

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

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE FLUIDO DE BASE VEGETAL EM MÍNIMA
QUANTIDADE NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL
SUPER AUSTENÍTICO 254 SMO

por

Matheus Paolazzi

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, agosto de 2024.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Paolazzi, Matheus
ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE FLUIDO DE BASE VEGETAL EM
MÍNIMA QUANTIDADE NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO
INOXIDÁVEL SUPER AUSTENÍTICO 254 SMO / Matheus
Paolazzi. -- 2024.
23 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, 2024.

1. fresamento de topo. 2. aço inoxidável super
austenítico. 3. fluido vegetal. 4. otimização de
parâmetros. I. Souza, André João de, orient. II.
Passari, Emerson Dos Santos, coorient. III. Título.

Matheus Paolazzi

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE FLUIDO DE BASE VEGETAL EM MÍNIMA
QUANTIDADE NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL
SUPER AUSTENÍTICO 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. Dr. Ignacio 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. Heraldo José Amorim

Prof. Dr. Liu Yesukai de Barros

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 21 de agosto de 2024.

DEDICATÓRIA

À minha família,
em especial aos meus pais, Adenor e Clari,
aos meus irmãos, Odirlei e Daniel,
à minha cunhada, Liliana,
e minhas sobrinhas, Eduarda, Lorena e Helena,
que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando incondicionalmente,
me alegrando e fazendo os sacrifícios necessários para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus amigos e colegas Pedro e Júlio,
pela amizade e parceria em todos os momentos.
É uma honra compartilhar a conclusão dessa etapa com vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela bênção da vida e por ser fonte de força e perseverança.

Ao Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS), pela infraestrutura disponibilizada para realização dos experimentos.

Ao Prof. André João de Souza, pela orientação no decorrer do trabalho.

Ao doutorando Émerson dos Santos Passari, pela coorientação e auxílio prestados durante a pesquisa.

Ao Téc. Guilherme Vargas Schirmer, pelo auxílio na realização dos experimentos.

Ao Me. Abdiel Moguidante Vilanova, pela doação do material.

À empresa LIESS – Máquinas e Equipamentos Ltda., pela preparação dos corpos de prova.

À empresa Walter Tools, pela doação das ferramentas.

Ao Centro de Microscopia e Microanálise BR-Sul (CMM-UFRGS), pela disponibilidade na utilização do microscópio eletrônico de varredura.

À UFRGS e todos os professores e técnicos, pelo crescimento intelectual que me proporcionaram.

PAOLAZZI, Matheus. **Análise da utilização de fluido de base vegetal em mínima quantidade no fresamento de topo do aço inoxidável super austenítico 254 SMO**. 2024. 15 f. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

RESUMO

Apesar da vasta aplicabilidade, o aço inoxidável super austenítico apresenta desafios na usinabilidade. Estudos indicam que a usinagem com mínima quantidade de lubrificação (MQL) é eficaz; no entanto, fluidos emulsionáveis à base de óleo mineral frequentemente utilizados prejudicam a saúde do operador e o meio ambiente. Portanto, pesquisas estão sendo conduzidas em condições de lubrificação menos adversas, como os fluidos emulsionáveis à base de óleo vegetal. Nesse sentido, este trabalho compara estatisticamente dois fluidos lubrificantes aplicados em MQL: um nanofluido sintético comercial (NMQL) e um fluido vegetal à base de óleo de mamona (VMQL). O projeto de experimentos Box Behnken foi utilizado para otimizar os parâmetros de corte no fresamento de topo do aço inoxidável super austenítico 254 SMO para ambas as condições. Os resultados indicaram que o uso do VMQL resultou em força de usinagem e rugosidade média similares às obtidas com o NMQL. No entanto, o primeiro demonstrou vantagens significativas, como a ausência de falha na ferramenta que ocorreu com o segundo. Utilizando VMQL, os valores médios da força de usinagem e da rugosidade média foram $F_U = 137$ N e $R_a = 0,28$ μ m, respectivamente. A força de usinagem foi mais influenciada pelo avanço por dente e pela profundidade de corte axial, enquanto a velocidade de corte e pelo avanço por dente afetam mais a rugosidade média. A otimização multiobjetivo indicou níveis baixos dentre os intervalos de parâmetros estudados.

Palavras-chave: fresamento de topo, aço inoxidável super austenítico, fluido vegetal, otimização de parâmetros.

PAOLAZZI, Matheus. **Analysis of the use of minimum quantity vegetable-based fluid in the end milling of super austenitic stainless steel 254 SMO**. 2024. 15 f. End of Course Monography of the Undergraduate Course in Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

ABSTRACT

Despite its broad applicability, super austenitic stainless steel presents challenges in machinability. Studies indicate that machining with minimum quantity lubrication (MQL) is effective; however, frequently used emulsifiable mineral oil-based fluids harm operator's health and the environment. Therefore, research is being conducted into less adverse lubri-cooling conditions, such as emulsifiable vegetable oil-based fluids. In this context, this study statistically compares two lubri-cooling fluids applied in MQL: a commercial synthetic nanofluid (NMQL) and a vegetable fluid based on castor oil (VMQL). The Box Behnken experimental design was used to optimize the cutting parameters in the end milling of super austenitic stainless steel 254 SMO for both conditions. The results indicated that using VMQL resulted in machining force and average roughness similar to those obtained with NMQL. However, the first demonstrates significant advantages, such as the absence of tool failure that occurred with the second. Using VMQL, the mean values of machining force and average roughness were $F_U = 137$ N and $R_a = 0.28$ μm , respectively. The machining force was more influenced by the feed per tooth and axial depth of cut, while the cutting speed and feed per tooth affected the average roughness more. The multi-objective optimization indicated low levels among the ranges of parameters studied.

Keywords: end milling, super austenitic stainless steel, vegetable-based fluid, optimization of parameters.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAIS E MÉTODOS	3
3. RESULTADOS	5
3.1 Forças de Usinagem	5
3.2 Rugosidade	8
3.3 Otimização	10
4. CONCLUSÕES.....	11
REFERÊNCIAS	12
APÊNDICE	15

1. INTRODUÇÃO

O processo de usinagem é balizado pelas propriedades físicas do material, pelas variáveis independentes de entrada – as que podem sofrer intervenção – e pelas variáveis dependentes de saída – em que não se pode intervir, já que são resultados do processo. As variáveis independentes de entrada envolvem a escolha do material a ser usinado, dos parâmetros de corte empregados, dos métodos de lubrificação, da ferramenta de corte, dentre outros. Como variáveis de saída, têm-se forças e vibrações do processo, calor gerado na zona de corte, desgastes e avarias de ferramenta, textura e integridade da superfície usinada da peça etc., que são dependentes das variáveis de entrada [Black, 1995]. Salienta-se que todas as variáveis dependentes de saída do processo são, de alguma forma, consequência da resistência mecânica do material da peça e das condições na interface cavaco-ferramenta [Machado *et al.*, 2015]. Assim, as variáveis com maior influência na usinabilidade de um material são a vida da ferramenta de corte, a força de usinagem, o acabamento da peça, a temperatura de corte, as funcionalidades da máquina operatriz e as características do cavaco [Baptista, 2002].

