada resistência à corrosão, oxidação e contaminação pelos mais diversos materiais e compostos, tanto orgânicos quanto inorgânicos [Lourenço, 1996].

Os aços inoxidáveis são classificados em cinco classes principais de acordo com as características microestruturais das suas ligas: ferríticos, martensíticos, austeníticos, endurecidos por precipitação e os duplex (estrutura 50% austenítica e 50% ferrítica). Dentro desta classificação, os aços inoxidáveis de estrutura austenítica ocupam 72% do volume produzido devido principalmente às características de elevada ductilidade e possibilidade de ser trabalhado pelos mais diversos processos de fabricação. Porém, em se tratando de usinagem, são considerados materiais de difícil corte por apresentarem, além da alta ductilidade, alta tendência ao endurecimento por deformação (encruamento) e baixa condutividade térmica. Alguns dos problemas associados à usinagem destes materiais são a alta rugosidade e a elevada taxa de desgaste das ferramentas de corte, podendo ser considerados como materiais de baixa usinabilidade [Kaladhar et al., 2012].

Dentre os aços inoxidáveis austeníticos, existem os super austeníticos, denominação empregada para ligas que possuem elevados teores de cromo (Cr), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e nitrogênio (N), o que resulta em um teor de ferro (Fe) igual ou inferior a 50%. Alguns exemplos de aços super austeníticos são o 904L, o AL6XN, o 254 SMO e o 654SMO [Plaut et al., 2007]. Estas ligas possuem uma resistência à corrosão por pites particularmente alta, sendo muito empregadas nas indústrias alimentícia, de bebidas, farmacêutica, hospitalar, química, petroquímica, de papel e celulose e na indústria aeroespacial [Fan et al., 2020]. A aplicação de aços super austeníticos vem ocorrendo de forma gradual ao longo dos últimos anos, desfavorecida principalmente por causa da dificuldade de fabricação de peças e componentes utilizando esses materiais. A usinabilidade desses aços é ainda mais baixa que a dos austeníticos devido a elevada resistência mecânica, baixa condutividade térmica, tendência ao encruamento e alta ductilidade [Nayak et al., 2014], atributos estes que resultam em elevada pressão específica de corte, produção de cavacos longos e serrilhados, superfície usinada com baixa qualidade e altas taxas de desgaste das ferramentas [Korkut et al., 2004; Kosa e Ney, 1989].

Durante o corte, uma camada encruada de alta resistência se forma, opondo-se ao avanço da ferramenta e aumentando a força e a potência de usinagem (a máquina-ferramenta deve ser suficientemente rígida para suportar os esforços de corte). Simultaneamente, a formação de cavacos longos e serrilhados (alta ductilidade do material) e o atrito elevado na interface ferramenta/peça, causam flutuação nas forças e aquecimento na região de corte. Por terem uma baixa condutividade térmica, os aços inoxidáveis não dissipam efetivamente o calor gerado. O aquecimento excessivo acaba acelerando as falhas (desgastes e avarias) na ferramenta, comprometendo a sua vida e conseqüentemente a qualidade da superfície usinada da peça, havendo a necessidade de se reduzir a velocidade de corte. Além disso, a adesão severa e a

tendência à formação da aresta postiça de corte são outros fatores que contribuem para agravar os problemas de usinagem inerentes a esse tipo de material [Camargo, 2008].

Segundo Trent e Wright (2000), a usinabilidade deve ser entendida como um sistema de propriedades dependentes de interações complexas e dinâmicas entre os materiais da peça e da ferramenta, do meio lubrificante e dos parâmetros de corte. Assim, ao se proporcionar uma melhoria da usinabilidade, a consequência será em algum dos fatores abaixo relacionados:

- aumento da vida da ferramenta de corte;
- diminuição das forças de corte;
- melhoria do acabamento da superfície usinada;
- melhor controle na formação do cavaco;
- maior taxa de remoção do material que está sendo usinado.

A usinagem limpa de aços inoxidáveis austeníticos tem recebido crescente atenção devido a sua ampla aplicação e importância deste material na indústria, bem como à necessidade de reduzir os impactos ambientais e promover a saúde e segurança dos trabalhadores. Pesquisas apontam que técnicas alternativas de lubrificação (como a mínima quantidade de lubrificação) podem apresentar resultados superiores em relação aos fluidos de corte tradicionais quanto a esforços de corte, vida de ferramenta, integridade superficial e produtividade [Debnath et al., 2014].

Com a constante evolução na utilização dos aços inoxidáveis e o desenvolvimento de novas ligas, com grande resistência à corrosão e elevadas propriedades mecânicas, a usinagem destes materiais deve ser aprimorada para atender tanto as necessidades de produtividade quanto os requisitos ambientais cada vez mais presentes nos processos produtivos [Oliveira e Alves, 2007]. Pelos aços inoxidáveis super austeníticos serem ainda de aplicações restritas, existem poucos trabalhos na literatura abordando a usinagem desses materiais. Desta forma, objetiva-se com a realização deste trabalho, investigar a influência da variação dos parâmetros de corte e da utilização de diferentes meios lubrificantes nas forças e rugosidades geradas pelo fresamento de topo do aço inoxidável Ultra[®] 254 SMO.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais e Equipamentos

O experimento consistiu no fresamento de topo em corpos de prova de aço inoxidável super austenítico Ultra[®] 254 SMO com dimensões 70 x 30 x 10 mm (Fig. 1a). As dimensões foram definidas baseadas no dispositivo de fixação (Fig. 1b) ao dinamômetro piezelétrico para obtenção dos dados de força. Este dispositivo foi construído para o aquecimento da peça em estudos posteriores. A Tabela 1 apresenta a composição química média do material utilizado conforme certificado de inspeção do fabricante nº 560014-303298:0 [Outokumpu, 2023].

A máquina-ferramenta utilizada foi o centro de usinagem ROMI Discovery 308 (Fig. 2a) presente no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS). Esta máquina-ferramenta possui comando numérico computadorizado (CNC) Mach 3, motor do eixo-árvore com potência máxima de 7,5 cv (5,5 kW) e rotação máxima disponível de 4000 rpm. Utilizou-se na usinagem uma fresa de topo Walter Tools Xtra-tec[®] F4042R.W20.02, com diâmetro de 20 mm e suporte para dois insertos Walter Tools Tiger-tec Silver[®] ADMT10, classe WSM35S com raio de ponta $r_e = 0,8$ mm e revestimento de nitreto de titânio-alumínio e óxido de alumínio ($TiAlN + Al_2O_3$) aplicado por deposição física de vapor (PVD). Possui ângulo de folga $\alpha = 15^\circ$ e ângulo de saída $\gamma = 16^\circ$ (Fig. 2b). A velocidade de corte recomendada pelo fabricante é $v_c = 100$ m/min (aproximadamente 1600 rpm para o diâmetro utilizado) e o avanço por dente é $f_z = 0,08$ mm/dente para o fresamento frontal de materiais do Grupo ISO M (aços inoxidáveis) com dureza de até 200 HB [Walter, 2012].

