

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE COMPARATIVA DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NO  
FRESAMENTO DE TOPO TERMICAMENTE ASSISTIDO E NO FRESAMENTO À  
TEMPERATURA AMBIENTE DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER AUSTENÍTICO 254 SMO

por

Pedro Nascimento dos Santos

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

### CIP - Catalogação na Publicação

Nascimento dos Santos, Pedro  
ANÁLISE COMPARATIVA DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE  
CORTE NO FRESAMENTO DE TOPO TERMICAMENTE ASSISTIDO E  
NO FRESAMENTO À TEMPERATURA AMBIENTE DO AÇO INOXIDÁVEL  
SUPER AUSTENÍTICO 254 SMO / Pedro Nascimento dos  
Santos. -- 2024.

22 f.

Orientador: André João de Souza.

Coorientador: Êmerson 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. aço inoxidável super austenítico. 2. fresamento  
de topo. 3. usinagem termicamente assistida. 4. força  
de usinagem. 5. rugosidade. I. João de Souza, André,  
orient. II. dos Santos Passari, Êmerson, coorient.  
III. Título.

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

Pedro Nascimento dos Santos

ANÁLISE COMPARATIVA DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NO  
FRESAMENTO DE TOPO TERMICAMENTE ASSISTIDO E NO FRESAMENTO À  
TEMPERATURA AMBIENTE 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. 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. Heraldo José Amorim

Prof. Dr. Liu Yesukai de Barros

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 21 de agosto de 2024.

À minha família,  
que me deu o apoio ao longo de toda essa formação.

À minha namorada Giulia,  
pelo amor, incentivo e apoio.

Aos meus amigos e colegas Matheus e Júlio,  
pela amizade e parceria durante essa formação.

## AGRADECIMENTOS

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

Ao Prof. André João de Souza, pela sua orientação ao longo da elaboração do trabalho.

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

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

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 utilizadas.

SANTOS, Pedro N. **Análise comparativa da influência dos parâmetros de corte no fresamento de topo termicamente assistido e no fresamento à temperatura ambiente do aço inoxidável super austenítico 254 SMO**. 2024. 14f. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

## RESUMO

Os aços inoxidáveis são de considerável importância para a indústria mecânica. Eles são utilizados como matéria prima para motores, chassis, trocadores de calor e outras aplicações, principalmente devido às suas propriedades mecânicas e de resistência à oxidação. Essa classe de materiais engloba os aços inoxidáveis super austeníticos, que são altamente resistentes à corrosão por pites, têm alta resistência mecânica, baixa condutividade térmica e tendem a encruar. Essas propriedades tornam a usinabilidade deste tipo de material um desafio. Dessa forma, este estudo compara os parâmetros de corte (profundidade de corte axial, avanço por dente e velocidade de corte) entre o fresamento de topo do aço inoxidável super austenítico 254 SMO em temperatura ambiente e o termicamente assistido (TAM) a uma temperatura média de 200 °C. Os resultados apontaram para um amolecimento do material, o que reduziu a força de usinagem e o desgaste da ferramenta durante a execução dos passes. As melhores condições de corte foram alcançadas na TAM em alta profundidade de corte axial e baixa velocidade de corte. O acabamento superficial foi prejudicado em comparação à condição não aquecida, o que indica que a TAM é adequada para uma situação de desbaste leve, onde a taxa de remoção de material é o foco principal em detrimento ao acabamento.

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

SANTOS, Pedro N. **Comparative analysis of the influence of cutting parameters on thermally assisted end milling and room temperature milling of super austenitic stainless steel 254 SMO**. 2024. 14f. End of Course Monography of the Undergraduate Course in Mechanical Engineering at the Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil.

## ABSTRACT

Stainless steels are of considerable importance to the mechanical industry. They are used as raw materials for engines, chassis, heat exchangers, and other applications, mainly due to their mechanical properties and oxidation resistance. This class of materials includes super austenitic stainless steels, which are highly resistant to pitting corrosion, have high mechanical strength, low thermal conductivity, and tend to work hardening. These properties make the machinability of this type of material a challenge. Thus, this study compares the cutting parameters (axial depth of cut, feed per tooth, and cutting speed) between the end milling of super austenitic stainless steel 254 SMO at room temperature and thermally assisted machining (TAM) at an average temperature of 200 °C. The results pointed to a softening of the material, which reduced the machining force and tool wear during the runs. The best cutting conditions were achieved in TAM at a high depth of cut and low cutting speed. The surface finish was impaired compared to the unheated condition, which indicates that TAM is suitable for a light roughing situation, where the material removal rate is the main focus rather than finishing.

Keywords: super austenitic stainless steel, end milling, thermally assisted machining, machining force, surface roughness.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVO .....	2
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	2
3.1	Materiais e Equipamentos .....	2
3.2	Procedimento Experimental .....	4
4	RESULTADOS.....	5
4.1	Forças de Usinagem.....	5
4.2	Desgaste da Ferramenta.....	6
4.3	Rugosidade das Superfícies .....	8
5	CONCLUSÕES .....	10
	REFERÊNCIAS .....	11
	APÊNDICES .....	13



## 1 INTRODUÇÃO

Os diferentes tipos de aços inoxidáveis evoluíram a composição de suas ligas ao longo da história. À medida que essas evoluções possibilitaram alta resistência à corrosão em elevadas temperaturas, a sua aplicabilidade aumentou consideravelmente. Assim, estes materiais podem ser usados na indústria automobilística em tubos de exaustão, motores, chassis, tubos para linhas de combustível e outras aplicações. Na indústria química, podem ser encontrados em lavadores de gases e trocadores de calor. Na indústria alimentícia, possuem grande importância, tendo em vista a facilidade de limpeza com baixa manutenção, boa resistência à corrosão, durabilidade, economia e possibilidade de reciclagem [Kaladhar *et al.*, 2012].

