
Análise da usinabilidade de uma liga Al-8%Cu pela avaliação conjunta de três critérios

Machinability analysis of an Al-8.0 wt.%Cu alloy by joint evaluation of three criteria

André Cruz da Costa Maciel¹, Alexandre Augusto Baldez Gatinho¹, Claudia Aline da Silva Brabo¹, Afonso e Souza Silva¹, Sanderson Dias Maués¹, Nádia Silva Cosmo¹, Otávio Fernandes Lima da Rocha², Maria Adrina Paixão de Souza da Silva^{1*}

RESUMO

Tradicionalmente, o mapeamento das condições de usinagem tem sido objeto de estudo, uma vez que desempenha um papel fundamental na otimização dos processos de fabricação. Para que cada ferramenta-peça seja eficiente em relação aos processos de corte e à vida útil da qualidade superficial da peça usinada, alguns parâmetros são padronizados, variando os demais. Ainda são necessárias investigações quantitativas para estabelecer um banco de dados que indique, para cada tipo de liga, as melhores condições de solidificação que levem a taxas de usinabilidade superiores. Tendo isso como base, esse tipo de estudo foi realizado em uma liga da série 2xx.x, uma vez que possui ampla aplicação na área industrial, com destaque nos setores aeroespacial e automotivo, que possuem os processos de usinagem inseridos em suas cadeias de produção. Verificou-se que a taxa de resfriamento e o espaçamento dendrítico secundário influenciaram a temperatura de corte, o desgaste da ferramenta e a rugosidade da superfície da peça usinada.

Palavras-chave: Ligas de alumínio; Temperatura de corte; Rugosidade superficial; Desgaste de ferramenta; Microestrutura

ABSTRACT

Traditionally, mapping the machining conditions has been an object of study once it has a pivotal role in optimizing manufacturing processes. For each tool-part to be efficient regarding cutting processes and surface quality life of the machined part, some parameters were standardized, varying the others. It is still needed quantitative investigations to establish a database that indicates, for each type of alloy, the best solidification conditions that lead to better machinability rates. Taking this as a basis, this type of study was established in an alloy of the 2xx.x series, as it has wide application in the industrial area, with emphasis on the aerospace and automotive sectors, which have the machining processes inserted in their production chains. It was found that cooling rate and secondary dendrite arm spacing influenced cutting temperature, tool wear, and surface roughness of the machined part.

Keywords: Aluminum alloys; Cutting temperature; Surface roughness; Tool wear; Microstructure

¹ Instituição de afiliação 1. Universidade Federal do Pará

*E-mail: mariaestillac@gmail.com

² Instituição de afiliação 2. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará

INTRODUÇÃO

O uso crescente do alumínio e suas ligas em vários setores se deve ao seu emprego na fabricação de diversos produtos e equipamentos, como estruturas, veículos automotores e outros setores que exigem suas qualidades. Suas propriedades de leveza e resistência aumentam a segurança e reduzem as emissões de gases de efeito estufa. Uma projeção indica um aumento no consumo de alumínio nos próximos 10 anos, especialmente em países com regulamentação de emissões e programas de mobilidade sustentável (Aljanabi et al., 2022).

A reciclagem também desempenha um papel importante para a indústria do alumínio, pois requer apenas uma fração da energia necessária para a produção primária e emite menos gases de efeito estufa, tornando-se benéfica para países que buscam reduzir a poluição industrial (SHAMSUDIN, 2016).

No campo da usinagem, a redução de custos tem sido uma busca constante, envolvendo ferramentas, processos secundários e subprodutos. A durabilidade das ferramentas é fundamental, e estudos têm procurado maximizar sua vida útil (Atia et al., 2017; Nandhakumar et al., 2021). É crucial, portanto, a análise da usinabilidade, que é definida como a facilidade ou dificuldade de usinar um material (Diniz et al., 2016; Silva et al., 2018). Suas propriedades afetam a vida útil da ferramenta, o acabamento superficial, os esforços de corte, a temperatura de corte, a produtividade e as características do cavaco (Gajrani et al., 2022).