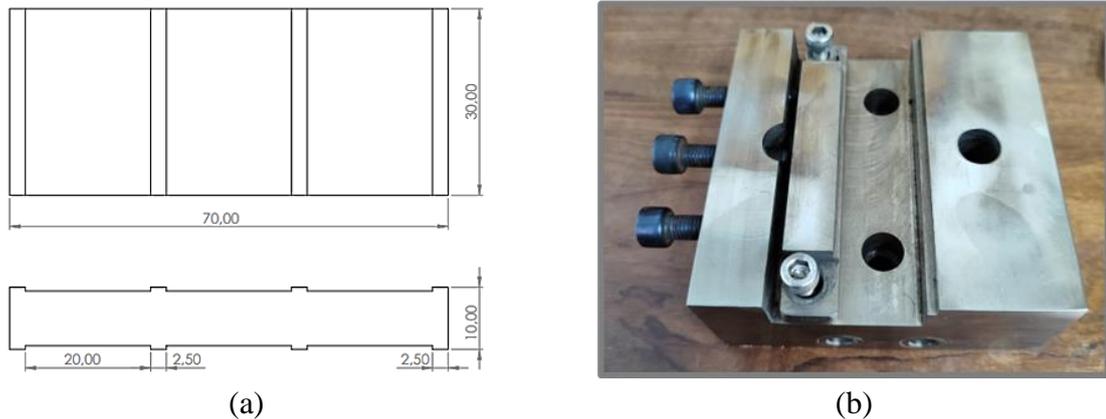


Figura 1 – (a) Formato e dimensões dos corpos de prova; (b) Dispositivo utilizado para fixação dos corpos de prova

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável 254 SMO

Valores	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu
Máximo	0,020	1,00	0,03	0,010	0,80	20,50	18,50	6,50	0,22	1,00
Certificado	0,012	0,48	0,02	0,001	0,38	20,12	17,76	6,02	0,20	0,69
Mínimo	-	-	-	-	-	19,50	17,50	6,00	0,18	0,50

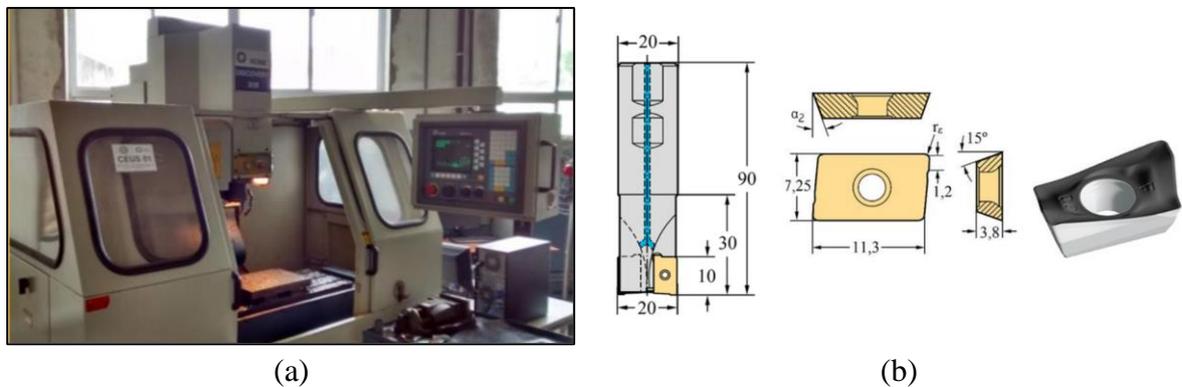


Figura 2 – (a) Centro de usinagem ROMI Discovery 308 [Cortesia do LAUS]; (b) Características geométricas da ferramenta de corte [adaptado de Sória, 2016].

Como variáveis de resposta, as componentes da força de usinagem e a rugosidade da superfície usinada (perfis e parâmetros) foram avaliadas para cada passe, bem como verificados os desgastes e avarias na ferramenta para cada conjunto de três passes realizados.

A aquisição dos sinais de força nas direções dos eixos coordenados (F_x , F_y , F_z) foi feita através do dinamômetro piezelétrico estacionário Kistler 9272 (Fig. 3a). Os sinais adquiridos são condicionados através de um amplificador de carga da Kistler 5070A, com entrada para quatro canais e faixa de medição de ± 10 V [Kistler, 2009]. Os sinais analógicos são coletados através de uma placa de aquisição Measurement Computing PCIM-DAS 1602/16, instalada em um microcomputador dedicado e processados através do software LabVIEW™ 9.0. A taxa de aquisição de sinais utilizada foi de 1000 pontos/s. O esquema do sistema de aquisição de sinais de força em fresamento frontal presente no LAUS é ilustrado na Figura 3b.

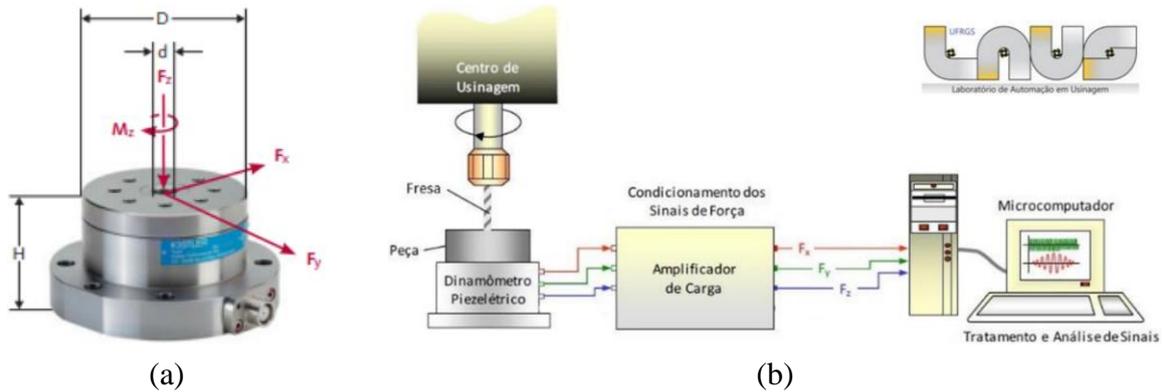


Figura 3 – (a) Dinamômetro piezoeletrico Kistler 9272 [Kistler, 2009]; (b) Arquitetura do sistema de aquisição de sinais de força (cortesia do LAUS).