Os super austeníticos são aços inoxidáveis com uma estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC). Os elementos químicos que compõem sua estrutura são o ferro (Fe) com teor de até 50%, o cromo (Cr) com porcentagem mínima de 16%, o carbono (C) com percentil máximo de 15%, e uma quantidade suficiente de níquel (Ni) e manganês (Mn) que são responsáveis por sua estrutura austenítica [Porter *et al.*, 2021]. Além disso, elementos como molibdênio (Mo), cobre (Cu), titânio (Ti) e nitrogênio (N) podem ser adicionados à estrutura visando alterar as suas propriedades conforme as exigências das aplicações [Zhou, 2016]. Como exemplos de aços inoxidáveis super austeníticos (SASS – *Super Austenitic Stainless Steels*), tem-se o AL6XN, o 904L, o 254 SMO e o 654 SMO [Plaut *et al.*, 2007]. Embora as características de alta resistência à corrosão a elevadas temperaturas sejam interessantes para suas aplicações, os SASS são de difícil usinabilidade, por causa de seu endurecimento por deformação (encruamento), alta ductilidade e baixa condutividade térmica, o que dificulta a fabricação de peças em geometrias mais complexas. Essas propriedades geram problemas como a redução da vida das ferramentas de usinagem, tendo em vista que propiciam alta pressão específica de corte e cavacos longos e serrilhados [Korkut *et al.*, 2004; Kosa e Ney, 1989]. Dessa forma, buscam-se, através da experimentação, meios de melhorar a usinabilidade desse tipo de material [Kaladhar *et al.*, 2012].

A usinagem termicamente assistida (TAM – *Thermally Assisted Machining*) faz uso de fontes de calor externas para facilitar a usinagem de materiais de difícil corte. Essa característica propicia um maior tempo de vida para a ferramenta, tendo em vista que o aumento da temperatura normalmente favorece a diminuição da dureza, do encruamento e da tensão de escoamento, condições que beneficiam a usinabilidade do material. O aquecimento pode ocorrer por diferentes métodos: plasma, laser, gás, indução, corrente ou arco elétrico, ou utilizando um forno. Todos esses métodos possuem vantagens e desvantagens; contudo, destacam-se os aquecimentos por plasma e laser, que atuam exclusivamente na superfície da peça em contato com a ferramenta. Esses dois métodos proporcionam um alto gradiente de temperaturas na superfície a ser usinada, auxiliando o processo sem interferir na composição estrutural do corpo de prova [Sun *et al.*, 2010].

Diferentes estudos mostram as vantagens da TAM em materiais com baixa usinabilidade. Madhavulu e Ahmed (1994) evidenciaram ganhos no processo de torneamento do aço inoxidável martensítico SS 410 e ligas de aço (3,75 Cr, 2,72 Mo) ao aquecer a superfície a ser usinada por arco plasma. Os autores obtiveram aumento de 1,8 vezes na taxa de remoção de material, aumento de 1,67 vezes na vida da ferramenta e redução na pressão específica de corte dos materiais em comparação à usinagem a seco em temperatura ambiente. Ginta e Amin (2013) mostraram a efetividade da TAM por um pré-aquecimento de indução de alta frequência no fresamento de topo da liga de titânio Ti-6Al-4V. O estudo evidenciou que o aquecimento do material proporcionou redução das forças e das vibrações decorrentes da usinagem, resultando em aumento na vida da ferramenta e na taxa de remoção de material. Baili *et al.* (2011) também constataram redução das forças no torneamento termicamente assistido por indução de calor da liga Ti-5553. Nesse estudo, o corpo de prova foi usinado a uma temperatura de 750 °C.

Considerando o comportamento do SASS 254 SMO para usinagem em temperatura ambiente, Lopes (2023) investigou a influência dos parâmetros de corte e das condições lubrificantes no fresamento de topo desse material. O estudo apontou a falha da ferramenta

após 450 mm de comprimento usinado e concluiu que a condição em MQL proporcionou menor taxa de desgaste na ferramenta e menores forças de usinagem em comparação ao corte a seco e com fluido lubrificante em abundância.

## 2 OBJETIVO

Analisar a influência dos parâmetros de corte nas forças de usinagem, nas rugosidades das superfícies usinadas e nos desgastes da ferramenta gerados pelo fresamento de topo termicamente assistido do SASS 254 SMO em comparação ao processo em temperatura ambiente. Nesse contexto, considera-se o dispositivo desenvolvido por Azevedo (2023), cuja finalidade é aquecer por resistência elétrica corpos de prova a temperaturas entre 100 e 400 °C, e os resultados obtidos por Lopes (2023) na usinagem a seco do SASS 254 SMO. Assim, pretende-se verificar se há alguma vantagem na TAM em relação à tradicionalmente executada para esse material, dentro das condições estabelecidas.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Materiais e Equipamentos

O experimento consistiu no fresamento de topo termicamente assistido de corpos de prova em aço inoxidável super austenítico Ultra<sup>®</sup> 254 SMO. 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 deste material: dureza de 160 HB, densidade de 8,0 kg/dm<sup>3</sup>, 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<sup>®</sup> 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
Medido	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

O corpo de prova com dimensões de 70 x 30 x 10 mm (Fig. 1a) foi dimensionado para ser fixado e aquecido no dispositivo desenvolvido por Azevedo (2023). O equipamento faz o uso de uma fonte resistiva para aquecer a peça à temperatura de 200 °C, mantendo essa condição durante a usinagem (Fig. 1b). Esse dispositivo é parafusado sobre o dinamômetro piezelétrico para a aquisição de sinais de força durante a usinagem. As temperaturas do corpo de prova durante o ensaio foram monitoradas pelo termógrafo Electrophysics EZTherm 876 Series (Fig. 1c). A emissividade foi determinada experimentalmente através da medição da temperatura por meio de um termopar tipo K, aquecido por um soprador térmico SKIL 8003. A emissividade convergiu para o citado por Bergman *et al.* (2011) como o valor característico de superfícies polidas.

A máquina-ferramenta utilizada na experimentação foi o centro de usinagem ROMI Discovery 308 (Fig. 2a) disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS-UFRGS). A máquina possui comando numérico computadorizado (CNC) Mach 3 e motor do eixo-árvore com potência máxima de 5,5 kW e rotação máxima de 4000 rpm. A ferramenta de corte empregada foi a fresa de topo Walter Tools Xtra-tec<sup>®</sup> F4042R.W20.02, com diâmetro de 20 mm, e suporte para dois insertos Walter Tools Tiger-tec Silver<sup>®</sup> ADMT10 classe WSM35S, com raio de ponta  $r_\epsilon = 0,8$  mm, geometria alisadora e revestimento PVD TiAlN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Fig. 2b).