Dentre os materiais a serem usinados, há aqueles em que a empregabilidade é alta, mas a sua usinabilidade é baixa, como os aços inoxidáveis. Sua vasta utilização está intimamente relacionada à alta resistência à corrosão e à oxidação, grande ductilidade, além de garantir superfícies menos rugosas, o que evita o acúmulo de impurezas e facilita a limpeza, reduzindo o risco de contaminação por microrganismos [Santos, 2008]. De acordo com o levantamento realizado em 2006 pela Associação Australiana de Desenvolvimento de Aço Inoxidável, os austeníticos possuem o maior volume de utilização, ultrapassando os 70% de participação no mercado global em comparação aos demais tipos. No entanto, a alta ductilidade, a elevada resistência mecânica, a maior tendência ao encruamento e a baixa condutividade térmica o tornam de difícil usinagem [Kaladhar *et al.*, 2012]. Além do mais, a composição química e as propriedades físicas, químicas e mecânicas fazem com que a usinabilidade do super austenítico seja ainda menor que a dos austeníticos [Nayak *et al.*, 2014], pois esses atributos resultam em elevada pressão específica de corte, geração de cavacos longos e serrilhados, difícil obtenção de baixas rugosidades, aumento da dureza superficial das peças e altas taxas de desgaste das ferramentas de corte [Korkut *et al.*, 2004; Kosa e Ney, 1989]. Dessa forma, é fundamental a pesquisa acerca de melhores estratégias de usinagem desse tipo de aço, incluindo parâmetros de corte e meios lubrificantes.

A lubrificação é um dos aspectos mais relevantes na usinagem. Dependendo do material usinado, pode propiciar diversas melhorias no processo tais como redução do atrito, resfriamento a peça, auxílio na remoção de cavacos, menor desgaste da ferramenta, melhor qualidade da superfície usinada e minimização da força e da potência de corte. Também, os fluidos lubrificantes oferecem uma maior proteção da máquina operatriz e da peça contra corrosão [Astakhov, 2008]. A lubrificação pode ser realizada por meios líquidos, pastosos, gasosos e sólidos. Em se tratando dos líquidos, pode-se dividir em dois tipos: os que são miscíveis em água (soluções sintéticas e emulsões de óleo em água, por exemplo) e os que não são, sendo chamados de óleo integral [Diniz *et al.*, 2013]. No entanto, ainda que com benefícios ao processo de usinagem, os fluidos emulsionáveis (principalmente utilizando óleos minerais) podem ser muito nocivos à saúde dos operadores e ao meio ambiente, já que eles contêm constituintes químicos prejudiciais ou potencialmente prejudiciais. Uma prolongada exposição a esses fluidos durante a usinagem pode levar a irritação respiratória, asma, pneumonia, dermatite, câncer etc. Além disso, seu descarte é problemático, podendo causar contaminação de águas superficiais e subterrâneas, poluição do ar e poluição do solo, que tem o efeito transmitido aos produtos agrícolas e aos alimentos consumidos pelos seres vivos [Dixit *et al.*, 2012]. Dessa maneira, é essencial que ocorra o desenvolvimento de formas alternativas de lubrificação. Uma dessas técnicas é a aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL), que se resume em pulverizar pequenas gotículas de lubrificante na interface ferramenta-peça com auxílio de ar comprimido, trazendo resultados ambientalmente amigáveis [Astakhov, 2008].

No entanto, o MQL com fluidos sintéticos também pode ser um perigo à saúde devido aos vapores formados; assim, o fluido deve preferencialmente ser estável e biodegradável [Dixit *et al.*, 2012]. Dessa maneira, os óleos vegetais tornam-se uma alternativa atrativa porque são renováveis, menos tóxicos e facilmente biodegradáveis, colaborando para a chamada “usinagem limpa” e tornando-se uma das melhores opções na indústria [Shashidhara e Jayaram, 2010]. Dentre os óleos vegetais, destaca-se o óleo de mamona, que vem sendo objeto de estudo devido às suas propriedades tribológicas em ligas de aço carbono. Com relação ao desgaste da ferramenta e acabamento da peça, os resultados apontaram um desempenho superior em relação a outros fluidos comerciais à base de água e semelhantes ao do óleo mineral, com a vantagem de ser considerado facilmente biodegradável [Araújo Jr., 2013]. Elmunafi *et al.* (2015) compararam o uso de óleo de mamona com o corte a seco no torneamento do aço inoxidável martensítico endurecido AISI 420. Os resultados apresentaram-se superiores ao corte a seco, especialmente em termos de maior vida útil da ferramenta; a rugosidade e a força de corte também foram ligeiramente menores. Todavia, os resultados mostraram a limitação da aplicação pela temperatura de corte, já que em altas velocidades de corte, o óleo de mamona evapora-se. Wang *et al.* (2016) compararam a aplicação de óleo de mamona com outros seis óleos vegetais (óleo de milho, óleo de soja, óleo de canola, óleo de girassol, óleo de amendoim e óleo de palma) em MQL e fluido convencional em abundância na retificação da superliga a base de níquel GH4169. O óleo de mamona apresentou o melhor resultado em relação à rugosidade, atingindo redução em cerca de 50% em relação à lubrificarrefrigeração abundante e em torno de 30% em comparação a outros óleos vegetais, como o óleo de amendoim. Binayak *et al.* (2021) observaram que o óleo de mamona pode ter sua aplicação industrial limitada devido à alta viscosidade. Dessa maneira, os autores propuseram a mistura do óleo de mamona com o óleo de palma aplicada em MQL no fresamento do Inconel 690. Os resultados mostraram menor rugosidade na fração 1:2 (mamona:palma), com valor cerca de 35% menor que o óleo de mamona sem mistura.

Quando se trata de quaisquer áreas da engenharia, incluindo a usinagem, os projetos de experimentos são fundamentais. Nesse sentido, é crucial a definição de um modelo estatístico baseado na aquisição de dados para que os fenômenos sejam descritos de maneira eficiente de modo a otimizar os custos e tempos disponíveis [Astakhov, 2008]. Dentre os modelos, destaca-se o Box Behnken Design (BBD), que é uma das principais formas de se efetuar o projeto de experimentos, já que possibilita analisar os dados de forma confiável com um reduzido número de pontos (execuções) experimentais em relação aos demais métodos. Através do BBD, define-se um número de variáveis (fatores) de entrada influentes no processo que são avaliadas em três níveis: alto (+1), médio (0) e baixo (-1). Assim, o BBD pode ser utilizado tanto para otimizações estatísticas através de sua modelagem quanto para determinar a interação entre os fatores de entrada do processo que exerçam influência sobre a variável resposta. Além disso, o BBD utiliza um modelo matemático de segunda ordem para fazer a relação entre parâmetros através de uma tabela de coeficientes de regressão e probabilidade de significância (valor-p), que cria uma análise de variância (ANOVA) e informa a significância estatística de cada variável de entrada [Baumgaertner Filho, 2017]. Em relação a outros modelos estatísticos, o BBD possibilita utilizar uma quantidade menor de execuções para que os resultados sejam alcançados; além disso, o valor do coeficiente de determinação (R^2), que determina o ajuste do modelo matemático obtido com os experimentos, é aceitável quando igual ou superior a 70% [Montgomery, 2013].

Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é realizar a análise comparativa do desempenho de dois fluidos lubrificarrefrigerantes aplicados em MQL no fresamento de topo do aço inoxidável super austenítico 254 SMO: um nanofluido sintético comercial (NMQL) e um fluido de base vegetal desenvolvido a partir do óleo de mamona (VMQL). Os desempenhos serão investigados a partir da análise estatística da influência de três variáveis controláveis de entrada (velocidade de corte, avanço por dente e a profundidade de corte axial), sobre as variáveis de resposta (força de usinagem e rugosidade), utilizando o Box Behnken Design.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

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 (Figura 1a). A Figura 1b retrata a peça a ser usinada em seu dispositivo de fixação, já com toda configuração montada.