A força de usinagem F_U foi então calculada através da Equação (1).

$$F_U = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

A rugosidade gerada na superfície pelo processo de usinagem foi medida utilizando o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201P com resolução de $0,01 \mu\text{m}$ (Fig. 4a). A agulha do apalpador possui raio de ponta de $5 \mu\text{m}$ e aplica uma força de 4 mN durante a medição. As medidas foram tomadas utilizando um comprimento de amostragem de $0,8 \text{ mm}$ e um comprimento de medição de 4 mm , com velocidade de varredura de $0,25 \text{ mm/s}$. Os parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_t foram coletados com auxílio do software SurfTest SL Tools. Além disso, imagens das texturas das superfícies usinadas foram capturadas utilizando o microscópio digital USB Dino Lite modelo AM 413 ZT (Fig. 4b) auxiliado pelo software Dino Capture 2.0.

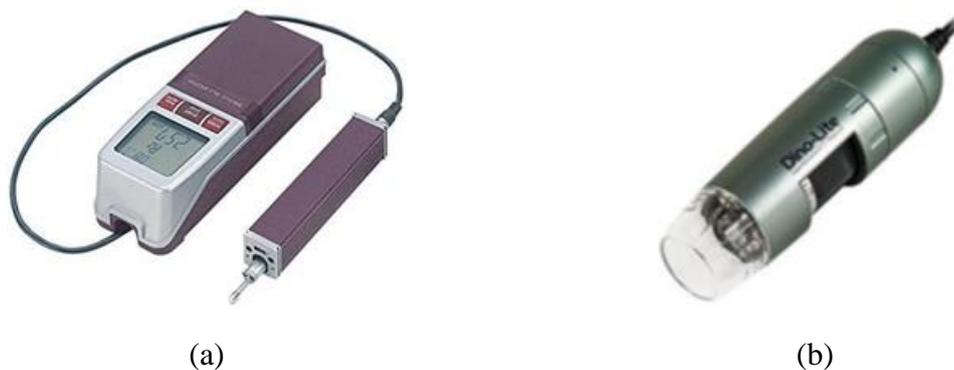


Figura 4 – (a) Rugosímetro Mitutoyo SJ-201P; (b) Microscópio Dino Lite AM 413 ZT

A supervisão do estado da ferramenta, a fim de verificar a presença de possíveis desgastes e/ou avarias, também foi realizada com auxílio do microscópio Dino Lite AM 413 ZT.

3.2. Procedimento Experimental

Após a definição da ferramenta, definiu-se os níveis dos parâmetros de corte (velocidade de corte “ v_c ”, avanço por dente “ f_z ” e profundidade de corte “ a_p ”) e as condições de lubrificação (a seco, com fluido em abundância e mínima quantidade de lubrificação “MQL”) a serem utilizados nos experimentos. Na condição abundante, utilizou-se o fluido

comercial Bondmann BD-Fluid B90, isento de óleo e biodegradável [CIMM, 2023], aplicado em uma diluição em volume de água de 1:20. Na condição “MQL”, foi empregado o fluido Bondmann Way 45-V a uma vazão de 240 ml/h com pressão de 3 bar. Este fluido contém nanopartículas de prata, sendo 100% solúvel em água e biodegradável [Bondmann, 2023].

O procedimento baseou-se na realização de 15 passes (correspondente a um comprimento usinado de 450 mm ou um tempo de corte de 2,7 min) para cada condição lubrificante, variando um dos parâmetros a cada cinco passes, enquanto os outros dois eram mantidos constantes em nível médio, totalizando 45 passes. A Tabela 2 mostra os parâmetros de corte e os níveis selecionados conforme as recomendações da Outokumpu (2023). Percebe-se que os passes 3*, 8* e 13* apresentam a mesma combinação de parâmetros de corte, e foram utilizados como passes de referência, possibilitando verificar, para cada condição de lubrificação, se os valores das forças de usinagem medidos sofreram alterações com possíveis falhas na ferramenta de corte. Vale salientar que para cada condição de lubrificação, utilizou-se um par de arestas novas, substituídas após a realização dos 15 passes do conjunto, e as falhas e desgastes sofridos pela ferramenta de corte foram verificados à cada três passes realizados.

Tabela 2 – Níveis dos parâmetros de corte selecionados para cada condição lubrificante

Passo	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_p [mm]
1	100	0,06	0,2
2			0,4
3*			0,6
4			0,8
5			1,0
6	100	0,02	0,6
7		0,04	
8*		0,06	
9		0,08	
10		0,10	
11	60	0,06	0,6
12	80		
13*	100		
14	120		
15	140		

Os níveis dos parâmetros de corte selecionados para o estudo podem ser considerados conservadores para o fresamento do aço inoxidável austenítico. Contudo, como não há informações suficientes para definir quais os níveis a serem aplicados na usinagem do aço inoxidável super austenítico Ultra[®] 254 SMO, optou-se pelos apresentados na Tabela 2. Além disso, o objetivo do trabalho não é acompanhar a variação das forças de usinagem e da rugosidade em função do desgaste da ferramenta, mas sim investigar seus comportamentos com a variação dos parâmetros de corte e das condições lubrificantes.

A experimentação foi realizada primeiramente com a utilização de fluido em MQL, devido à maior complexidade para realização do setup e ajuste da vazão do fluido. As três componentes ortogonais da força de usinagem (F_x , F_y , F_z) foram adquiridas a cada passe realizado, enquanto as falhas na aresta secundária da ferramenta foram registradas a cada três passes realizados

utilizando o microscópio digital Dino Lite AM 413 ZT. Esta sequência foi realizada até que fossem completados os 15 passes da condição MQL, e então repetiu-se o procedimento para com fluido em abundância e, por último, a seco. As rugosidades foram medidas após a realização dos 45 passes (15 com cada condição lubrificante), juntamente com a análise das superfícies usinadas.

Na determinação dos valores de força de usinagem (F_U), considerou-se a média de 2 mil pontos coletados dentro do intervalo estável de usinagem, isto é, desconsiderando a entrada e a saída da ferramenta da peça. No caso dos valores de rugosidade, considerou-se a média e o desvio padrão de cinco pontos medidos no mesmo intervalo estável de usinagem.

Finalmente, foram analisadas as relações entre a força de usinagem e a rugosidade com as condições de corte, buscando entender qual conjunto de parâmetros permite obter a melhor condição de acabamento, com boa produtividade e a menor falha da ferramenta.

4. RESULTADOS

Para melhor compreensão durante a análise dos dados, os resultados obtidos a partir dos experimentos serão organizados sob três aspectos principais: a força de usinagem medida durante o fresamento de topo do aço inoxidável super austenítico Ultra[®] 254 SMO, o desgaste sofrido pela ferramenta de corte WSM35S e a rugosidade da superfície usinada.

4.1. Força de Usinagem

A Figura 5 mostra o gráfico das forças de usinagem obtidas para os 15 passes realizados. Observa-se um crescimento linear e acentuado das forças de usinagem (F_U) ao longo dos cinco passes iniciais, para todas as condições de lubrificação, indicando uma forte influência da profundidade de corte (a_p) sobre a força total de usinagem.

