

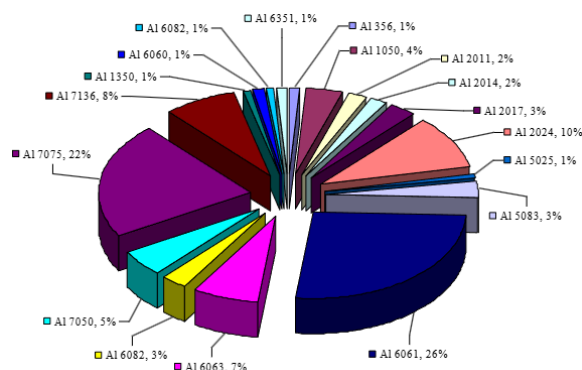


Figura 1: O uso do alumínio na indústria aeroespacial entre os anos de 2005 e 2019 (TİTİU et al., 2020)

O trabalho de Lindner et al. (2021) focou em analisar a influência das condições de corte para a formação de rebarbas da liga 6063 T5. Para isso, ele utilizou um Centro de Usinagem CNC (Discovery 300 da Romi) com uma fresa de topo com diâmetro fresa = 16 mm com dois insertos intercambiáveis de metal duro, marca LAMINA Technologies, tipo APGT 100304. No experimento, ele variou dois parâmetros: a velocidade de corte utilizando 175 e 350 m/min e penetração variando de 4 para 12 mm, com os sentidos de corte da fresa tipo discordante e concordante e logo em seguida, a altura da rebarba foi medida em três pontos diferentes de cada amostra utilizando um paquímetro digital de precisão. Como resultado, obteve que a direção de movimento da fresa do tipo concordante é um dos parâmetros que mais afeta a formação das rebarbas e que a velocidade de corte alta formou menos rebarbas.

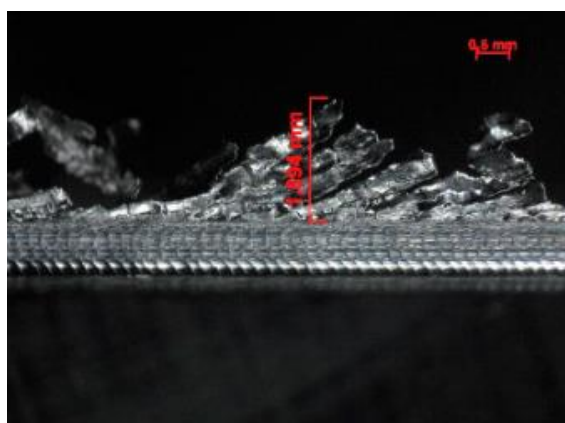


Figura 2: Rebarbas formadas. Fonte: Lindner et al. (2021)

Corroborando com os resultados anteriores, Daniyan et al. (2020) projetou um processo de otimização dos parâmetros para o fresamento da liga de alumínio

AA6063 T6. Utilizando uma fresadora CNC de 5 eixos DMU80monoBLOCK Deckel Maho e uma pastilha de corte de metal duro (CKT1204MO-PM S40T), o experimento foi realizado variando diferentes velocidades de corte (de 120 a 150 m/min) e avanços (0,6 a 2,0 mm/min), foram coletados em tempo real por meio do Sistema de Aquisição de Dados (DAS) conectado no computador. Para encontrar os melhores parâmetros, foi utilizado a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) e a Central Composite Design (CCD) que determinam os efeitos individuais e combinados dos parâmetros na taxa de remoção de material. Ao fim do experimento, foi percebido que o modelo desenvolvido é confiável para a previsão da taxa de remoção de material e que o melhor conjunto de parâmetros é: a maior velocidade de corte analisada de 150 m/min, profundidade de corte de 0,01 mm e avanço de 2,0 mm/min. Foi ressaltado no trabalho que a otimização dos parâmetros pode reduzir o consumo energético, a emissão de carbono e o custo operacional.

Como observado nos trabalhos anteriores, a otimização dos parâmetros de corte no fresamento de ligas de alumínio garante benefícios em muitos sentidos. Por isso, esse trabalho tem por objetivo estudar parâmetros de corte que possam gerar superfícies fresadas com baixos valores de rugosidade, menores rebarbas e poucos defeitos superficiais, através da variação dos valores de avanço por dente e da velocidade de corte.

MATERIAL E MÉTODO

Para simplificar o processo de execução do experimento foi dividido em duas etapas, onde será abordado as metodologias, equipamentos utilizados e as variáveis de entrada e saída que serão necessárias para avaliar o acabamento final:

1. Variáveis de entrada

O material que foi usinado é a liga de alumínio 6205, cuja a composição química podem ser observadas na Tabela 1 e as propriedades mecânicas na Tabela 2.