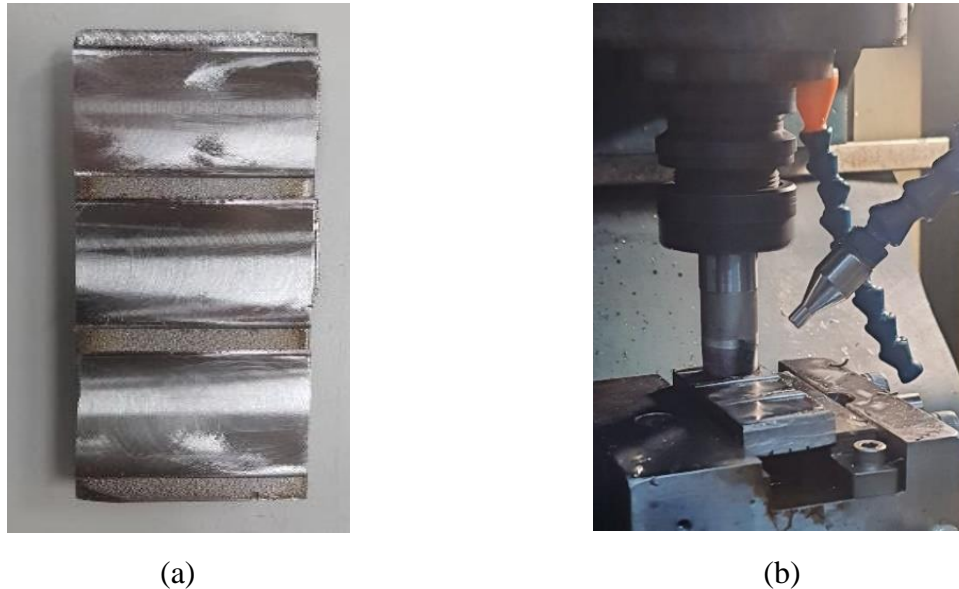


Figura 1 – (a) Corpo de Prova usinado; (b) Sistema experimental [Arquivo Pessoal, 2024].

A Tabela 1 apresenta a especificação da composição química média do material, conforme o certificado de inspeção do fabricante nº 560014-303298:0. Também são características importantes do Aço Inoxidável Super Austenítico: dureza de 160 HB, densidade de 8,0 kg/dm³, módulo de elasticidade de 195 GPa e condutividade térmica de 14 W/m.°C [Outokumpu, 2022].

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável super austenítico Ultra[®] 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

Diferentemente dos aços inoxidáveis austeníticos Outokumpu Core[®] 304 e Supra[®] 316, o super austenítico Ultra[®] 254 SMO apresenta teor de ferro (Fe) reduzido e elevados teores de cromo (Cr), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e nitrogênio (N), o que aumenta a sua capacidade de resistir à corrosão por pites [Plaut *et al.*, 2007].

Para a realização da atividade, foi utilizado o centro de usinagem ROMI Discovery 308 (Figura 2a) disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS), que possui comando numérico computadorizado Mach 3, motor do eixo-árvore com potência máxima de 7,5 cv (5,5 kW) e rotação máxima disponível de 4000 rpm. Foi utilizada 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 $r_{\epsilon} = 0,8$ mm, geometria alisadora e revestimento PVD TiAlN+Al₂O₃ (Figura 2b).

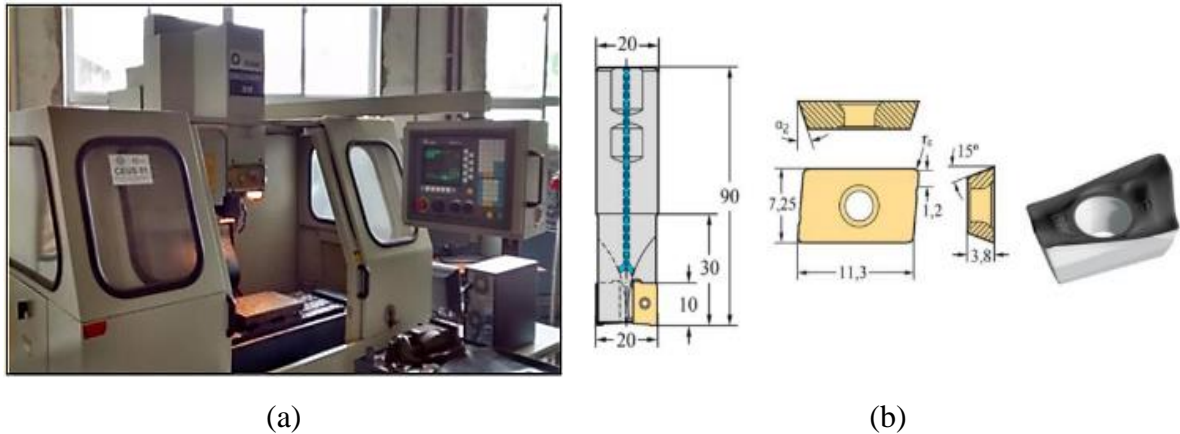


Figura 2 – (a) Centro de usinagem Romi Discovery 308; (b) Geometria da ferramenta de corte [Walter Tools, 2012].

Os experimentos foram realizados utilizando o nanofluido sintético comercial Way 45-V, que possui nanopartículas de prata e densidade de $1,02$ a $1,06$ g/cm^3 (NMQL), e uma emulsão de óleo de mamona (OMA) aminolizado, de densidade $0,9987$ g/cm^3 e viscosidade $0,012716$ $\text{g/(cm}\cdot\text{s)}$ em condição ambiente (VMQL). Ao passar pelo processo de aminolização, o fluido à base de óleo de mamona atinge melhores propriedades lubrificantes, aumentando seu desempenho tribológico e tornando sua aplicação na usinagem mais eficiente [Lasch *et al.*, 2024]. A escolha por MQL foi definida devido aos resultados de Lopes (2023), em que a condição com MQL apresentou os melhores resultados em comparação ao corte a seco e com fluido em abundância. A vazão empregada foi de 240 ml/h com pressão de 3 bar e um ângulo de aplicação de 45° . Essa configuração foi considerada levando em conta a boa eficiência alcançada em estudos anteriores.

No estudo, realizou-se 15 passes para cada condição lubrificante (NMQL e VMQL) utilizando as combinações de parâmetros de corte (velocidade de corte v_c , avanço por dente f_z e profundidade de corte axial a_p) mostradas na Tabela 2. Os níveis dos parâmetros estão de acordo com as recomendações do fabricante do material [Outokumpu, 2014] e levaram em consideração as sugestões do fabricante da ferramenta de corte [Walter Tools, 2012]. Além disso, estudos anteriores apontam a existência de intervalos de valores de parâmetros que trazem resultados melhores na usinagem do aço super austenítico com o emprego do MQL [Passari *et al.*, 2024].

Tabela 2 – Parâmetros utilizados em cada passe.

Passe	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)
1	60	0,02	0,3
2	60	0,06	0,7
3*	60	0,04	0,5
4	80	0,02	0,5
5	40	0,06	0,5
6	60	0,02	0,7
7	80	0,04	0,3
8*	60	0,04	0,5

Passe	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)
9	40	0,02	0,5
10	40	0,04	0,3
11	40	0,04	0,7
12	80	0,06	0,5
13*	60	0,04	0,5
14	60	0,06	0,3
15	80	0,04	0,7

*Passes de controle com os parâmetros de corte em nível médio (0,0,0)

Salienta-se que ocorreu a troca das duas arestas de corte quando o fluido lubrificante foi mudado. Os passes de controle 3*, 8* e 13*, em que foram utilizadas a mesma combinação de parâmetros médios, permite a identificação de alterações das forças de usinagem devido a

possíveis falhas na ferramenta. A verificação de falhas na ferramenta foi feita através do microscópio digital USD Dino Lite AM 413 ZT com auxílio do software Dino Capture 2.0. Vale mencionar que em cada corpo de prova foram realizados três passes por face (ver Figura 1a).