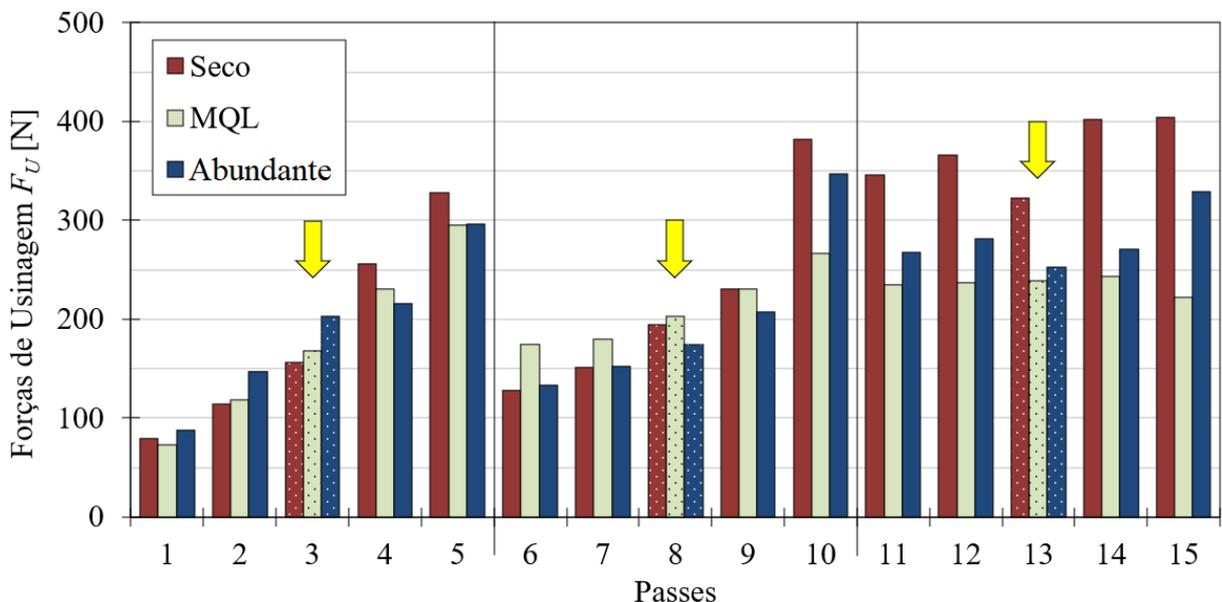


Figura 5 – Gráfico comparativo das forças de usinagem medidas para todos os passes realizados.

Um crescimento também linear das forças, porém, menos acentuado, é observado entre os passes 6 e 10, nos quais são variados os valores de avanço por dente (f_z). Destaca-se o passe 10, no qual foi identificado um grande aumento da força de usinagem nas condições a seco e com

fluido em abundância, possivelmente por causa de falhas ocorridas na ferramenta ocorrida durante o passe 10 com as condições de corte a seco e com fluido em abundância, sendo este passe o momento do experimento em que é utilizado o maior valor de avanço. Também se observa que os valores de F_U entre os passes 11 e 15 não apresentaram tendência de aumento expressivo, mantendo-se próximos nos cinco passes nos quais os valores de velocidade de corte (v_c) são variados. Estes resultados vão ao encontro do esperado e que é encontrado na literatura, pois com a variação de a_p e f_z , tem-se alteração na área da seção transversal de corte, e consequentemente nas forças envolvidas durante a usinagem [Machado et al., 2015].

Na comparação entre os passes de referência (3*, 8* e 13*), nota-se que o passe 13* apresenta maiores valores de F_U para todas as condições de lubrificação. Isso mostra que os efeitos dos desgastes e avarias na ferramenta após o passe 9 exerceram grande influência nos valores de força. Isso também foi confirmado por Passari et al. (2022).

Com relação ao efeito das condições de lubrificação sobre as forças de usinagem, até o passe 9 não foram observadas diferenças expressivas nas forças medidas com as diferentes condições de usinagem. A média dos valores de F_U ficou em torno de 183 N para as três condições ao longo dos nove primeiros passes. Contudo, após o passe 9, o valor médio das forças aumentou para todas as condições, chegando à 240 N com a aplicação do MQL, valor 54,1% menor do que o observado no corte a seco (370 N) e 21,3% menor que na usinagem com fluido em abundância (292 N). Estes resultados indicam que as falhas na ferramenta foram mais severas no corte a seco e mais brandas no fresamento com MQL, mantendo valores intermediários com fluido em abundância.

4.2. Desgaste da Ferramenta

A Figura 6 apresenta o gráfico de progressão das falhas da ferramenta de corte WSM35S (desgastes e/ou avarias) medidas na aresta de corte secundária e a Figura 7 os estados da ferramenta de corte após os 15 passes realizados (comprimento usinado de 450 mm) para as três condições de lubrificação utilizadas durante os experimentos.

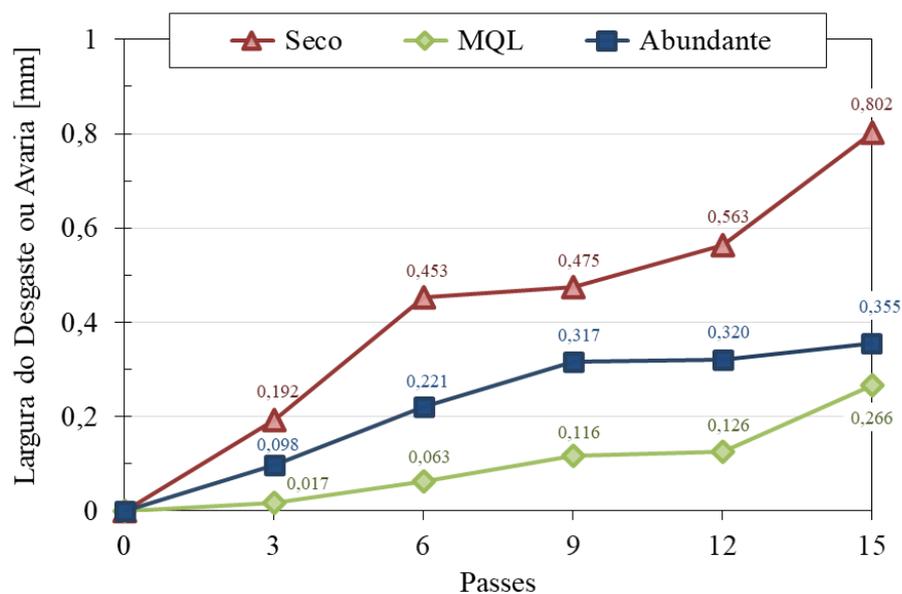


Figura 6 – Progressão dos desgastes nas ferramentas de corte para as três condições de lubrificação utilizadas.