Tabela 1. Composição química da liga 6205

Elemento	Al	Mg	Si	Zn	Mn	Cr
%	98,4	0,5	0,8	0,1	0,1	0,1

Tabela 2. Propriedades mecânicas

Propriedades	Valores
Resistencia a tração	260 MPa
Módulo de elasticidade	69.000 MPa
Limite de escoamento	140 MPa

Alongamento	19%
Dureza	75 Brinell
Densidade	2, 71 g/cm ²

Os ensaios foram conduzidos em uma fresadora universal (YOS, modelo FA3AU), equipada com motor principal de 5,8 kW e uma amplitude de avanço de 14 a 900 mm/min. A seleção da ferramenta baseou-se em estudos procedentes como os de Daniyan et al. (2021) e Lucas et al. (2022), que apresentam bons resultados com uma fresa de metal duro de topo reto na usinagem de ligas de alumínio das series 6XXX. E ainda seguindo a literatura, utilizou-se uma fresa com 5 mm de diâmetro com revestimento de Nitreto de Titânio e Alumínio (AlTiN).



Figura 3: Conjunto de peça, ferramenta e morça utilizados para a usinagem.

Para avaliar a qualidade superficial, foram escolhidos as seguintes variações de parâmetros de corte:

- i. A penetração de trabalho (a_e) foi escolhida com base no diâmetro da fresa, com 5 mm de diâmetro, pois foram feitos canais para a observação dos efeitos da variação dos parâmetros ;
- ii. A velocidade de corte (V_c) foi escolhida com base na capacidade da máquina-ferramenta, variando os valores 15,7 m/min (1.000 rpm), 21,9 m/min (1.400 rpm) e 31,4 m/min (2.000 rpm) ;
- iii. Como visto em algumas literaturas, a influencia da profundidade de corte ser menor na qualidade superficial, não houve variação nesse parâmetro e com a finalidade de diminuir os esforços na ferramenta foi escolhido o valor de 0,26 mm ;

- iv. O avanço por dente não será variado, mantendo-se em 0,028 mm/dente, para que se possa manter a pressão específica do corte por dente constante entre os canais e não alterar a espessura do cavaco que for formado.

Com os parâmetros determinados, foram usinados 6 canais, três variando a velocidade de corte e foram feitas réplicas de cada canal para garantir maior credibilidade e criar uma relação de comparação entre os canais, sendo assim melhor representado a relação dos parâmetros e nominando os canais na tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de corte que serão variados

Canais	V_c	Rotação
A	15,7 m/min	1.000 rpm
B	21,9 m/min	1.400 rpm
C	31,4 m/min	2.0 m

Os dados na Tabela 4 são os parâmetros que não serão variados mas foram selecionados com base em trabalhos anteriormente citados. Por se tratarem de variáveis que foram citadas com pouca relevância para a melhora no aspecto superficial da peça.

Tabela 4. Parâmetros de corte que não serão variado

Avanço por dente (fz)	Penetração de trabalho de trabalho (a_e)	Profundidade de corte (ap)
0,028 mm/dente	5 mm	0,2

2. Variáveis de saída

Após a usinagem dos canais, foram selecionadas as variáveis utilizadas para determinar a qualidade superficial, a forma utilizada de medição e os instrumentos utilizados. Com o intuito do trabalho em qualidade superficial, foram feitas imagens dos canais por meio do microscópio Lex OLS4100 e para a medição da rugosidade foi utilizado o rugosímetro Mitutoyo SJ-201, como pode ser observado na Figura 2.

- i. A medição da rugosidade será feita seguindo a norma ABNT ISO 4288, será utilizado um filtro de Gauss e aplicado os parâmetros R_a e R_q , com o comprimento de amostragem $n = 5d$ de cut-off e $\lambda = 0,8 \mu m$. Selecionando 4 regiões de cada canal para observar no rugosímetro, serão calculados a média e o desvio padrão dos valores obtidos ;
- ii. Para uma análise qualitativa, será feita imagens no microscópio. Serão observadas possíveis defeitos como

cavacos que não se soltaram da superfície e trincas. Todas essas características contarão para a análise da qualidade superficial.