Durante o fresamento de topo, as forças medidas pelo dinamômetro piezelétrico estacionário Kistler 9272 foram adquiridas nas três direções ortogonais (F_x , F_y e F_z). Tais grandezas foram condicionadas a partir do amplificador de carga Kistler 5070A, com entrada de quatro canais e faixa de medição de ± 10 V [Kistler, 2019]. Os sinais analógicos foram coletados com a placa de aquisição Measurement Computing PCIM-DAS 1602/16 instalada em um microcomputador dedicado. O processamento dos dados foi feito através do software LabVIEW™ 9.0 com uma taxa de aquisição de 1,0 kHz. O tempo de aquisição foi de 100 s para garantir que os pontos de todos os passes, dos mais lentos aos mais rápidos, fossem adquiridos. Para o cálculo da força resultante (F_R) utilizou-se a Equação (1). Para a determinação dos valores das forças de usinagem (F_U), considerou-se a média aritmética de $N = 2000$ pontos calculados no intervalo estável de usinagem, que desconsidera as regiões de entrada e saída da ferramenta na peça (Eq. 2).

$$F_{Ri} = \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2 + F_{zi}^2} \quad (1)$$

$$F_U = \frac{\sum_{i=1}^N F_{Ri}}{N} \quad (2)$$

Após os passes, as rugosidades dos corpos de prova foram medidas utilizando o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201P, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$. Sua agulha possui um raio de ponta de $5 \mu\text{m}$ e aplica uma força de 4 mN durante as medições. Para tanto, utilizou-se um comprimento de amostragem $l_e = 0,8 \text{ mm}$, um comprimento de medição $l_m = 5 \cdot l_e = 4,0 \text{ mm}$ e uma velocidade de varredura de $0,25 \text{ mm/s}$. Dessa forma, os perfis e os parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_t foram coletados com auxílio do software SJ-Tools. Para a avaliação dos dados de rugosidade, foram consideradas a média e o desvio padrão de cinco pontos medidos no intervalo estável de usinagem.

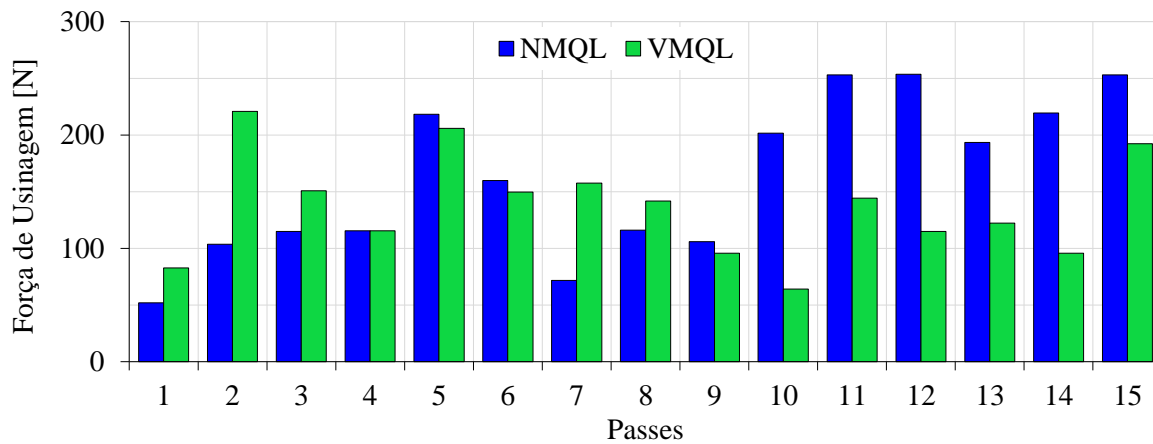
Além disso, os estados das ferramentas ao final dos 15 passes foram avaliados através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) Carl Zeiss AG EVO® 50 disponível no Centro de Microscopia e Microanálise BR-Sul (CMM-UFRGS). O MEV opera em tensões variando de $0,2$ a 30 kV , com uma resolução de 3 nm na condição de 30 kV . Vale salientar que as imagens foram captadas após a decapagem da ferramenta em uma solução de HCl (10%) durante 24 h para remoção da camada de material aderido.

Por fim, todos os dados adquiridos foram analisados estatisticamente utilizando o software Minitab® 18 a fim de definir o conjunto de parâmetros que melhor otimiza o processo de usinagem e a eficiência de cada um dos fluidos lubrificantes utilizados.

3. RESULTADOS

3.1 Forças de Usinagem

A Figura 3 apresenta o comparativo das forças estáticas de usinagem obtidas com cada uma das condições lubrificantes. Observa-se nos primeiros três passes que as forças na usinagem empregando o NMQL foram menores em comparação com a utilização do VMQL, enquanto nos últimos seis passes a situação se inverteu, sendo com o VMQL as menores intensidades detectadas. Nos passes intermediários – do passe 4 ao passe 9 – há variação entre a condição de maior força de usinagem, em que alguns passes geraram forças parecidas tanto com a aplicação do WAY-45V quanto do OMA. Analisando-se em todos os passes, a média da força de usinagem foi cerca de 18% maior na condição lubrificante NMQL.



Passe	1	2	3*	4	5	6	7	8*	9	10	11	12	13*	14	15
v_c (m/min)	60	60	60	80	40	60	80	60	40	40	40	80	60	60	80
f_z (mm/dente)	0,02	0,06	0,04	0,02	0,06	0,02	0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04
a_p (mm)	0,3	0,7	0,5	0,5	0,5	0,7	0,3	0,5	0,5	0,3	0,7	0,5	0,5	0,3	0,7

Figura 3 – Gráfico comparativo das forças de usinagem a cada passe.

No uso do WAY-45V, os passes de controle 3* e 8* apresentaram valores de força similares (115 N e 116 N), mas no passe 13* apresentou um aumento expressivo da força (193 N), podendo indicar que houve uma falha da ferramenta. Analisando o fresamento utilizando o OMA nos passes de controle, percebe-se valores similares de forças, fluando em torno de 138 ± 16 N. A Tabela 3 traz o comparativo do coeficiente de variância da força estática de usinagem nos passes de controle. Observa-se que o fresamento com VMQL foi mais uniforme, enquanto com NMQL ocorreu uma variação maior. Esse dado é outro forte indício de falha na ferramenta de corte durante a usinagem com NMQL. De maneira geral, a usinagem utilizando OMA não apresentou indícios de falhas na ferramenta devido à baixa variação das forças de usinagem.

Tabela 3 – Coeficiente de variância da força estática de usinagem nos passes de controle.

	NMQL	VMQL
F_U (N)	31,90%	10,56%

A Figura 4 apresenta uma imagem comparativa, obtida via MEV, do estado da ferramenta de corte em cada um dos meios lubrificantes após os 15 passes. Nela, percebe-se que, no caso da utilização do WAY-45V, houve maior desgaste na ferramenta e a presença de material aderido mesmo após a decapagem, enquanto na aplicação do OMA, não há indícios de falhas na aresta de corte. Dessa forma, constata-se que as falhas da ferramenta utilizando o NMQL contribuíram sobre os resultados estatísticos dos valores de força registrados.

A Tabela 4 apresenta a ANOVA da força de usinagem (F_U), em que os parâmetros são indicados mostrando sua significância e contribuição, apresentando ambas R^2 superior a 70%. Segundo Montgomery (2013), o valor do coeficiente de determinação $R^2 > 70\%$ já permite representar um modelo estatístico adequado. Na utilização do NMQL, o avanço por dente (f_z) foi o principal responsável pelo aumento das forças de usinagem, não apresentando um efeito estatisticamente significativo, mas relevante ao se considerar uma significância $\alpha < 0,10$ (intervalo de confiança de 91,7%). A segunda maior contribuição foi do efeito combinado $a_p \times f_z$, em que o intervalo de confiança foi 88,2%. Todavia, nenhum parâmetro se mostrou significativo, visto que todos apresentaram p-valor $> 0,05$ [Minitab, 2018]. Já no fresamento utilizando o VMQL, a profundidade de corte axial (a_p) foi significativa ($\alpha < 0,05$), com um intervalo de confiança de

96,7%. O avanço por dente também se mostrou influente, apesar de não ser estatisticamente significativo para $\alpha < 0,05$ (intervalo de confiança de 87,6%). Em ambos os casos, a velocidade de corte possui pouca influência na força de usinagem.