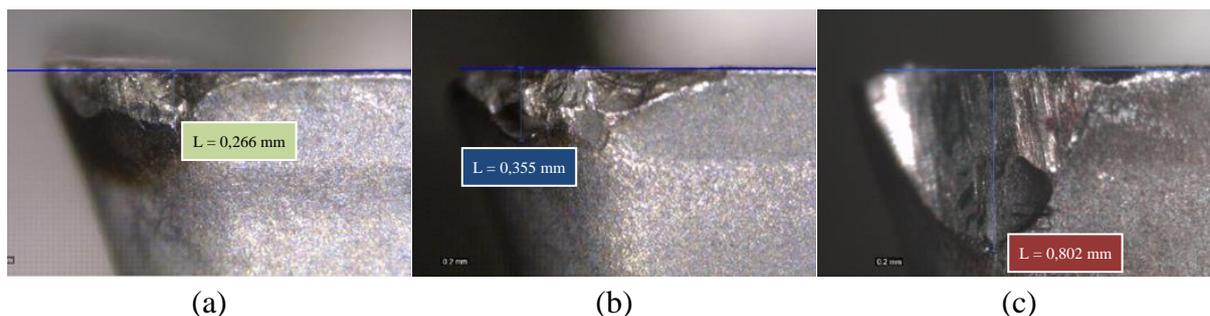


Figura 7 – Estado da ferramenta após 2,7 min de usinagem: (a) com MQL; (b) com fluido em abundância; (c) a seco

As arestas utilizadas nos passes com utilização de MQL apresentaram larguras de desgastes e/ou avarias com valores baixos ao longo dos 12 primeiros passes realizados, chegando a $L = 0,116$ mm na medição realizada após o passe 9, com leve progressão no passe 12. Contudo, a medição de desgaste após o passe 15 realizado nesta condição indicou falhas por entalhe e lascamento da aresta secundária de corte. Na Figura 7a, observa-se que o material arrancado da superfície de folga da ferramenta alcançou largura $L = 0,266$ mm. A falha apresentada pela ferramenta pode ser atribuída aos aumentos na velocidade de corte (v_c) nos passes 14 e 15. De acordo com a Tabela 2, até o passe 13, $v_c \leq 100$ m/min; depois, a velocidade foi incrementada para 120 m/min no passe 14 e para 140 m/min no passe 15. Esta análise é coerente com o que é apresentado por Diniz et al. (2013), que evidenciam que a velocidade de corte é o parâmetro que exerce maior influência no desgaste e redução da vida das ferramentas de corte.

As arestas de corte aplicadas nos experimentos com fluido em abundância apresentaram desgaste e danos mais severos que com MQL, apresentando desgaste de flanco ($L = 0,098$ mm) na medição realizada após o passe 3, lascamento ($L = 0,221$ mm) na medição realizada após o passe 6, e material aderido à aresta de corte com progressão das avarias ($L = 0,317$ mm) após o passe 9. Resultados semelhantes foram observados após os passes 12 ($L = 0,320$ mm) e 15 ($L = 0,355$ mm), como mostra a Figura 7b. Assim, pode-se atribuir o aumento das forças de usinagem medidas após o passe 9 com fluido em abundância foram superiores aos passes com MQL por causa da maior intensidade das falhas na ferramenta.

Na usinagem a seco foi observado desgaste de entalhe na aresta de corte na medição realizada após o passe 3 ($L = 0,192$ mm), e lascamento no passe 6 ($L = 0,453$ mm). Nas medições seguintes, realizadas nos passes 9, 12 e 15, foram identificadas diferentes formas de material aderido à aresta de corte e uma progressão expressiva do lascamento, atingindo a largura $L = 0,802$ mm após o último passe (Fig. 7c). Vale mencionar que os passes 11 e 12 foram realizados a baixas velocidades de corte (respectivamente 60 e 80 m/min), o que pode ter favorecido essa adesão de material. A partir destes resultados, pode-se constatar que a usinagem a seco é a condição de corte que oferece maior desgaste da ferramenta, mostrando que a ausência de lubrificação é prejudicial à usinabilidade por fresamento de topo do aço inoxidável super austenítico Ultra[®] 254 SMO.

4.3 Rugosidade das Superfícies

As rugosidades médias medidas nas superfícies usinadas apresentaram valores considerados baixos em todos os passes ($R_a \leq 0,6$ μ m) para as três condições de lubrificação, podendo ser classificada como uma classe N6, segundo a NBR 8404 (ABNT, 1984). A Figura 8 apresenta o gráfico comparativo dos valores de rugosidade média obtidos através das medições realizadas.

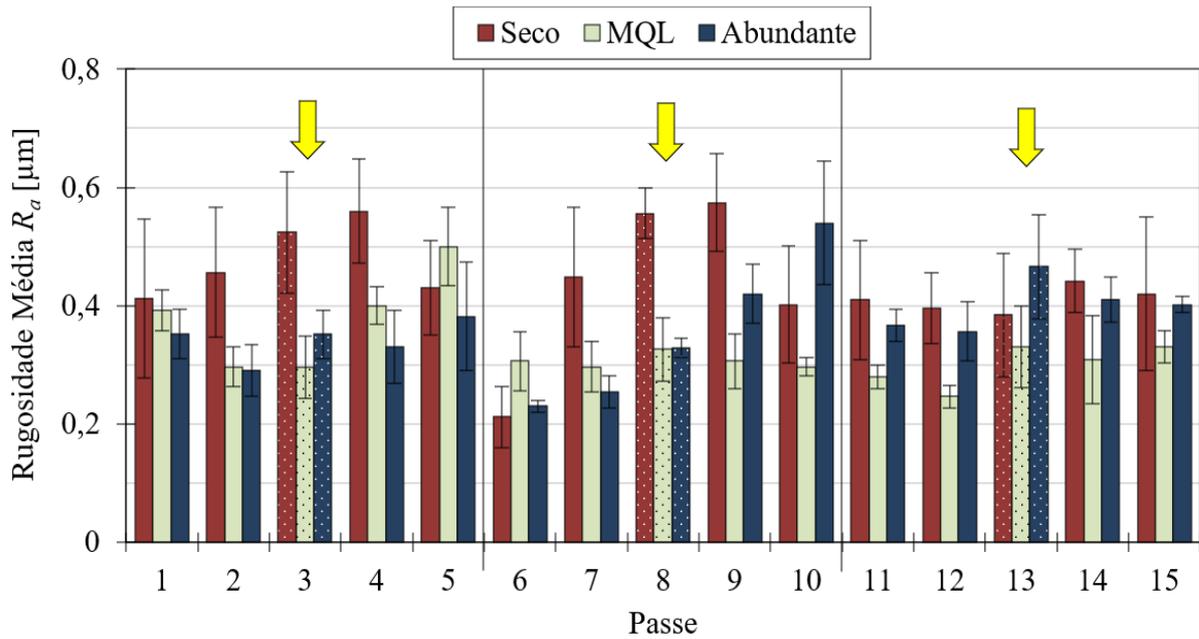


Figura 8 – Gráfico comparativo das rugosidades médias obtidas para todos os passes realizados.