A usinabilidade é influenciada por parâmetros como força de corte, temperatura de corte, rugosidade da superfície e vida útil da ferramenta. A temperatura de corte desempenha um papel importante na usinagem de ligas de alumínio, afetando as propriedades mecânicas da peça. A integridade e o acabamento superficial são aspectos relevantes da usinabilidade, envolvendo deformação plástica, fratura, geração de calor, vibração e tensão residual. O projeto mecânico geralmente especifica um acabamento superficial desejado, representado pela rugosidade da superfície (Liao et al., 2021; Mahesh et al., 2022; Binali et al., 2023).

Nesse sentido, a estrutura da peça a ser usinada desempenha um papel crucial, pois a maneira como o material é processado influencia suas propriedades (Silva et al., 2018; Costa et al., 2019). A solidificação é um processo-chave que determina a estrutura

final da peça, e estudos visam entender a relação entre a composição química da liga e as variáveis térmicas de solidificação (Vasconcelos et al., 2016; Kakitani et al., 2019). Dentro da análise da solidificação, a técnica de solidificação direcional é usada para estudar a transformação do líquido para o sólido, analisando a macroestrutura, a microestrutura e a segregação de solutos. Dependendo da direção de crescimento do sólido, diferentes condições afetam o mecanismo de crescimento das estruturas dendríticas (Rocha et al., 2018).

Diversos estudos mencionados têm observado que a microestrutura é composta por uma rede dendrítica, com braços primários, secundários e terciários (λ_1 , λ_2 e λ_3), além da formação de uma estrutura eutética. Essa estrutura eutética consiste em uma mistura de fases ($\alpha+\theta$) com uma morfologia lamelar, especialmente em ligas hipoeutéticas ($x= 5,35$ a $33\%Cu$) (Gunduz & Çadirli, 2002; Rocha et al., 2003; Çadirli, 2013). Nas últimas duas décadas, entretanto, os estudos têm se concentrado na influência das condições de solidificação nas morfologias da fase primária rica em alumínio (α) em ligas do sistema duralumínio Al-xCu, bem como em seu eutético, utilizando técnicas experimentais de solidificação direcional. Essas pesquisas têm mostrado de forma unânime que a morfologia da fase α pode assumir formas celulares, dendríticas ou uma combinação de ambas, dependendo da taxa de resfriamento durante o processo de solidificação (Barros et al., 2015, 2016; Kakitani et al., 2019).

Dessa forma, levando consideração a importância das ligas de alumínio, e em especial do sistema Al-Cu e suas aplicações; a presença do processo de usinagem nos processos produtivos de diversos setores e as mecânicas de avaliação de desempenho na remoção de material destes produtos, este trabalho tem como objetivo geral a avaliação da usinabilidade, por meio de três diferentes critérios, de uma liga Al-8%Cu solidificada em um dispositivo de solidificação direcional horizontal refrigerado a água, estabelecendo correlações dela com parâmetros térmicos e microestruturais (taxa de resfriamento e espaçamento dendrítico secundário) oriundos do processo de solidificação.