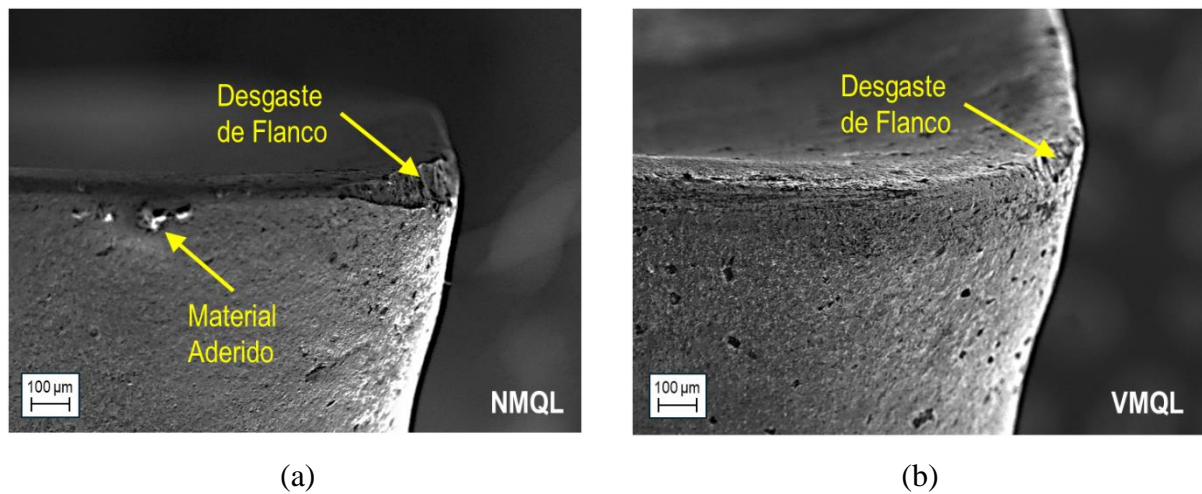


Figura 4 – Ferramenta de corte após 15 passes com: (a) WAY-45V; (b) OMA (Ampliação 150x).

Tabela 4 – ANOVA da Força Estática.

Fator	NMQL		VMQL	
	p-valor	Contribuição (%)	p-valor	Contribuição (%)
a_p	0,238	9,36	0,033	41,30
f_z	0,083	24,31	0,124	16,46
v_c	0,633	1,35	0,532	2,18
a_p^2	0,833	0,11	0,891	0,13
f_z^2	0,656	1,82	0,852	0,17
v_c^2	0,192	11,87	0,945	0,03
$a_p \times f_z$	0,118	18,57	0,469	2,96
$a_p \times v_c$	0,323	6,28	0,566	1,82
$f_z \times v_c$	0,823	0,25	0,195	10,78
R^2 (%)	73,92		75,84	

No entanto, visto que ocorreu uma falha da ferramenta, a ANOVA do NMQL teve sua análise comprometida; dessa maneira, assume-se que os resultados estatísticos utilizando o fluido vegetal sejam aplicáveis em ambas as condições lubrificantes. Os resultados obtidos estão de acordo com a literatura. O estudo de Passari *et al.* (2024) indicou que a profundidade de corte axial e o avanço por dente foram os parâmetros mais significativos, enquanto o impacto direto da velocidade de corte na força de usinagem não foi tão expressivo. Segundo Reyes (2012), isso é explicado, pois um maior avanço significa que mais material é removido com o tempo, o que ocasiona maiores forças, já que é encontrado maior resistência à ação da ferramenta durante a usinagem. Além disso, os resultados de Rigatti (2010) confirmam a forte relação proporcional da profundidade de corte com a força de usinagem: a redução da profundidade gerou menores forças; isso se explica de forma parecida com o que ocorre no avanço, visto que maiores profundidades removem uma quantidade maior de material a cada passe.

A Figura 5 mostra os gráficos de superfície das forças de usinagem (F_U) com o uso de WAY-45V e OMA em MQL, respectivamente. Neles, os parâmetros mais significativos (a_p e f_z) são

apresentados a fim de observar as faixas de valores que resultam na maior e na menor magnitude de F_U encontradas com o experimento; v_c , com menor significância, foi mantida fixa no valor médio (60 m/min).

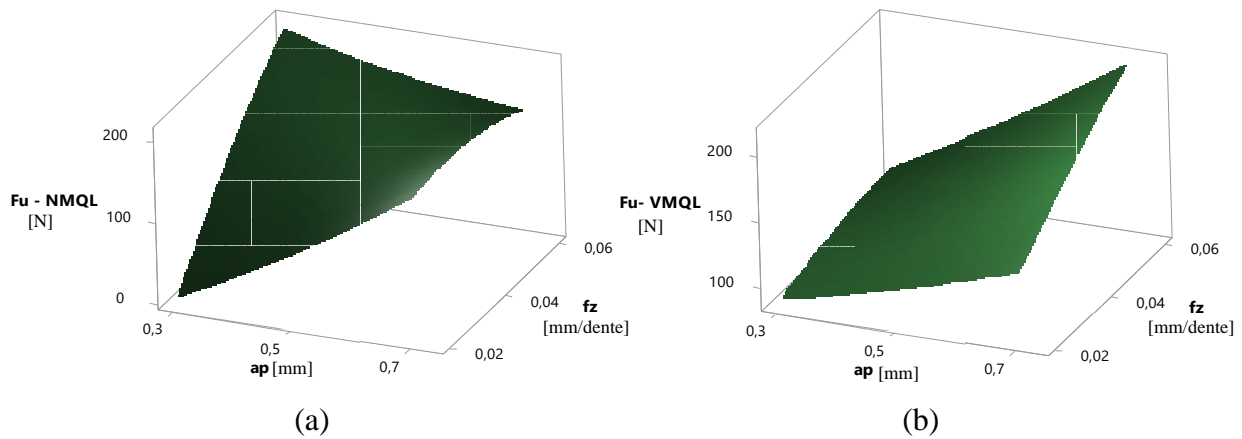
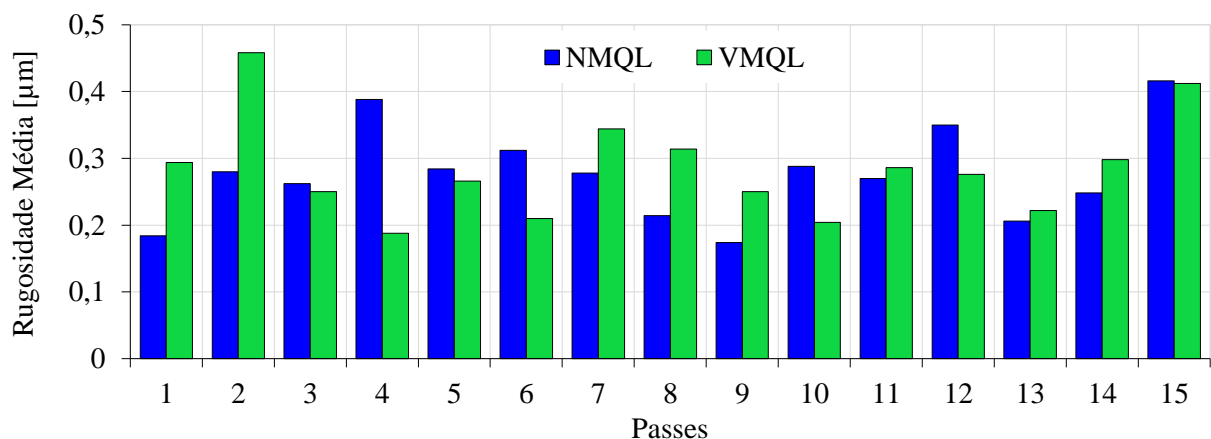


Figura 5 – Gráficos de superfície da força de usinagem com: (a) WAY-45V; (b) OMA.