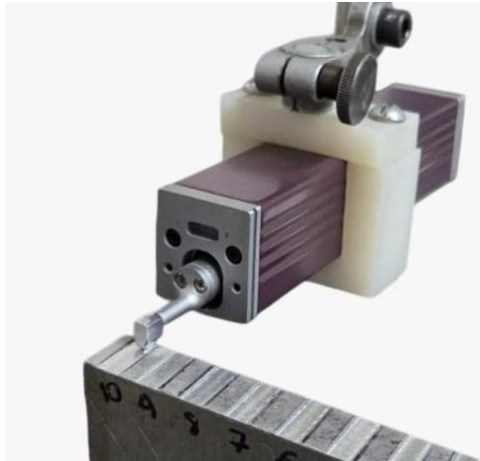


Figura 4: Rugosímetro medindo os canais

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Logo em seguida da usinagem dos canais, foram colocados no microscópio para análise das imagens e em seguida no rugosímetro, já que por ser um método de medida mecânico, poderia deixar uma marca no canal. Na Figura 3, é possível observar os dados recolhidos do rugosímetro em relação a variável Ra e na Figura 4 os dados recolhidos para a variável Rq dos canais:

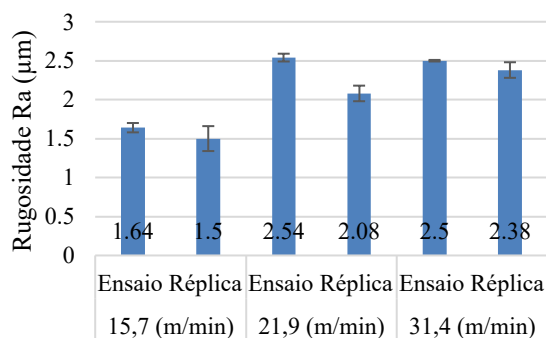


Figura 5: Valores de rugosidade Ra medidos no rugosímetro

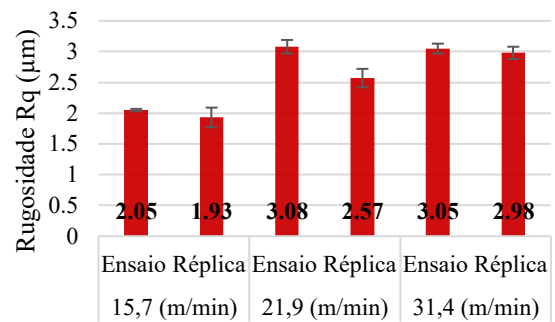


Figura 6: Valores de rugosidade Rq medidos no rugosímetro

Ao observar os gráficos é possível observar que para os dois parâmetros os canais A e sua réplica são os que tem a menor rugosidade, que tem velocidade de corte de 15,7 m/min (1000 rpm). Também é possível notar que a réplica do canal A apresenta um maior desvio padrão tanto na variável Ra quanto na Rq, o que pode apresentar um possível defeito onde foi medido e assim apresentando uma maior rugosidade em uma área do que em outra. Porém, mesmo que haja algum defeito não foi relevante o suficiente para aumentar o Ra e Rq.

Analisando, em relação a Ra, o menor valor e o maior valor diferem em 66,6% e em relação a Rq eles diferem em 59,5%, o que é considerável em qualidade superficial. Os canais B e C, junto de suas réplicas, tem valores semelhantes, somente diferindo em 0,4% nos canais originais e em 14,4% em suas réplicas, em relação a Ra e em Rq os originais em 0,98% e em 15,9% das réplicas.

A fim de analisar a morfologia dos canais foram feitas imagens no microscópio com ampliação de 5x, como é possível ver na Figura 5.

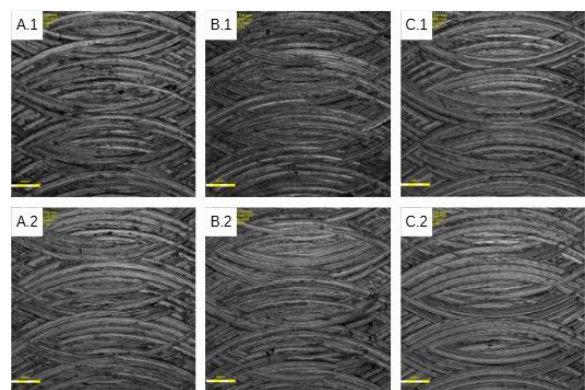
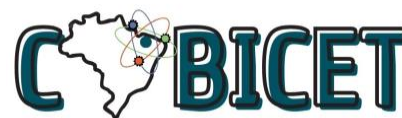


Figura 7: Morfologia dos canais usinados.



Devido ao tipo de fresa utilizada, uma fresa frontal de topo, é possível ver que em todos os canais que os sulcos formados se sobrepueram, mas é possível observar sulcos mais profundos nos canais A e B, pois quanto mais escuro mais profundo a superfície está. O que indica que causa conflito com os dados obtidos no rugosímetro, que indicava que a superfície A seria a menos rugosa mas explica o maior valor de desvio padrão entre os canais.

Também é possível ver que o canal B mostrou alguns defeitos no meio do canal original e nos cantos dos sulcos na réplica. E que no canal C e sua réplica foram os canais mais uniformes registrados, que corrobora com os dados que indicavam um menor desvio padrão entre todos os outros canais.