MATERIAIS E MÉTODOS

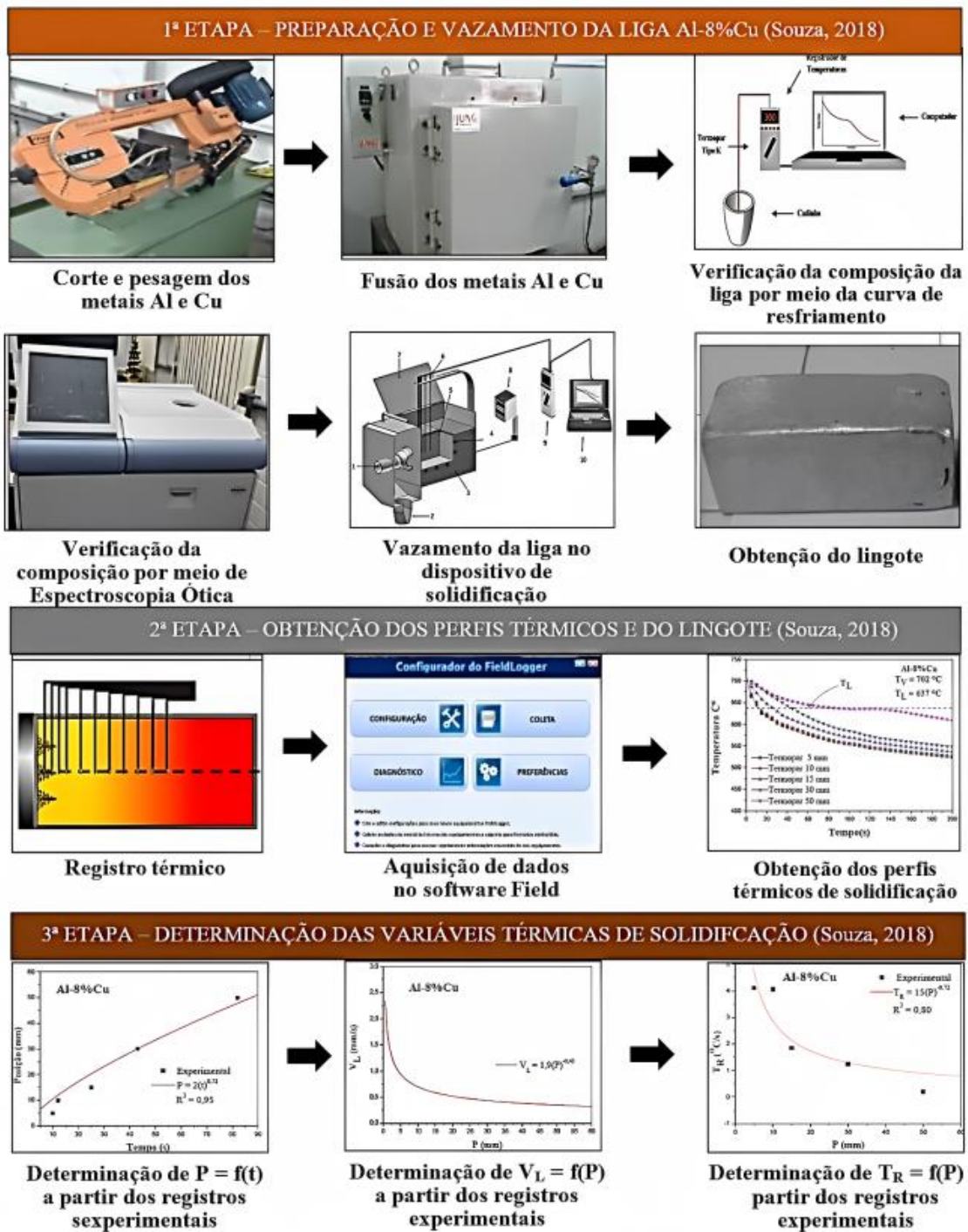
As análises experimentais realizadas neste estudo foram conduzidas em várias etapas: solidificação direcional horizontal da liga Al-8%Cu, caracterização microestrutural, ensaios de sangramento e análise da usinabilidade com base nos critérios de temperatura de corte, desgaste da ferramenta e rugosidade superficial da peça usinada.

É importante ressaltar que o processo de solidificação e caracterização realizados para os estudos que deram origem a este trabalho não serão discutidos diretamente neste momento, uma vez que já se encontram na literatura (Barros et al., 2015). A Figura 1 apresenta o fluxograma de todas as etapas, incluindo o processo de preparação e solidificação da liga.

A liga analisada foi solidificada em um dispositivo de solidificação direcional horizontal, projetado de tal maneira que o calor do metal líquido fosse extraído somente através de um sistema refrigerado a água, sob condições transientes de extração de calor. Detalhes sobre a configuração de solidificação utilizada neste trabalho podem ser encontrados em Barros (2015).