No NMQL apesar dos baixos valores de f_z e a_p resultarem em baixa magnitude das forças, as maiores intensidades de força são apresentadas em baixo a_p e elevado f_z . Esse fato pode estar relacionado com o aumento das vibrações causado pelo aumento do avanço e pelo efeito da falha na ferramenta, pois até o passe 9 (onde há estabilidade nos resultados), não há indícios que tal efeito tenha ocorrido. Já no VMQL, onde houve estabilidade na ferramenta de corte, os resultados se apresentam coerentes com a literatura, registrando uma relação direta das forças de usinagem com os valores de f_z e a_p .

3.2 Rugosidade

Os valores de rugosidade média (R_a) estão expostos na Figura 6 de maneira comparativa para as duas condições lubrificantes.



Passo	1	2	3*	4	5	6	7	8*	9	10	11	12	13*	14	15
v_c (m/min)	60	60	60	80	40	60	80	60	40	40	40	80	60	60	80
f_z (mm/dente)	0,02	0,06	0,04	0,02	0,06	0,02	0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04
a_p (mm)	0,3	0,7	0,5	0,5	0,5	0,7	0,3	0,5	0,5	0,3	0,7	0,5	0,5	0,3	0,7

Figura 6 – Gráfico comparativo da rugosidade média a cada passe.

Verifica-se na Figura 6 que os valores de R_a foram muito próximos nos passes 3, 5, 11, 13 e 15. Em outros seis passes, o NMQL se mostrou mais eficiente, enquanto o VQML apresentou maior eficiência em quatro. As maiores diferenças estão no passe 1 (onde o WAY-45V foi 60% mais efetivo em relação ao OMA), no passe 2 (em que o fresamento com NMQL gerou valores de R_a 63% menores) e no passe 4 (quando o VMQL gerou resultados 51% mais baixos). Apesar das diferenças em alguns dos passes, percebe-se que valores de rugosidade média foram baixos, com $R_a < 0,5 \mu\text{m}$, o que indica que a qualidade superficial da usinagem independe do meio lubrificante (WAY-45V ou OMA) aplicado em MQL para os parâmetros selecionados. Ainda, corroborando com a hipótese, percebe-se que os últimos passes de NMQL não gerou problemas de rugosidade mesmo com a ferramenta tendo apresentado falha. Analisando todos os passes, a média de valores de R_a para o OMA foi 3% maior. Estudos como o de Kazeem *et al.* (2022) indicam que o uso de óleo vegetal fornece uma qualidade superficial comparável a de outros fluidos, principalmente quando aplicada em uma faixa parâmetros de usinagem adequados, como o objetivado neste trabalho.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros de usinagem mais significativos para a rugosidade média nas duas condições lubrificantes. Observa-se que há distinção no coeficiente de determinação das análises para os dois meios lubrificantes.

Tabela 5 – ANOVA da rugosidade média.

Fator	NMQL		VMQL	
	p-valor	Contribuição (%)	p-valor	Contribuição (%)
a_p	0,024	14,46	0,267	8,07
f_z	0,290	2,00	0,107	20,03
v_c	0,050	31,92	0,291	7,24
a_p^2	0,244	1,45	0,133	17,54
f_z^2	0,669	0,03	0,848	0,17
v_c^2	0,011	22,55	0,771	0,49
$a_p \times f_z$	0,183	3,40	0,115	18,82
$a_p \times v_c$	0,054	8,98	0,917	0,06
$f_z \times v_c$	0,063	8,08	0,598	1,64
R^2 (%)	92,88		74,07	

No NMQL, a velocidade de corte (efeitos linear e quadrático) e a profundidade de corte axial são os parâmetros significativos mais influentes sobre a rugosidade para uma significância $\alpha < 0,05$. Os efeitos combinados da velocidade de corte com a profundidade de corte ($a_p \times v_c$) e com o avanço por dente ($f_z \times v_c$) se apresentaram influentes, apesar de não estatisticamente significativos (p-valor $> 0,05$), com intervalos de confiança de 94,6% e 93,7%, respectivamente. Visto que foi registrada falha na ferramenta de corte nesta condição lubrificante, infere-se que a influência da velocidade de corte está associada com os efeitos de desgaste de ferramenta atribuídos ao aumento de v_c o que, conforme Klocke (2011), tende a acelerar as falhas na ferramenta. Já no VMQL nenhum parâmetro é estatisticamente significativo para uma significância $\alpha < 0,05$; todavia, o efeito linear do avanço por dente, o efeito quadrático da profundidade de corte axial e o efeito combinado $a_p \times f_z$ foram os mais influentes (intervalos de confiança de 89,3%, 86,7% e 88,5% respectivamente). Conforme Machado *et al.* (2015), o avanço possui uma relação teórica direta com a rugosidade, visto que o movimento da ferramenta deixa marcas periódicas sobre a superfície usinada. Neste caso, pela estreita faixa de parâmetros utilizados e resultados de R_a obtidos, a ausência de um parâmetro estatisticamente significativo pode inferir que as baixas rugosidades obtidas independem dos parâmetros utilizados dentro da faixa de valores abordada neste estudo.

Os gráficos de superfície da rugosidade média mensurada após o fresamento de topo do aço inoxidável super austenítico 254 SMO também foram analisados, conforme Figura 7. No NQML, alta velocidade de corte (v_c) e alta e profundidade de corte axial (a_p) geraram valores de R_a mais elevados; já valores mais reduzidos são encontrados com baixa v_c e média a_p . No VMQL, percebe-se como a combinação entre a alta a_p e o alto f_z geram os maiores valores de R_a , enquanto uma média a_p e um baixo f_z resultam em melhor acabamento. Os resultados obtidos estão de acordo com Polishetty *et al.* (2015), em que maiores avanço e profundidade de corte geraram maiores rugosidades no fresamento do aço inoxidável super austenítico. A literatura, de maneira geral, também corrobora com isso, visto que f_z e a_p são parâmetros que impactam diretamente a formação de cavacos, as vibrações e a dissipação de calor, os quais afetam a qualidade superficial da peça.

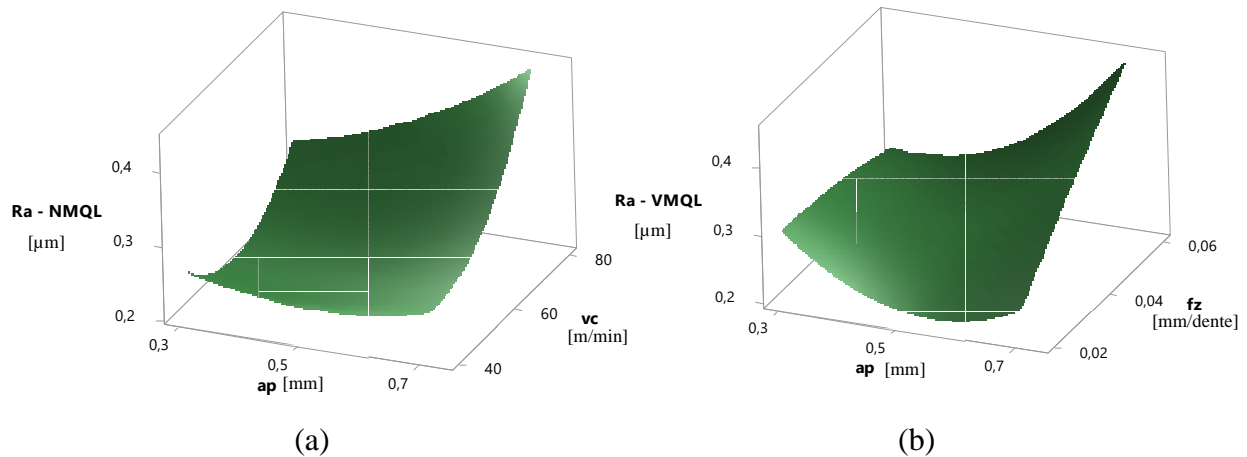


Figura 7 – Gráficos de superfície de rugosidade média com: (a) WAY-45V; (b) OMA.