Considerando os passes de 1 a 5, não é possível afirmar que a profundidade de corte (a_p) afeta consideravelmente a rugosidade média, visto que o aumento da força de usinagem (e consequentemente das vibrações) e dos desgastes e avarias na ferramenta de corte prejudicam o acabamento [Machado et al., 2015]. Contudo, para as condições abundante e MQL, em que as falhas foram observadas somente após os passes 6 e 12, respectivamente, nota-se que $a_p \cong 0,5$ mm (valores próximos de $2/3$ do raio de ponta da ferramenta) pode ser benéfico para a qualidade da superfície usinada ($R_a \cong 0,3$ µm).

Para os passes de 6 a 10, o crescimento da rugosidade média acompanha o incremento do avanço por dente (f_z) na condição abundante, mostrando que f_z exerce maior impacto que a ação lubrificante. O mesmo vale para o corte a seco; contudo, nesta condição, o efeito das falhas na ferramenta também foi grande, o que pode explicar a queda do valor de R_a no passe 10 por causa do aumento do raio de ponta da ferramenta com a avaria [Passari et al., 2022]. Para os passes com MQL, a variação dos valores de rugosidade média não foi expressiva com o incremento de f_z ($R_a \cong 0,3$ µm), indicando que a ação lubrificante é mais relevante, e que os desgastes e as vibrações não comprometeram a qualidade da superfície.

Também não se pode afirmar pelos passes 11 a 15 que a velocidade de corte (v_c) ou o meio lubrificante beneficiam ou prejudicam diretamente o acabamento da superfície usinada, tendo em vista a influência das falhas na ferramenta. Porém, foram observados menores valores de rugosidade média no fresamento com MQL ($R_a \cong 0,3$ µm) em comparação aos demais meios lubrificantes ($R_a \cong 0,4$ µm), justamente por causa do melhor estado da ferramenta.

Os valores da rugosidade parcial R_z e rugosidade total R_t acompanharam o comportamento apresentado por R_a , como pode ser observado nas Tabelas A2 a A4 do APÊNDICE. A Tabela 3 mostra o resumo dos valores médios das rugosidades R_a , R_z e R_t e dos desvios padrões para as condições lubrificantes. De forma geral, os passes efetuados a seco apresentaram maior desvio padrão da rugosidade medida, com maior variação do perfil de rugosidade na região usinada. As operações de corte com MQL e fluido em abundância geraram rugosidades semelhantes nas amostras, com valores inferiores aos obtidos na usinagem a seco, para a maioria dos passes realizados.

Tabela 3 – Resumo da média dos valores de rugosidade dos 15 passes efetuados

Parâmetro	Seco		MQL		Abundante	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Ra	0,44	0,09	0,33	0,04	0,37	0,05
Rz	2,77	0,61	2,07	0,22	2,27	0,28
Rt	3,49	0,96	2,64	0,51	2,62	0,40

A Figura 9 ilustra os aspectos das superfícies usinadas das amostras geradas pelo passe 10, observadas através do microscópio digital USB Dino Lite modelo AM 413 ZT para as três condições lubrificantes.

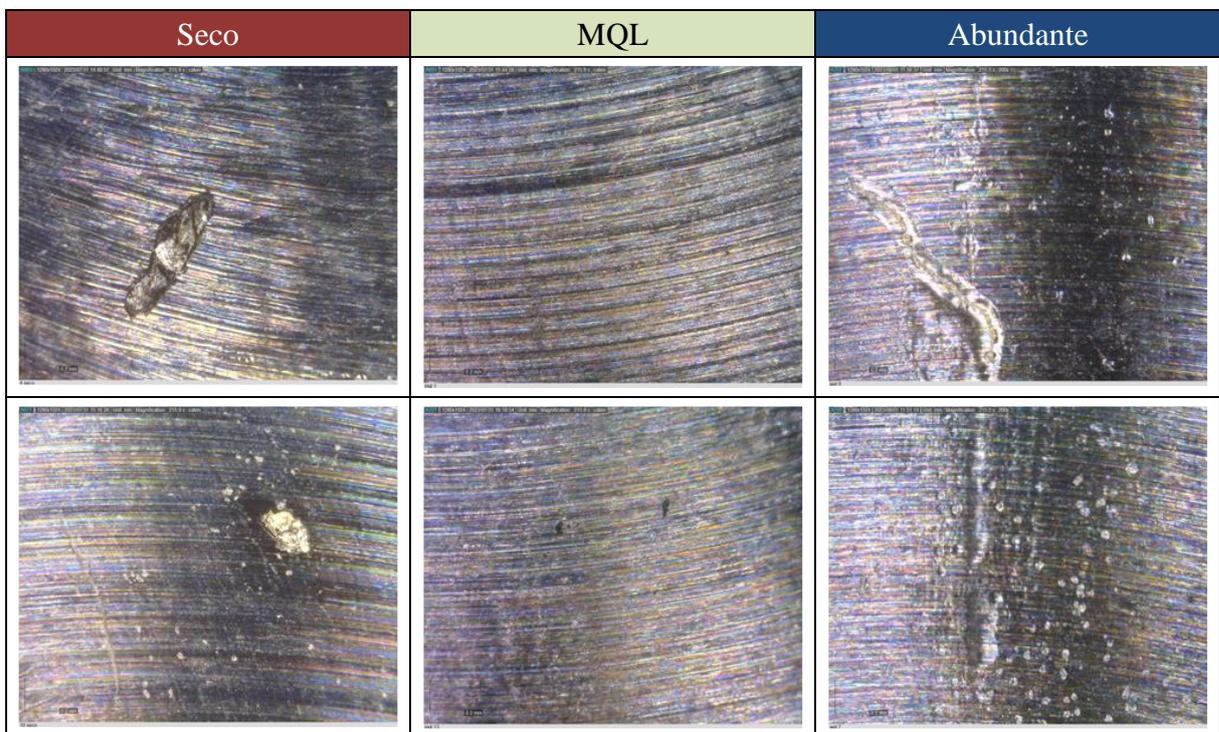


Figura 9 – Aspectos das superfícies usinadas observadas através do microscópio

Na usinagem a seco, o material aderido à ferramenta foi arrancado da superfície do material, criando falhas na superfície. A falta do efeito refrigerante do fluido, aliado a maior coeficiente de atrito e maior desgaste da ferramenta, proporciona uma maior temperatura na interface ferramenta-peça. Assim, o material encruado aderido à ferramenta, ao ser solto e arrastado sobre a superfície da peça, sofre uma espécie de caldeamento que, ao ser arrancado, cria falhas profundas na superfície [Ahmed e Mulapeer, 2022; Alabdullah et al., 2016].