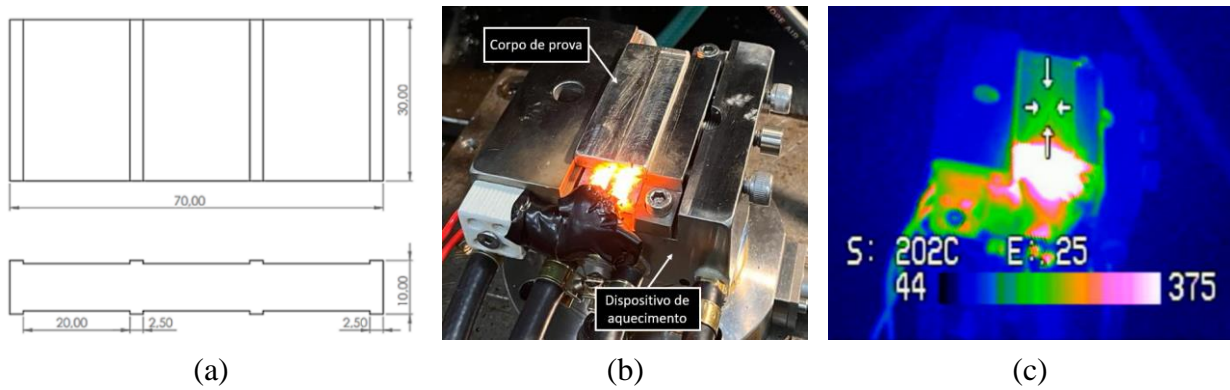


Figura 1 – (a) Geometria e dimensões dos corpos de prova; (b) Dispositivo de fixação e aquecimento dos corpos de prova; (c) Imagem obtida pelo termógrafo do corpo de prova aquecido a 200 °C.

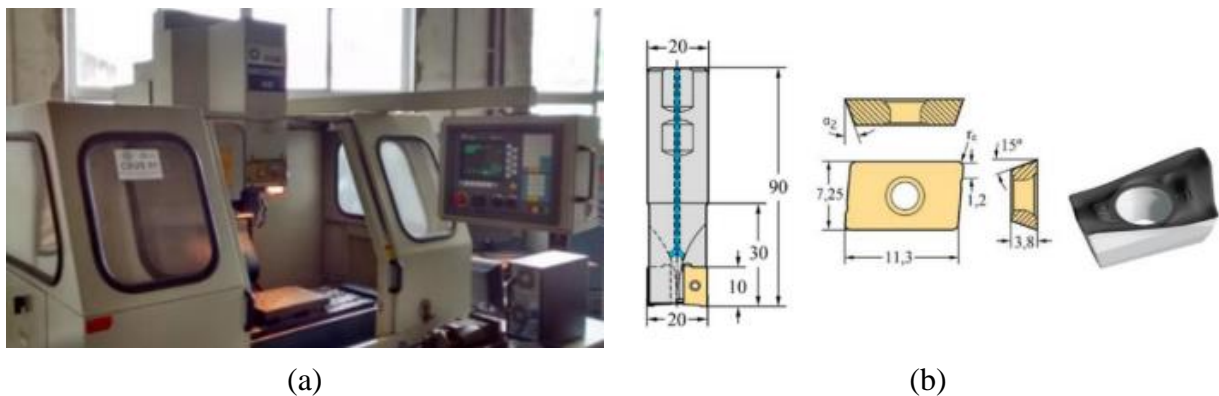


Figura 2 – (a) Centro de Usinagem ROMI Discovery 308; (b) Geometria da ferramenta de corte [Walter Tools, 2012].

Durante a usinagem, as forças  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  medidas pelo dinamômetro piezelétrico estacionário Kistler 9272 (Fig. 3a) foram adquiridas nas três direções ortogonais ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Tais grandezas foram condicionadas a partir do amplificador de carga Kistler 5070A, com entrada de quatro canais e faixa de medição de  $\pm 10$  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 de dados foi feito através do software LabVIEW 9.0 com uma taxa de aquisição de 1,0 kHz. A Figura 3b mostra o esquema do sistema monitor, disponível no LAUS, adaptado para a aquisição de sinais de força em fresamento. 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).

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

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

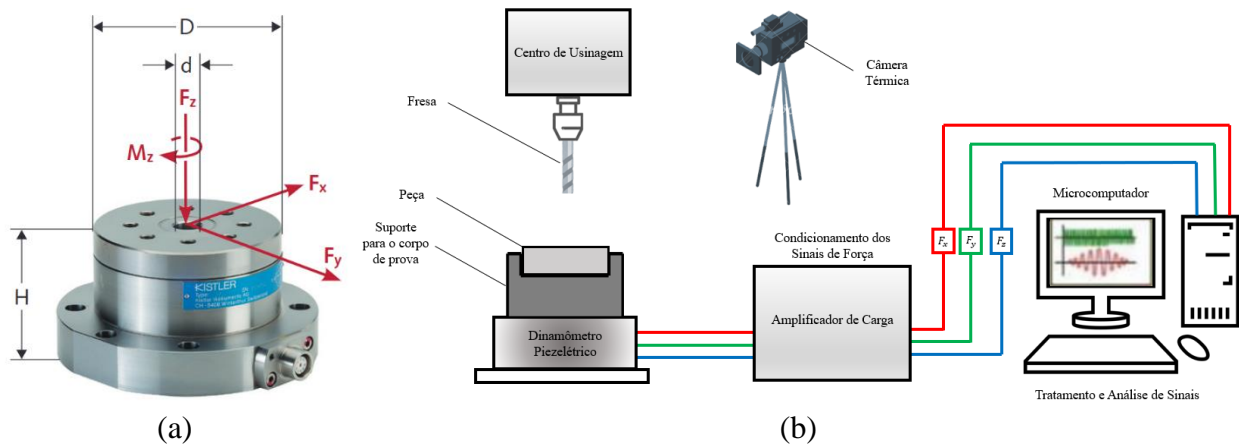


Figura 3 – (a) Dinamômetro piezoelétrico Kistler 9272 [Kistler, 2019]; (b) Arquitetura do sistema de aquisição de sinais de força (cortesia do LAUS).