Em relação a rugosidade média parcial (R_z) e a rugosidade total (R_t), o comportamento foi semelhante ao da rugosidade média (R_a), portanto, os resultados e as análises mantiveram-se proporcionalmente à R_a , conforme Apêndice A1.

3.3 Otimização

De forma a obter os parâmetros ideais para o fresamento de topo do aço inoxidável super austenítico 254 SMO a partir dos resultados obtidos, foi utilizado o software Minitab® 18, que permite a identificação das melhores combinações de parâmetros de usinagem com base nas respostas analisadas – força de usinagem (F_U) e rugosidade média (R_a). Os resultados estão apresentados na Figura 8.

Para o caso de usinagem utilizando NMQL, a combinação de parâmetros que traz a melhor otimização é a de profundidade de corte axial $a_p = 0,3$ mm, avanço por dente $f_z = 0,02$ mm/dente e velocidade de corte $v_c = 52,2$ m/min. Esses valores se assemelham aos do passe 1 ($a_p = 0,3$ mm, $f_z = 0,02$ mm/dente e $v_c = 60$ m/min), onde foram identificados baixos valores de força de usinagem ($F_U = 52$ N, o menor em relação a todos os passes) e rugosidade média ($R_a = 0,18$ µm). No fresamento utilizando VMQL, os parâmetros ótimos indicados são: profundidade de corte axial $a_p = 0,45$ mm, avanço por dente $f_z = 0,02$ mm/dente e velocidade de corte $v_c = 40$ m/min. Ressalta-se que, conforme Mello *et al.* (2012), a profundidade deve ser 2/3 (cerca de 67%) do raio de ponta da ferramenta, um valor próximo ao que apontou a otimização. O passe 9 ($a_p = 0,5$ mm, $f_z = 0,02$ mm/dente e $v_c = 40$ m/min) apresenta grande similaridade com o otimizado. Nele, os valores de força de usinagem e rugosidade média foram baixos ($F_U = 96$ N e $R_a = 0,25$ µm). Dessa maneira, compreende-se que o passe 9 atenderia de forma satisfatória a otimização se os parâmetros otimizados não pudessem ser colocados como variáveis de entrada.

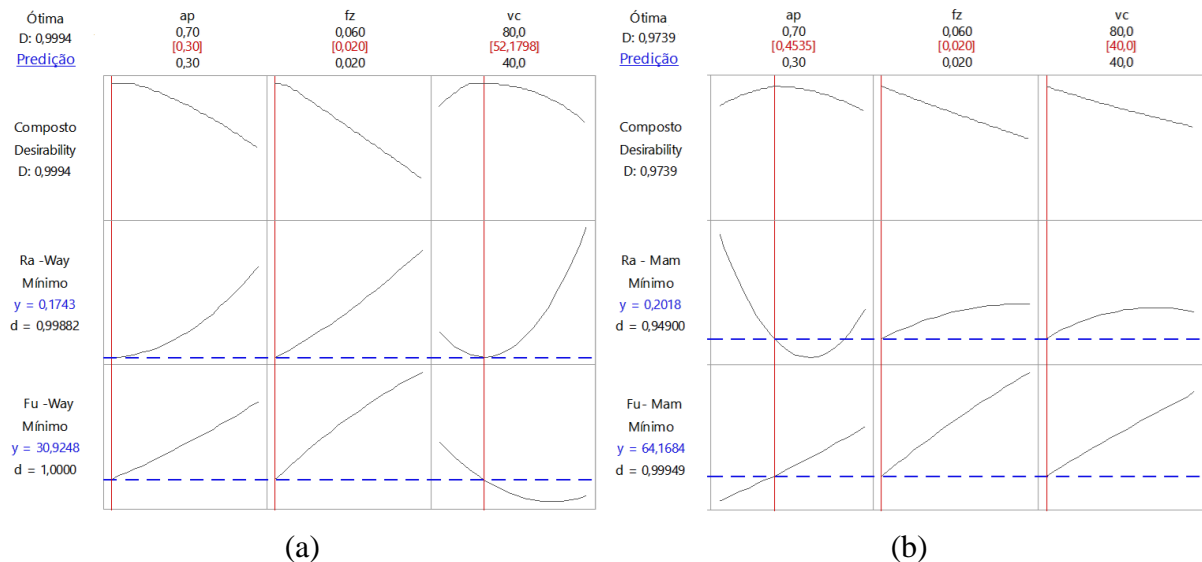


Figura 8 – Otimização multiobjetivo dos parâmetros de corte utilizando: (a) WAY-45V; (b) OMA.

Comparando-se a otimização entre os dois meios lubrificantes experimentados, percebe-se que f_z deve ser baixo em ambos os casos. A diferença está no a_p e na velocidade de corte: a v_c deve ser média quando utilizando WAY-45V e baixa quando aplicado o OMA; a a_p deve ser baixa em NMQL e média com VMQL. Essa diferença pode ter ocorrido por alguns fatores, tais quais a diferença de propriedades dos dois meios, interação do fluido com o material usinado e a própria falha da ferramenta com NMQL, que influenciou as análises estatísticas. Mais uma vez, reforça-se que, a título de validade estatística, pode-se utilizar os resultados de otimização obtidos com o VMQL como uma base sólida.

4. CONCLUSÕES

O estudo comparativo a respeito da utilização dos fluidos em mínima quantidade de lubrificação Way 45-V (NMQL) e OMA (VMQL) revelou que os resultados de força de usinagem (F_U) foram similares, principalmente nos passes de controle, onde a diferença foi apenas de 2% entre os dois meios lubrificantes. A maior diferença entre a magnitude das forças se concentrou após o passe 10, quando o NMQL registrou forças consideravelmente mais elevadas do que o VMQL devido à falha da ferramenta, o que também impactou sobre a análise estatística utilizando Way 45-V. Em consonância com a literatura, o avanço por dente (f_z) e a profundidade de corte axial (a_p) foram os parâmetros mais significativos, enquanto a velocidade de corte (v_c) se mostrou pouco influente.

Da mesma maneira, no que diz respeito à rugosidade média (R_a), os resultados foram similares e indicaram que ambos os fluidos aplicados em MQL geram excelente acabamento do aço inoxidável super austenítico 254 SMO, com valores na faixa dos $0,28 \pm 0,03 \mu\text{m}$.

Partindo-se da análise anterior dos resultados de F_U e R_a , conclui-se que ambos os meios lubrificantes apresentaram bons resultados. No entanto, o VMQL destaca-se devido às características ambientalmente amigáveis, bem como a manutenção da vida da ferramenta, apresentando estabilidade nos resultados ao longo dos quinze passes realizados.

Buscando-se a otimização multiobjetivo dos parâmetros no VMQL, percebe-se que dois dos três parâmetros analisados devem ser aplicados utilizando a configuração mínima ($f_z = 0,02 \text{ mm/dente}$ e $v_c = 40 \text{ m/min}$), enquanto $a_p = 0,45 \text{ mm}$ fica próxima a um valor intermediário. Com isso, observa-se que é possível um bom acabamento nesta configuração considerando uma profundidade de corte axial superior a $1/2$ do raio de ponta de ferramenta.

De forma a consolidar os resultados observados neste estudo, sugere-se a realização de testes adicionais para verificar se a maior vida útil da ferramenta observada com o VMQL é consistente em demais experimentos. Visto que a falha no NMQL é proveniente de efeitos aleatórios, recomenda-se a repetição dos ensaios para consolidação estatística dos resultados. Ensaios repetidos utilizando-se os mesmos parâmetros ou com parâmetros variados podem confirmar a superioridade do VMQL ou identificar os parâmetros específicos que potencializam seu desempenho. Isso proporcionará uma base mais sólida para a adoção de fluidos de base vegetal em processos industriais, promovendo uma alternativa mais sustentável e econômica na usinagem de materiais de difícil corte.