Tendo em base que os valores médios de um fresamento sejam em torno de 0,8 a 6,3 é possível observar que até os valores mais altos ainda ficam abaixo da média dos valores de referência, o que já indica uma otimização dos parâmetros.

Por fim, apesar de não ser prioritariamente o foco do trabalho foi possível observar que as rebarbas apresentavam dimensões ínfimas, o que indica que os valores também foram positivos nesse aspecto. Além disso, não foi identificado plowing, material aderido ou deformações excessivas em nenhuma imagem dos canais. .

CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados dos canais usinados com diferentes velocidades de corte, foi possível observar a influência desse parâmetro na qualidade superficial tanto de forma quantitativa e de forma qualitativa, por meio dos dados do rugosímetro e as imagens feitas no microscópio. Os principais pontos observados foram:

- i. A menor rugosidade, nos dois parâmetros de R_a e R_q , foi observada nos canais A e sua réplica que foi utilizado a velocidade de corte de 15,7 m/min, indicando que essa condição apresenta a melhor maneira de usinar e obter uma melhor qualidade superficial na peça, dentre as velocidades que foram testadas;
- ii. Os maiores valores foram obtidos no canal B que foi usinado com velocidade de corte de 21,9 m/min, mas que teve sua réplica valores bem menores de com diferença de 22% em R_a e diferença de 19,8% em relação a R_q ;
- iii. A diferença entre o maior valor e o menor valor foi um valor relevante de 66% em relação a R_a e 59,5% em relação a R_q , o que comprova que a velocidade de corte influencia consideravelmente a qualidade superficial de uma peça;

- iv. Em relação a análise morfológica feita por microscopia, houve uma divergência sobre qual seria a menos rugosa, porém comprovou em cada um dos canais a cauda dos valores altos do desvio padrão no canal A e os valores mais baixos no canal C ;

Apesar de conseguir resultados positivos na pesquisa, é preciso considerar que somente foi avaliado o parâmetro velocidade de corte. Por isso, para trabalhos futuros sugere-se:

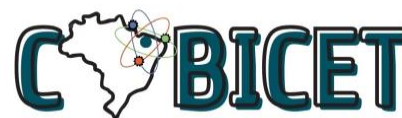
- i. Variar o avanço por dente para verificar sua relevância para a qualidade superficial ;
- ii. Aumentar o valor da profundidade de corte para avaliar possíveis aparecimentos de rebarbas e plowing e ver a influencia desse parâmetro na aparição desses defeitos característico das ligas de alumínio;
- iii. Avaliar a diferença de resultados entre a imagem do microscópio e os valores do rugosímetro
- iv. Replicar o experimento em uma máquina CNC e observar se os valores obtidos serão próximos aos obtidos em uma fresadora manual.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, processo 402730/2023-2, pelo apoio financeiro, ao Departamento de Engenharia Mecânica - ENM/FT e à Universidade de Brasília.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996, “ABNT ISO 4288: Especificação Geométrica dos Produtos (GPS) – Rugosidade: Método de Avaliação dos Perfis”, Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira Do Alumínio, 2026, “ABAL - Sustentabilidade no Brasil”. Disponível em: <https://abal.org.br/sustentabilidade/reciclagem/reciclagem-no-brasil/>. Acesso em: 28 Mar. 2026.
- DANIYAN, I. A.; TLHABADIRA, I.; K. MPOFU; ADEODU, A. O. Process design and optimization for the milling operation of aluminum alloy (AA6063 T6). Materials Today: Proceedings, v. 38, p. 536-543, 2021.
- GONÇALVES, R. A.; SILVA, M. B. da; COSTA, E. S. Análise da formação de cavacos e rebarbas e alterações subsuperficiais na furação da liga de alumínio 6351 com diferentes adições de cobre. Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, v. 1, p. 1-10, 2017.
- LINDNER, C. et al. Avaliação da formação de rebarbas no fresamento de uma liga de alumínio



6063 T5. Anais do XXI Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial (CONEMI), v. 1, p. 1-10, 2021.

Lucas E. O., Mundin R. B., Costa E. S., Siqueira A. M. O., 2022, “Estudo da topografia superficial no fresamento da liga de alumínio 6351 T6”, The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC, vol 08, n 03, pp. 14027-01.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. Teoria da usinagem dos materiais. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

TOGASHI, E. M. S.; TOGASHI, M. C.; OLIVEIRA, P. L.; GUIMARÃES JR., O. B. Análise da rugosidade superficial de implantes dentários de titânio. I Simpósio de Ciências da Produção Mecânica, v. 1, p. 17-24, 1999.

TÎȚU, Aurel Mihail *et al.* Design of Experiment in the Milling Process of Aluminum Alloys in the Aerospace Industry. **Applied Sciences**, Basel, v. 10, n. 19, 6951, p. 1-20, out. 2020.