Após a usinagem, as rugosidades dos corpos de prova foram medidas utilizando o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201P, com resolução de  $0,01 \mu\text{m}$  (Fig. 4a). Sua agulha possui um raio de ponta de  $5 \mu\text{m}$  e aplica uma força de  $0,004 \text{ N}$  durante as medições. Para tanto, utilizou-se um comprimento de amostragem  $l_e = 0,8 \text{ mm}$ , um comprimento de medição  $l_m = 5 \cdot l_e = 4 \text{ mm}$  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 ( $\pm\text{DP}$ ) de cinco pontos medidos no intervalo estável de usinagem. A supervisão do desgaste e de possíveis avarias da ferramenta foi feita por meio microscópio digital USD Dino Lite AM413-ZT (Fig. 4b). Utilizou-se como limiar uma falha com largura (L) maior ou igual a  $0,3 \text{ mm}$  na aresta secundária de corte (de acordo com Passari *et al.*, 2024), conforme descrito pela NBR ISO 3685/93.



Figura 4 – (a) Rugosímetro Mitutoyo SJ-201P; (b) Microscópio Dino Lite AM413-ZT.

### 3.2 Procedimento Experimental

A Tabela 2 mostra as 15 combinações dos parâmetros de corte (velocidade de corte  $v_c$ , avanço por dente  $f_z$  e profundidade de corte  $a_p$ ) definidas por Lopes (2023) e replicadas na usinagem termicamente assistida do presente estudo. Os níveis considerados para os parâmetros de corte da Tabela 2 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]. Nota-se a variação de um parâmetro diferente a cada cinco passes, enquanto os demais são mantidos constantes em nível médio. Os passes 3\*, 8\* e 13\* são utilizados como referência por possuírem os mesmos níveis de parâmetros de corte. Tal fato permite avaliar se as

forças de usinagem foram afetadas por fatores não controláveis de entrada como desgastes e avarias na ferramenta de corte.

Tabela 2 – Níveis dos parâmetros selecionados por Lopes (2023) para a execução dos passes.

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

## 4 RESULTADOS

Para interpretar claramente os dados resultantes do procedimento experimental, a análise dos resultados foi dividida em três partes: forças de usinagem medidas durante o fresamento de topo do aço inoxidável super austenítico 254 SMO, desgaste da ferramenta de corte WSM35S durante o processo e rugosidade superficial do corpo de prova. Essa divisão permite observar graficamente as diferenças entre o presente estudo e o realizado por Lopes (2023) em cada um desses aspectos.

### 4.1 Forças de Usinagem

O gráfico mostrado na Figura 5 expõe as forças de usinagem ( $F_U$ ) medidas no processo termicamente assistido (TAM), obtidas através do experimento realizado. Junto a elas, estão expostas no gráfico as forças de usinagem ( $F_U$ ) encontradas por Lopes (2023) no fresamento a seco (à temperatura ambiente). Nota-se um crescimento linear acentuado durante os cinco primeiros passes, indicando que a profundidade de corte ( $a_p$ ) exerce forte influência na condição termicamente assistida, parâmetro que também foi influenciador no experimento a seco. Comparando as forças obtidas durante a variação da profundidade de corte, percebe-se que para maiores  $a_p$  a condição TAM obteve forças menores, o que pode estar relacionado com a redução da resistência mecânica através do amolecimento térmico do material, o que facilita a usinagem. Assim como observado no processo à temperatura ambiente, as forças de usinagem do passe 6 a 10 cresceram de forma semelhante à linear, conforme houve a variação do avanço por dente ( $f_z$ ). Contudo, tal crescimento mostrou-se menos acentuado em comparação ao observado nos cinco primeiros passes, indicando que a profundidade de corte ( $a_p$ ) exerce maior influência sobre as forças de usinagem resultantes do que a variação do avanço por dente ( $f_z$ ). A influência observada dos parâmetros  $a_p$  e  $f_z$  nas forças de usinagem deve-se à sua relação com a área da seção transversal de corte. Conforme esses parâmetros são alterados, a área da seção transversal é modificada, o que explica o aumento das forças envolvidas durante a usinagem [Machado *et al.*, 2011].

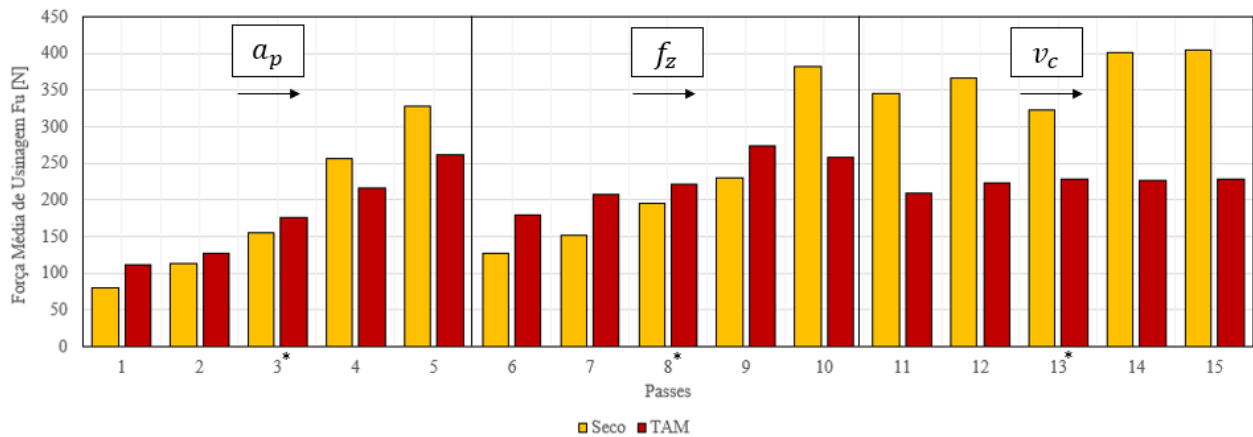


Figura 5 – Gráfico comparativo das forças de usinagem medidas para todos os passes realizados.