REFERÊNCIAS

Araújo Jr., A. S., 2013. **Desempenho de Óleos Vegetais Comestíveis Aplicados por MQF no Fresamento Frontal do Aço ABNT 1045**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, MG.

Astakhov, V.P., 2008. "Ecological machining: Near-dry machining". In: Davim, J.P. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**, Springer.

Baptista, A. L. B., 2002. "Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços". **Revista Escola de Minas**, Vol. 55, no. 2.

Baumgaertner Filho, A.J., 2017. **Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, UFRGS, RS.

Binayak, S., Gupta, M. K., Mia, M., Pimenov, D. Y., Mikolajczyk, T., 2021. "Performance assessment of minimum quantity castor-palm oil mixtures in hard-milling operation". **Materials**, Vol. 14, No. 1, pp. 198.

Black, J. T., 1995. "Introduction to machining processes". **Metals Handbook: Machining**. 9 ed. New York: ASM International.

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

Dixit, U. S., Sarma, D. K., Davim, J. P., 2012. **Environmentally Friendly Machining**. Springer, Nova York.

Elmunafi, M. H. S., Kurniawan D., Noordin M. Y., 2015. "Use of castor oil as cutting fluid in machining of hardened stainless steel with minimum quantity of lubricant". **Procedia CIRP**, Vol. 26, pp. 408-411.

Kaladhar, M., Subbaiah, K. V. e Rao, C. H. S, 2012. "Machining of austenitic stainless steels – review", **International Journal Machining and Machinability of Materials**, Vol. 12, no. 1-2, pp. 178- 92.

Kazeem, R.A.; Fadare, D.A.; Ikumapayi, O.M.; Adediran, A.A.; Aliyu, S.J.; Akinlabi, S.A.; Jen, T.-C.; Akinlabi, E.T., 2022. **Advances in the Application of Vegetable-Oil-Based Cutting Fluids to Sustainable Machining Operations—A Review**. *Lubricants* 2022, 10, 69. <https://doi.org/10.3390/lubricants10040069>

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

Klocke, F, 2011. **Manufacturing Processes 1 – Cutting**. Springer, Berlin-Heidelberg, RWTH edition.

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**, Vol. 25, no. 4, pp. 303-305.

Kosa, T., Ney, R. P., 1989. "Machining of stainless steels". In: **Metals Handbook: Machining**. 9 ed. New York: ASM International.

Lasch, G., Stradolini, P., Gehlen, G. S., Barros, L. Y., Poletto, J. C., Ramalho, A., Fernandes, C. M. C. G., Romio, P. C., Petzhold, C. L., Ferreira, N. F., Neis, P. D., 2024. "Comparative tribological investigation of castor oil and its transesterified and aminolyzed derivatives". In: **Tribology International**. Vol. 196, Article 109709.

Lopes, D. S. M., 2023. **Análise da Influência dos Parâmetros de Corte e das Condições Lubrificantes no Fresamento de Topo do Aço Inoxidável Super Austenítico Ultra® 254 SMO**. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRGS, RS.

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

Mello, M. S., Souza, A. J, Geier, M., 2012. **Determinação Empírica dos Parâmetros de Rugosidade R_a E R_t Aplicando Ferramenta Alisadora no Torneamento de Acabamento a Seco do Aço AISI 4140**. In: <<https://www.abcm.org.br/anais/conem/2012/PDF/CONEM2012-0086.pdf>>. Acesso em 05/06/2024.

Minitab, 2018. **StatGuide**.

Montgomery, D. C., 2013. **Design and Analysis of Experiments**. 8th ed., John Wiley & Sons, Arizona State University.

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**, Vol. 6, pp. 701-708.

Outokumpu, 2014. **254 SMO® Machining Guideline**. In: <<https://otke-cdn.outokumpu.com/-/media/files/products/ultra/outokumpu-machining-guideline-ultra-254smo.pdf>>. Acesso em 28/03/2024.

Outokumpu, 2022. **Outokumpu Ultra range datasheet: High performance steels and alloys for extremely corrosive environments**. In: <www.outokumpu.com/en/products/product-ranges/ultra>. Acesso em 20/03/2024.

Passari, É.S., Souza, A.J. & Aita, C.A.G. 2024. Machinability investigation of 254 SMO super austenitic stainless steel in end milling under different cutting and lubri-cooling conditions. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 131, pp. 6061–6073 (2024)

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**, Vol. 10, no. 4, pp. 453-460.

Polishetty, A., Alabdullah, M. F. A., Pillay, N., Littlefair, G., 2015, "A Preliminary Study on Machinability of Super Austenitic Sainless Steel". **ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition**.

Reyes, V. H. C., 2012, "**Análisis de ingeniería del sistema de sujeción de una lente sólida elástica a una montura mecánica**". Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México.

Rigatti, A. M. Y, 2010, "**Avaliação da Força de Usinagem e Energia Específica de Corte no Fresamento com Alta Velocidade de Corte**". Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP.

Santos, M. R., 2008. "**Efeito do Nitrogênio e do Cobre na Formação da Martensita em Aços Inoxidáveis Austeníticos e sua Influência sobre o Fenômeno de *Delayed Cracking***". Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

Shashidhara, Y. M., Jayaram, S. R., 2010. "Vegetable oils as a potential cutting fluid – An evolution". **Tribology International**, Vol. 43, no. 5-6, pp. 1073-1081.

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

Wang, Y.; Li, C.; Zhang, Y.; Yang, M.; Li, B.; Jia, D.; Hou, Y.; Mao, C.; 2016. "Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils". **Journal of Cleaner Production**, Vol. 127, pp. 487-499.

APÊNDICE

A1 – Valores de rugosidade média, profundidade da rugosidade e rugosidade total.

Tabela A1 – Valores de rugosidade [μm] para cada passe.

Passe	NMQL						VMQL					
	Ra		Rz		Rt		Ra		Rz		Rt	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
1	0,18	0,03	1,47	0,26	1,82	0,31	0,29	0,01	1,99	0,01	2,43	0,18
2	0,28	0,01	1,84	0,11	2,26	0,12	0,46	0,04	2,61	0,04	3,03	0,27
3*	0,26	0,02	1,67	0,15	1,97	0,21	0,25	0,02	1,75	0,02	2,51	0,20
4	0,39	0,08	2,55	0,56	3,19	0,59	0,19	0,02	1,29	0,02	1,52	0,16
5	0,28	0,02	1,89	0,16	2,25	0,29	0,27	0,02	1,84	0,02	2,32	0,15
6	0,31	0,11	2,08	0,79	2,76	1,19	0,21	0,02	1,45	0,02	1,72	0,18
7	0,28	0,02	1,80	0,06	2,20	0,24	0,34	0,06	2,32	0,06	3,14	0,29
8*	0,21	0,01	1,43	0,08	1,64	0,05	0,31	0,04	2,19	0,04	2,89	0,15
9	0,17	0,02	1,22	0,14	1,41	0,17	0,25	0,03	1,77	0,03	2,52	0,26
10	0,29	0,02	1,98	0,17	2,37	0,17	0,20	0,02	1,44	0,02	1,68	0,08
11	0,27	0,01	1,87	0,12	2,19	0,19	0,29	0,03	1,83	0,03	2,24	0,12
12	0,35	0,02	2,41	0,25	2,91	0,34	0,28	0,05	1,78	0,05	2,38	0,13
13*	0,21	0,02	1,43	0,13	1,83	0,31	0,22	0,03	1,53	0,03	1,78	0,21
14	0,25	0,02	1,71	0,05	2,14	0,18	0,30	0,04	1,87	0,04	2,20	0,25
15	0,42	0,06	2,83	0,41	3,67	0,22	0,41	0,03	2,45	0,03	2,89	0,28