Com a utilização do MQL, não foi verificada nenhuma aderência expressiva de material, tanto à ferramenta quanto à superfície do corpo de prova. A ação refrigerante não é tão grande quanto na usinagem com fluido em abundância, mas a ação lubrificante do MQL diminui o atrito na interface ferramenta-peça, reduzindo a adesão de material. A integridade da ferramenta também pode ter favorecido o melhor acabamento.

No caso da usinagem com fluido em abundância, foram observados arrancamentos de material pequenos e pouco profundos. O fluido resfria rapidamente a superfície do material, a ferramenta e o cavaco, impedindo que a aderência de material entre a peça e a ferramenta seja

tão acentuada quanto no corte a seco. No entanto, o efeito do desgaste da ferramenta pode ter incentivado as falhas observadas na superfície do material.

5. CONCLUSÕES

A investigação do fresamento de topo do aço inoxidável Ultra[®] 254 SMO demonstrou que as forças de usinagem (F_U) são sensíveis ao incremento da profundidade de corte (a_p) e do avanço por dente (f_z) devido ao aumento da área da seção transversal de corte. Até o passe 9 não foi possível observar diferenças expressivas entre os valores de F_U para os três meios lubrificadorantes. No entanto, após o passe 9, o valor médio da força de usinagem aplicando MQL foi 21,3% menor que na usinagem com fluido em abundância e 54,1% menor que no corte a seco. Não foram notadas variações relevantes com o incremento da velocidade de corte (v_c). No passe 10 foi notado um aumento desproporcional de F_U nas condições com fluido em abundância e a seco, possivelmente por causa do aumento da largura das avarias na ferramenta, o que não foi constatado na condição com MQL.

Observou-se que a baixa usinabilidade do material resultou em falhas acentuadas na ferramenta de corte após 15 passes, ou 2,7 min de usinagem ou 450 mm de comprimento usinado. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização de mínima quantidade de lubrificação (MQL), em que a ferramenta apresentou falhas brandas ao longo dos 12 primeiros passes realizados. A avaria registrada no passe 15 com MQL (lascamento com $L \cong 0,2$ mm) pode ser considerada equivalente à observada no passe 6 com fluido em abundância e no passe 3 na usinagem a seco. A menor taxa de desgaste com o MQL se deve à diminuição do atrito pela ação lubrificante do fluido Way 45-V, aliada à pouca ação refrigerante que não afeta o encruamento no material.

Não se pode afirmar que a_p e v_c têm efeito considerável sobre a rugosidade média (R_a), pois o aumento das avarias na ferramenta de corte e da força de usinagem (e por conseguinte das vibrações) prejudicaram o acabamento da superfície usinada. Entretanto, para as condições abundante e MQL, em que as falhas foram observadas somente após os passes 6 e 12, respectivamente, nota-se que $a_p \cong 0,5$ mm pode ser benéfico para a qualidade da superfície usinada ($R_a \cong 0,3$ μ m). Em relação à variação de v_c , menores valores de R_a foram observados na usinagem com MQL ($R_a \cong 0,3$ μ m) em comparação aos demais meios lubrificadorantes ($R_a \cong 0,4$ μ m), justamente por causa do melhor estado da ferramenta. No caso do avanço por dente, o crescimento de R_a acompanha o incremento de f_z na condição abundante, mostrando que f_z é mais influente que a ação lubrificante na rugosidade da superfície. O mesmo vale para o corte a seco; contudo, nesta condição, o efeito das falhas também foi grande, o que pode explicar a queda do valor de R_a no passe 10. No fresamento com MQL, a variação dos valores de R_a não foi considerável com o incremento de f_z ($R_a \cong 0,3$ μ m), indicando que a ação lubrificante é mais expressiva, e que os desgastes e as vibrações não comprometeram a qualidade da superfície. Os valores de rugosidade encontrados foram, de forma geral, baixos, indicando uma boa qualidade de acabamento da superfície usinada. Este resultado contradiz o encontrado previamente na literatura, e pode ser interpretado como um indicativo de que, sob condições adequadas de usinagem, com ferramentas apropriadas, é possível a obtenção de bom acabamento na usinagem aços inoxidáveis super austeníticos.

Ao analisar a textura da superfície, observou-se material aderido na amostra usinada a seco, material arrancado na amostra fresada com fluido em abundância e melhor acabamento na superfície da amostra usinada com MQL. Estes estados da superfície estão associados aos efeitos térmicos inerentes à usinagem deste material (alto grau de encruamento aumenta a energia necessária ao corte, o atrito elevado na interface ferramenta/peça causa aquecimento na região de corte e a baixa condutividade térmica evita a dissipação do calor gerado).

Por fim, a ferramenta WSM35S com raio de ponta $r_e = 0,8$ mm é adequada para usinagem do aço inoxidável Ultra[®] 254 SMO, desde que os parâmetros de corte sejam mantidos em níveis médios ($v_c = 100$ m/min, $f_z = 0,06$ mm/dente e $a_p = 0,6$ mm) e aplicando Way 45-V em MQL.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o isolamento de cada conjunto de parâmetros através da utilização de arestas novas em cada conjunto, observando o comportamento de F_U , de R_a e das falhas nas ferramentas produzidos por cada conjunto. Outra sugestão seria a usinagem deste material em temperaturas elevadas, investigando o efeito do amolecimento térmico, o que traria mais informações sobre o comportamento do Ultra[®] 254 SMO em relação ao efeito de encruamento.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8404, 1984. Indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos.**, Rio de Janeiro, RJ.

Ahmed, D., Mulapeer, M., 2022. “**Comparison of specific wear rates of austenitic and super austenitic stainless steels at high temperatures**”. ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences, v. 34, n. 5, p. 20-33.

Alabdullah, M. Polishetty, A., Littlefair, G. 2016 “**Microstructural and surface texture analysis due to machining in super austenitic stainless steel**”. Journal of Metallurgy, v. 2016, Article ID 3685312.

Bondmann, 2023. “Sobre o Way 45-V”. **Bondmann Química LTDA.**. Disponível em < <https://bondmann.com.br/produtos/way45-v>>. Acessado em 21/06/2023.

Camargo, 2008. **Verificação da Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos através do Processo de Furação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP.

CIMM, Centro de Informação Metal Mecânica, 2023. “**Lubrificantes sem óleo são destaques da Bondmann na Intermach 2015**”, Florianópolis - SC, Brasil. Acessado em 21/06/2023. Disponível em: < https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/13411-lubrificantes-sem-oleo-sao-destaques-da-bondmann-na-intermach2015#>

Debnath, S., Reddy, M. M., Yi, Q. S., 2014. “**Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review**”. Journal of Cleaner Production, v. 83, p. 33-47.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L. 2013. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8.ed, Artliber Editora, São Paulo.