Observa-se que as forças de usinagem ( $F_U$ ) registradas para a TAM, em geral, obtiveram valores menores do que as registradas por Lopes (2023) no processo a seco, principalmente a partir do passe 10, onde o valor médio de  $F_U$  na TAM foi 23,4% menor em relação ao valor médio de  $F_U$  à temperatura ambiente. Além disso, a variação dos valores de  $F_U$  na TAM foi menor, indicando que possivelmente houve menor desgaste da ferramenta. É relevante notar que, nas condições de variação de  $a_p$  e  $f_z$ , os valores de  $F_U$  nos passes iniciais foram menores no fresamento a seco que no termicamente assistido. No entanto, à medida que as condições de corte se intensificaram, os valores de  $F_U$  registrados à temperatura ambiente superaram os adquiridos na condição aquecida. Entre os passes 11 e 15, nota-se um comportamento aproximadamente constante das forças de usinagem ( $F_U$ ) em torno da média de 223 N para o caso da TAM, conforme é aumentada a velocidade de corte ( $v_c$ ). É perceptível a grande diminuição das forças de usinagem para esses passes em relação à condição a seco; no caso, diferença entre os valores de força nas condições sem e com aquecimento chegou a 145 N. Essa manutenção de valores baixos de forças durante a variação de  $v_c$  indica para a TAM a ocorrência do amolecimento do material e a redução do encruamento, bem como um melhor estado da ferramenta durante a usinagem [Grzesik e Ruszaj, 2021]. Ao se comparar as forças resultantes dos passes de referência na TAM (3\*, 8\* e 13\*), é perceptível uma variação não significativa. Tal fato indica uma menor influência do desgaste da ferramenta no processo, o que tende a aumentar a sua vida. A Tabela 3 mostra os desvios-padrões ( $\pm DP$ ), as médias e os coeficientes percentuais de variação para os passes de referência nas condições de usinagem a seco e termicamente assistida, tornando evidente as suas diferenças.

Tabela 3 – Média, desvio-padrão e coeficiente de variação para as condições a seco e TAM.

	A Seco	TAM
Média	225 N	209 N
Desvio-Padrão ( $\pm DP$ )	87 N	28 N
Coeficiente de Variação	39%	14%

## 4.2 Desgaste da Ferramenta

Durante a usinagem termicamente assistida, foram registrados, a cada três passes, os desgastes da ferramenta na aresta secundária – local onde ocorre desgaste mais severo durante o fresamento de topo do SASS [Passari *et al.*, 2024]. A Figura 6 mostra imagens que retratam a progressão da falha (largura L) ao longo do experimento. Nota-se que para os primeiros quatro corpos de prova, houve desgastes com larguras de 0,024 mm, 0,098 mm, 0,106 mm e 0,126 mm, respectivamente. Após a execução dos 15 passes, o desgaste no flanco secundário foi de 0,435 mm.

Além disso, notou-se a ocorrência de material aderido na ponta da ferramenta e um pequeno lascamento na aresta.

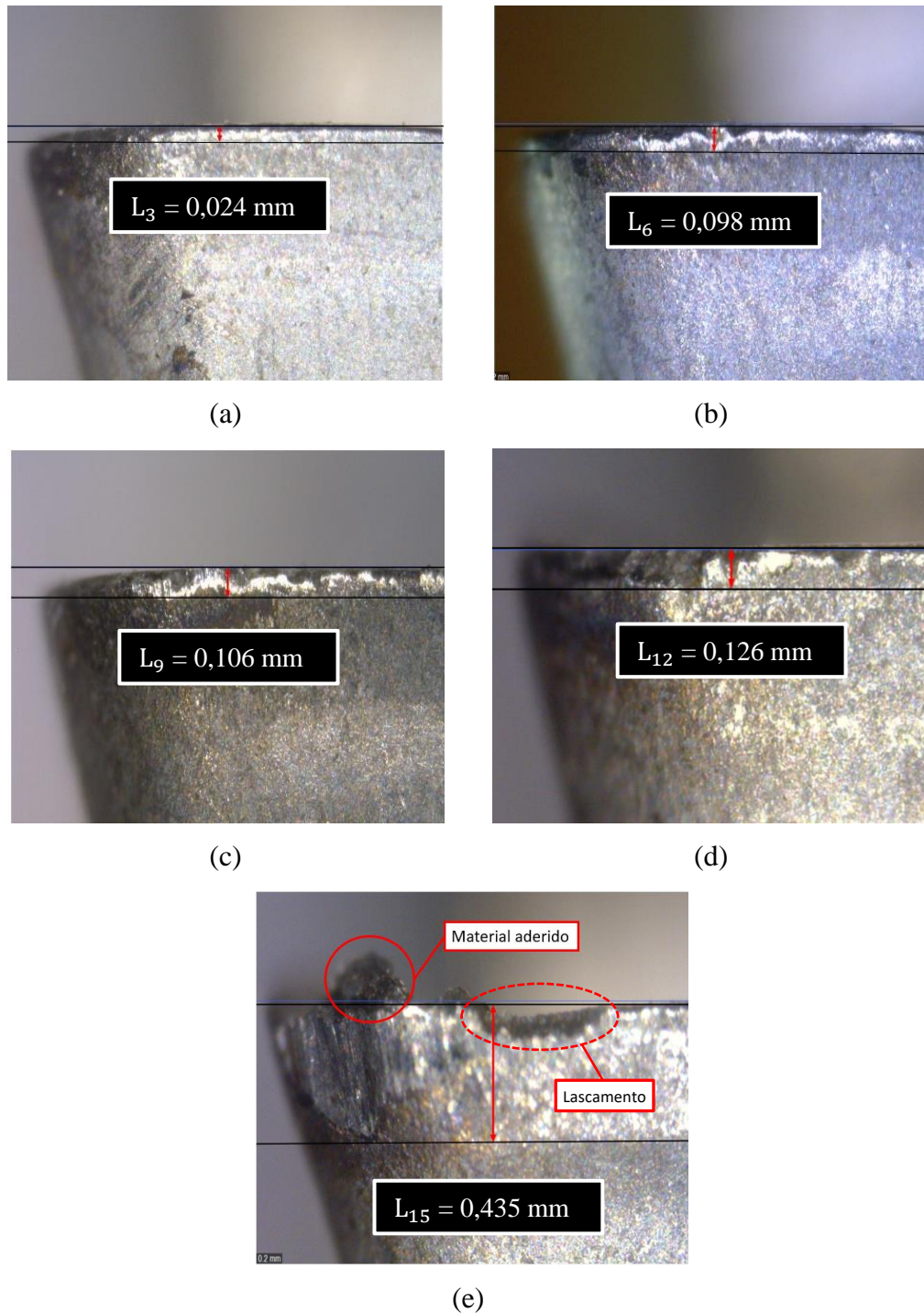


Figura 6 – Estado da ferramenta após: (a) passe 3; (b) passe 6; (c) passe 9; (d) passe 12; (e) passe 15.