Fan, G., Lium, J., Zhang, G. e Li, Y. , 2020. “Multiple welding simulated microstructure and corrosion resistance of super austenitic stainless steel 254 SMO welding heat affected zone”. **International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering**, Vol. 9, No. 1., pp. 38-52.

Kaladhar, M., Subbaiah, K. V. e Rao, C. H. S, 2012. “Machining of austenitic stainless steels – a review”, **International Journal Machining and Machinability of Materials**, v. 12, n. 1-2, p. 178-192.

Kistler, 2009. **Cutting Force Measurement: Precise Measuring Systems for Metal-Cutting**, Winterthur, Switzerland, 2009, 44p.

Korkut, I., Kasap, M., Ciftci, I., Seker, U. , 2004. “Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel”. **Materials and Design**, v. 25, n. 4, p. 303-305.

Kosa, T., Ney, R. P., 1989. “Machining of stainless steels”. In: **ASM Handbook, Volume 16 – Machining**, ASM International.

Lourenço, C. J., 1996. **A usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, MG.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. e Silva, M. B. , 2015. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3.ed., Blucher, São Paulo.

Nayak, S. K., Patro, J. K., Dewangan, S., Gangopadhyay, S. , 2014. “Multi-objective optimization of machining parameters during dry turning of AISI 304 austenitic stainless steel using grey relational analysis”. **Procedia Materials Science**, v. 6, p. 701-708.

Oliveira, J. F. G, Alves, S. M., 2007. “Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental”. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 129-138.

Outokumpu, 2023. **Ultra 254 SMO Data Sheet**, Disponível em: <<https://secure.outokumpu.com/steelfinder/properties/GradeDetail.aspx?OTKBrandNameID=00800&Category=Ultra>>. Acesso em 26/06/2023.

Passari, É. S., Amorim, H. J. e Souza, A. J., 2022. “Multi-objective optimization of cutting parameters for finishing end milling Hardox® 450”. **Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications**, v. 8, p. 20-28, 2022.

Plaut, R. L., Herrera, C., Escriba, D. M., 2007. “A short review on wrought austenitic stainless steels at high temperatures: processing, microstructure, properties and performance”. **Materials Research**, v. 10, n. 4, p. 453-460.

Sória, B. S., 2016. “**Estudo do Comportamento das Vibrações em Fresamento Frontal do Aço Inoxidável AISI 316 utilizando Transformada de Wavelet**”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

Trent, E. M. e Wright, P. K., 2000. “**Metal Cutting**”, 4. ed., London: Butterworths.

Walter, 2012. **General Catalogue - A Compendium of Expertise in Machining, Turning, Drilling, Threading, Milling, Adaptors**. Walter Tools, Tübingen, Germany.

APÊNDICES

A1 – Valores das Forças de Usinagem

Tabela A1 – Valores de força de usinagem [N] para as três condições lubrificantes

Passe	Seco	MQL	Abundante
1	80	73	88
2	114	118	147
3*	156	169	203
4	256	230	216
5	328	295	296
6	128	174	134
7	151	180	153
8*	195	203	174

Passe	Seco	MQL	Abundante
9	231	230	207
10	382	266	347
11	346	235	267
12	366	237	282
13*	323	239	253
14	402	243	271
15	405	222	330

A2 – Valores das Rugosidades

Tabela A2 – Valores de rugosidade [μm] para a usinagem a seco.

Passe	Seco					
	Ra		Rz		Rt	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1	0,41	0,13	2,83	0,81	3,67	1,61
2	0,46	0,11	3,00	0,90	3,73	1,41
3*	0,52	0,10	3,12	0,68	4,11	1,24
4	0,56	0,09	3,18	0,53	3,92	0,61
5	0,43	0,08	2,58	0,64	3,22	1,09
6	0,21	0,05	1,35	0,22	1,49	0,22
7	0,45	0,12	3,40	1,18	4,89	2,17
8*	0,56	0,04	3,59	0,37	4,58	0,70
9	0,57	0,08	3,46	0,47	4,30	0,83
10	0,40	0,10	2,39	0,55	3,05	0,77
11	0,41	0,10	2,50	0,71	3,05	1,02
12	0,40	0,06	2,39	0,43	2,75	0,49
13*	0,38	0,11	2,21	0,38	2,58	0,40
14	0,44	0,05	2,94	0,54	3,70	0,88
15	0,42	0,13	2,68	0,68	3,33	1,03

Tabela A3 – Valores de rugosidade [μm] para a usinagem com MQL

Passe	MQL					
	Ra		Rz		Rt	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1	0,392	0,03	2,52	0,05	3,13	0,31
2	0,296	0,03	1,87	0,20	2,28	0,32
3*	0,296	0,05	1,97	0,31	2,46	0,43
4	0,400	0,03	2,50	0,10	3,29	0,49
5	0,500	0,07	3,05	0,24	4,04	0,95
6	0,306	0,05	1,93	0,18	2,59	0,48
7	0,296	0,04	1,87	0,29	2,27	0,25
8*	0,326	0,05	2,05	0,29	2,69	0,64
9	0,306	0,05	1,79	0,19	2,18	0,17
10	0,296	0,02	1,94	0,18	2,30	0,14
11	0,280	0,02	1,77	0,13	2,14	0,21
12	0,246	0,02	1,64	0,16	1,91	0,22
13*	0,330	0,07	2,00	0,42	3,00	1,40
14	0,308	0,07	1,99	0,40	2,75	1,43
15	0,330	0,03	2,09	0,22	2,66	0,26

Tabela A4 – Valores de rugosidade [μm] para a usinagem com fluido em abundância

Passe	Abundante					
	Ra		Rz		Rt	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1	0,35	0,04	2,19	0,20	2,57	0,31
2	0,29	0,04	2,11	0,40	2,55	0,53
3*	0,35	0,04	2,13	0,24	2,41	0,22
4	0,33	0,06	2,06	0,36	2,29	0,37
5	0,38	0,09	2,42	0,50	2,76	0,63
6	0,23	0,01	1,49	0,13	1,82	0,37
7	0,25	0,03	1,70	0,16	1,84	0,20
8*	0,33	0,02	1,95	0,16	2,18	0,22
9	0,42	0,05	2,52	0,16	2,77	0,19
10	0,54	0,10	3,06	0,42	3,81	0,81
11	0,37	0,03	2,27	0,14	2,64	0,25
12	0,36	0,05	2,25	0,38	2,58	0,43
13*	0,47	0,09	2,81	0,46	3,26	0,67
14	0,41	0,04	2,57	0,31	2,86	0,42
15	0,40	0,01	2,55	0,23	2,91	0,37