A Figura 7 mostra o gráfico da progressão da largura da falha (desgaste de flanco) observada na aresta secundária do inserto na condição TAM durante o experimento, e os valores obtidos por Lopes (2023) na condição a seco para efeito comparativo. Na TAM, observam-se valores inferiores de desgaste em relação aos obtidos na condição à temperatura ambiente. A ocorrência de menores larguras de desgastes para a TAM indica um aumento na vida da ferramenta, e está diretamente relacionada com a diminuição nas forças de usinagem, ocasionadas

pela redução do encruamento e pelo amolecimento térmico do material. A temperatura elevada durante a usinagem alivia as tensões internas do material e diminui a resistência ao escoamento, permitindo que o material se deforme e seja removido mais facilmente [Grzesik e Ruszaj, 2021].

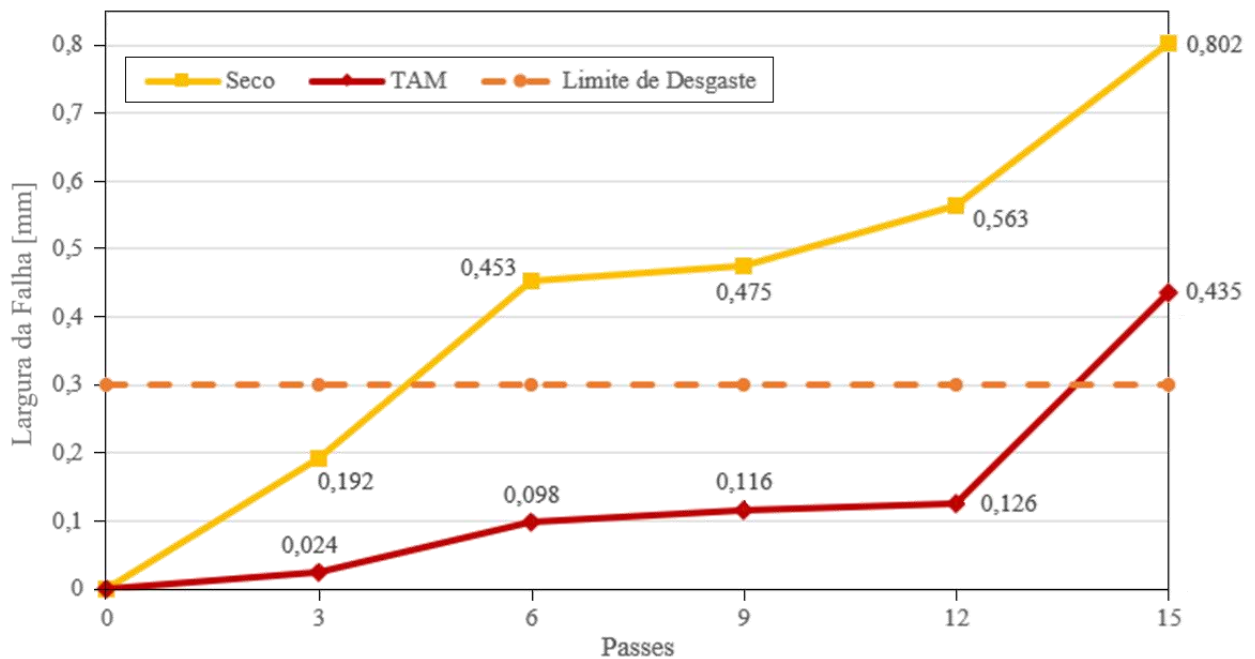


Figura 7 – Largura da falha na aresta secundária da ferramenta durante o fresamento.

#### 4.3 Rugosidade das Superfícies

De forma análoga ao apresentado para as forças de usinagem, a Figura 8 apresenta as rugosidades médias ( $R_a$ ) medidas nas superfícies usinadas dos corpos de prova em função dos passes executados no presente estudo e no realizado por Lopes (2023) para a condição a seco. As barras de erros representam os desvios-padrões ( $\pm DP$ ) obtidos para cada um dos passes.

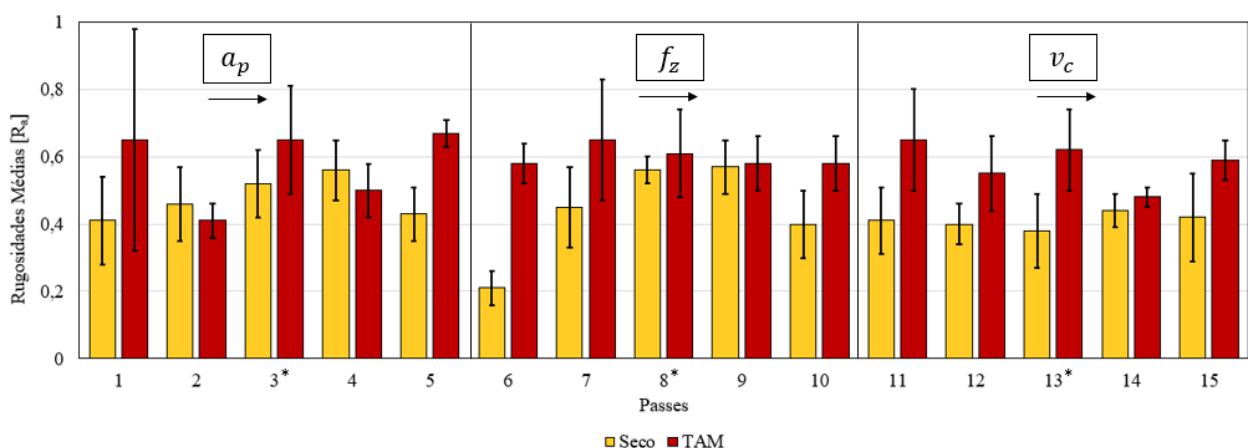


Figura 8 – Gráfico comparativo das rugosidades superficiais médias para os passes realizados.

Os valores de rugosidade média medidos foram  $R_a = 0,58 \pm 0,11 \mu\text{m}$  para o experimento executado (TAM), mostrando uma dispersão mais elevada nos resultados obtidos em comparação à condição a seco. De acordo com a NBR 8404 (1984), a rugosidade média encontrada na TAM ao longo dos 15 passes pode ser classificada como classe N6 ( $0,4 \mu\text{m} < R_a < 0,8 \mu\text{m}$ ). Tal



classificação também é aplicável ao valor encontrado por Lopes (2023) na usinagem em temperatura ambiente ( $R_a = 0,44 \pm 0,09 \mu\text{m}$ ). Apesar da mesma classificação, verificou-se a partir da Figura 8 que os valores de rugosidade foram cerca de 32% maiores na TAM que na usinagem à temperatura ambiente.

Ao analisar os valores obtidos para as rugosidades parciais ( $R_z$ ) e rugosidades totais ( $R_t$ ) nota-se um comportamento semelhante ao encontrado para  $R_a$ , onde a TAM resultou em valores maiores. A Tabela 3 mostra o resumo dos valores médios das rugosidades  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$  e os respectivos desvios-padrões ( $\pm\text{DP}$ ) para todas as condições. Nas Tabelas A2 e A3 do Apêndice são apresentados os valores de  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$  para cada um dos passes de ambas as condições.

Tabela 3 – Resumo das médias dos valores de rugosidade dos 15 passes executados.

Parâmetro	Seco		TAM	
	Média	$\pm\text{DP}$	Média	$\pm\text{DP}$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,44	0,09	0,58	0,11
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,77	0,61	3,52	0,53
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,49	0,96	4,81	1,28

Visando um melhor entendimento da rugosidade superficial na TAM, um corpo de prova foi submetido à análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Conforme a Figura 9a, que mostra a superfície gerada pelo passe 5, é perceptível a presença de partículas (debris) aderidas na superfície com tamanhos e geometrias variadas. Essas partículas possivelmente se desprendem da aresta postiça em formação durante a usinagem, diretamente para a superfície usinada ou se soltam do material aderido à ferramenta, sendo incorporadas ao cavaco e depositadas posteriormente sobre a superfície, conforme ocorre o cisalhamento do cavaco. Esse processo é mostrado pela Figura 9b.

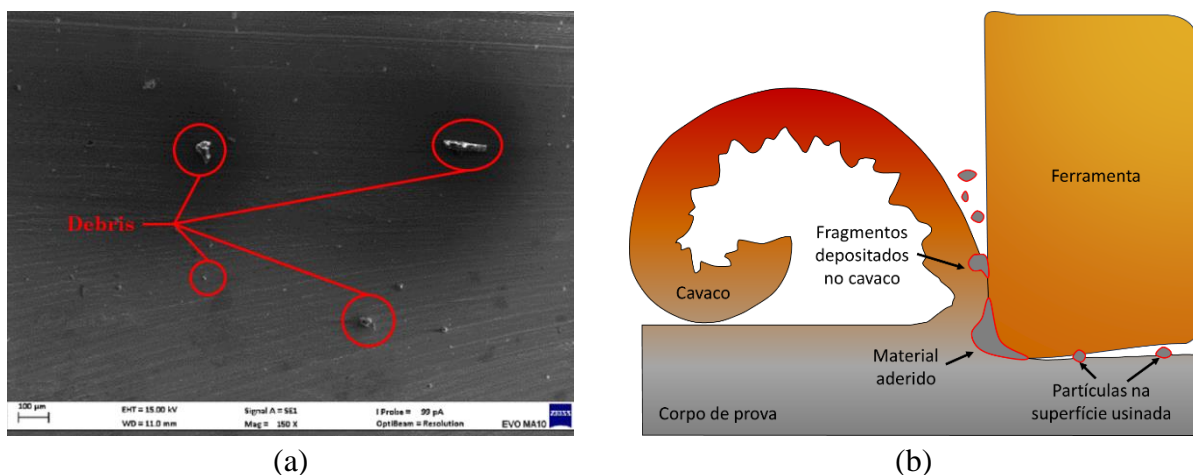


Figura 9 – (a) Superfície do corpo de prova gerada pelo passe 5; (b) Formação de debris encontrados na superfície do corpo de prova.

Li *et al.* (2023) observaram a presença de particulados (debris) sobre a superfície usinada da liga Ti-6Al-4V após o aumento da velocidade de corte, quando ocorreu um aumento da temperatura na zona de corte. Os autores citam que isso se deve, em parte, à oxidação de partículas do material dispersas no ar que se reconectam à superfície usinada. Conforme Ahmed e Mulapeer (2022), o aquecimento do SASS 254 SMO implica em uma redução de dureza e resistência mecânica, favorecendo a deformação plástica, que facilita a adesão de particulados em comparação com a condição de usinagem à temperatura ambiente.

Vale ressaltar que, diferentemente da condição a seco, as rugosidades para a usinagem termicamente assistida foram pouco sensíveis à variação dos parâmetros de corte, indicando que a formação de debris ocorreu durante todos os passes executados.

## 5 CONCLUSÕES

O fresamento de topo termicamente assistido do aço inoxidável super austenítico 254 SMO apresentou melhoras na usinabilidade do material em relação ao processo a seco à temperatura ambiente, investigado por Lopes (2023). Esse fato pode ser sustentado pela redução da falha na ferramenta de corte, pois notou-se que o desgaste na aresta secundária de corte ao final do passe 15 observado para a TAM (0,435 mm) foi menor que o observado no passe 6 para a condição a seco do estudo anterior (0,453 mm). Ao se comparar as larguras das falhas após os 15 passes nas duas condições, observou-se valores cerca de 54% menores na TAM.

Na análise das forças de usinagem ( $F_U$ ), foi perceptível a influência da profundidade de corte ( $a_p$ ) e do avanço por dente ( $f_z$ ) no aumento dos valores de  $F_U$ . Isso ocorreu devido ao aumento da área da seção transversal de corte com o incremento de  $a_p$  e/ou  $f_z$ . Contudo, não houve alteração significativa nos valores de  $F_U$  com a variação da velocidade de corte ( $v_c$ ), mantendo-se em torno de 223 N. Os comportamentos observados para a TAM são semelhantes aos observados no estudo anterior para a usinagem a seco. No entanto, a TAM apresentou um comportamento mais estável, sem a presença de picos elevados da força média registrada durante a execução dos passes. Tal fato está relacionado com a menor ocorrência de falhas na ferramenta durante a usinagem do SASS nessa condição. Lopes (2023) registrou a ocorrência de falha na ferramenta após o passe 9, onde a largura de desgaste superou 0,3 mm; isso influenciou os valores de  $F_U$  na execução dos passes onde a  $v_c$  foi variada. Na TAM, menores valores de  $F_U$  foram observados a partir do passe 9, e ao comparar as intensidades no passe 15, observou-se um valor 23,4% menor em relação ao fresamento à temperatura ambiente.

Apesar de as rugosidades das superfícies usinadas obtidas em ambas as condições (fresamento com e sem aquecimento controlado) estarem classificadas como classe N6 segundo a NBR 8404 (1984), notou-se que os valores de rugosidade média ( $R_a$ ) para a TAM foram cerca de 32% maiores o que as obtidas em temperatura ambiente. Isso ocorreu devido à redução da dureza e da resistência mecânica por causa do aquecimento à temperatura de 200 °C, que favoreceu a deformação plástica e a adesão de particulados desprendidos do material aderido à ferramenta (debris) na superfície usinada.

De maneira geral, conclui-se que os resultados obtidos para a aplicação da TAM foram eficientes na redução das forças de usinagem e no aumento de vida da ferramenta. Em comparação ao fresamento a seco (em temperatura ambiente), as melhores condições de corte foram desempenhadas com alta  $a_p$  e baixa  $v_c$ . Assim, o fresamento de topo termicamente assistido do aço inoxidável 254 SMO pode ser indicado para uma operação de desbaste leve, onde a taxa de remoção de material é o foco principal, em detrimento ao acabamento (que foi melhor na usinagem a seco). Por fim, o ponto positivo da condição estudada nesse trabalho é a não utilização de fluidos lubrificantes, que torna o processo ambientalmente amigável.

Para estudos futuros, aconselha-se um estudo sobre o impacto da velocidade de corte na vida da ferramenta durante a TAM. Outro ponto a ser aprofundado é a temperatura ideal para o fresamento de topo do aço inoxidável 254 SMO, visando a potencialização dos benefícios obtidos. Por fim, sugere-se um estudo para a identificação estatística do percentual de influência da temperatura no processo de usinagem deste material.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- Azevedo, M., 2023. **Projeto e fabricação de dispositivo de fixação com controle de temperatura para fresamento termicamente assistido**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Baili, M., Wagner, V., Dessen, G., Sallaberry, J., 2011. “An Experimental Investigation of Hot Machining with Induction to Improve Ti-5553 Machinability”. **Applied Mechanics and Materials**, v. 62, p. 67-76.
- Bergman, T. L., Incropera, F. P., Lavine, A. S., DeWitt, D. P., 2011. **Introduction to Heat Transfer.** John Wiley & Sons.
- Ginta, T. L. and Amin, A. K. M. N., 2013. “Thermally-assisted end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using induction heating”. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 14, n. 2, p. 194.
- Grzesik, W.; Ruszaj, A., 2021. **Hybrid Manufacturing Processes**. [s.l.] Springer International Publishing.
- Kaladhar, M., Subbaiah, K. V., 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, 2019. **Cutting force measurements in research and development - High-precision measurement systems for metal-cutting production**, Winterthur, Switzerland, 52p.
- 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. and Ney, R. P., 1989. “Machining of stainless steels”. In: **ASM Handbook, Volume 16 – Machining**, ASM International.
- Li, C., Chen, J., Li, S., Xu, M., Liu, X., Wei, R., Li, C., Ko, T. J., 2023. “Study of chip adhesion behavior in titanium alloy dry milling process based on image extraction technology”. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 126, No. 5, pp. 2633-2645
- Lopes, D., 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 em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Machado, A.; Abrão, A.; Coelho, R.; Silva, M., 2011. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. rev. São Paulo, SP: Edgar Blücher.
- Madhavulu, G. and Ahmed, B., 1994. “Hot machining process for improved metal removal rates in turning operations”. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 44, n. 3-4, p. 199-206.

NBR 8404, 1984. “Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos”. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, 10p.

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](http://www.outokumpu.com/en/products/product-ranges/ultra)>. Acesso em 20/03/2024.

Passari, É. S., Souza, A. J., Aita, C. A., 2024. “Machinability investigation of 254 SMO super austenitic stainless steel in end milling under different cutting and lubri-cooling conditions”. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-13.

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.

Porter, D. A., Easterling, K. E., Sherif, M. Y., 2021. **Phase Transformations in Metals and Alloys**.

Sun, S., Brandt, M., Dargusch, M. S, 2010. “Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials – A review”. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 8, p. 663-680.

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

Zhou, N., 2016. **Influence of grinding operations on surface integrity and chloride induced stress corrosion cracking of stainless steels**. 71f. Thesis (Licentiate Thesis in Chemistry) - Royal Institute of Technology, School of Chemical Science and Engineering, Stockholm, Sweden.

## APÊNDICES

## A1 – Valores das Forças de Usinagem

Tabela A1 – Valores de força de usinagem [N] para as duas condições em comparação.

Passe	Seco	TAM
1	147	211
2	223	260
3	304	355
4	462	422
5	542	492
6	198	302
7	244	345
8	282	406
9	334	478
10	599	479
11	496	352
12	517	319
13	467	361
14	552	374
15	555	425

## A2 – Valores de Rugosidade

Tabela A2 – Valores de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ] para usinagem a seco.

Passe	Seco					
	$R_a$		$R_z$		$R_t$	
	Média	$\pm\text{DP}$	Média	$\pm\text{DP}$	Média	$\pm\text{DP}$
1	0,41	0,13	2,83	0,81	3,67	1,61
2	0,46	0,11	3,00	0,9	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	0,7
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	3,7	0,88
15	0,42	0,13	2,68	0,68	3,33	1,03

Tabela A3 – Valores de rugosidade [ $\mu\text{m}$ ] para usinagem termicamente assistida.

Passe	TAM					
	$R_a$		$R_z$		$R_t$	
	Média	$\pm\text{DP}$	Média	$\pm\text{DP}$	Média	$\pm\text{DP}$
1	0,65	0,33	2,95	1,17	5,10	3,16
2	0,41	0,05	2,53	0,33	3,33	0,58
3	0,65	0,16	3,23	0,61	4,58	1,45
4	0,5	0,08	3,13	0,29	3,81	0,43
5	0,67	0,04	3,76	0,58	4,95	1,54
6	0,58	0,06	3,42	0,36	4,67	0,7
7	0,65	0,18	3,60	0,52	4,61	1,16
8	0,61	0,13	3,53	0,32	4,74	0,93
9	0,58	0,08	3,45	0,26	4,53	0,69
10	0,58	0,08	3,66	0,25	4,44	0,58
11	0,65	0,15	4,26	0,96	6,80	2,54
12	0,55	0,11	3,76	0,50	5,33	1,11
13	0,62	0,12	4,19	0,83	5,87	1,33
14	0,48	0,03	3,32	0,42	4,46	1,67
15	0,59	0,06	3,98	0,49	4,99	1,39