A escala de comprimento das microestruturas dendríticas depende dos parâmetros térmicos de solidificação, como a velocidade da isoterma *liquidus* (V_L) e a taxa de resfriamento (T_R), que variam com a posição (P) durante a solidificação direcional. Dessa forma, V_L e T_R (com este último o parâmetro escolhido para análise com os resultados de usinabilidade), bem como suas expressões algébricas como uma função de P , foram calculados a partir das curvas de resfriamento experimentais, que foram obtidos a partir de termopares posicionados ao longo da lingoteira, no centro em relação à chapa molde. A Figura 2 mostra uma representação dos cálculos para obtenção dos parâmetros térmicos.

Figura 1 - Fluxograma experimental das etapas do processo



4ª ETAPA – CARACTERIZAÇÃO MACROESTRUTURAL E MICROESTRUTURAL (Souza, 2018)



Embutimento a frio

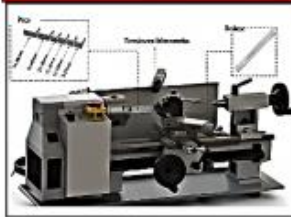


Procedimento metalográfico

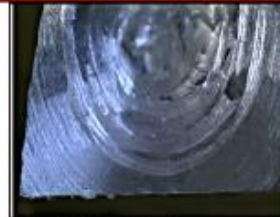


Imagens após o ataque químico nas amostras

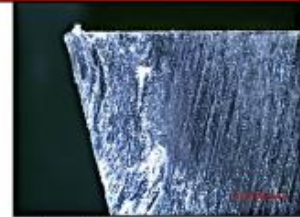
5ª ETAPA – ENSAIO DE USINABILIDADE E MEDIÇÃO DE DESGASTE E RUGOSIDADE



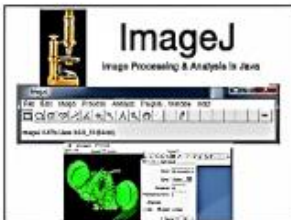
Operação de sangramento e aquisição das temperaturas de corte



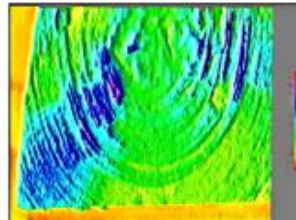
Aquisição das imagens das peças após o ensaio



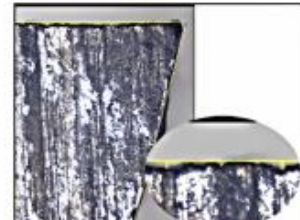
Aquisição das imagens das ferramentas após o ensaio



Medição de rugosidade e desgaste com o software ImageJ

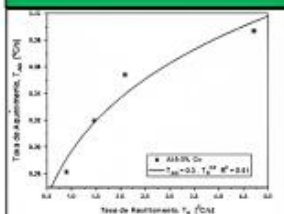


Medição da rugosidade

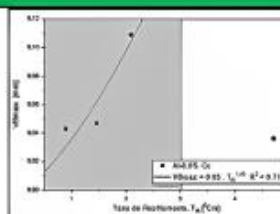


Medição do desgaste

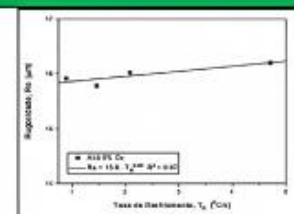
5ª ETAPA – PLOTAGEM AJUSTE DOS GRÁFICOS



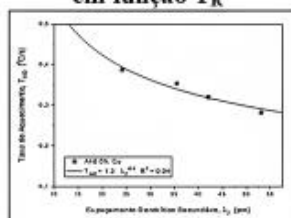
Taxa de aquecimento em função T_R



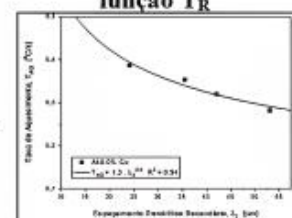
Desgaste máximo em função T_R



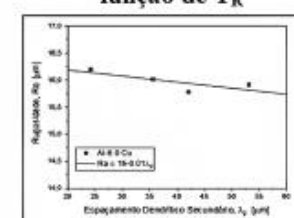
Rugosidade média em função de T_R



Taxa de aquecimento em função λ_2



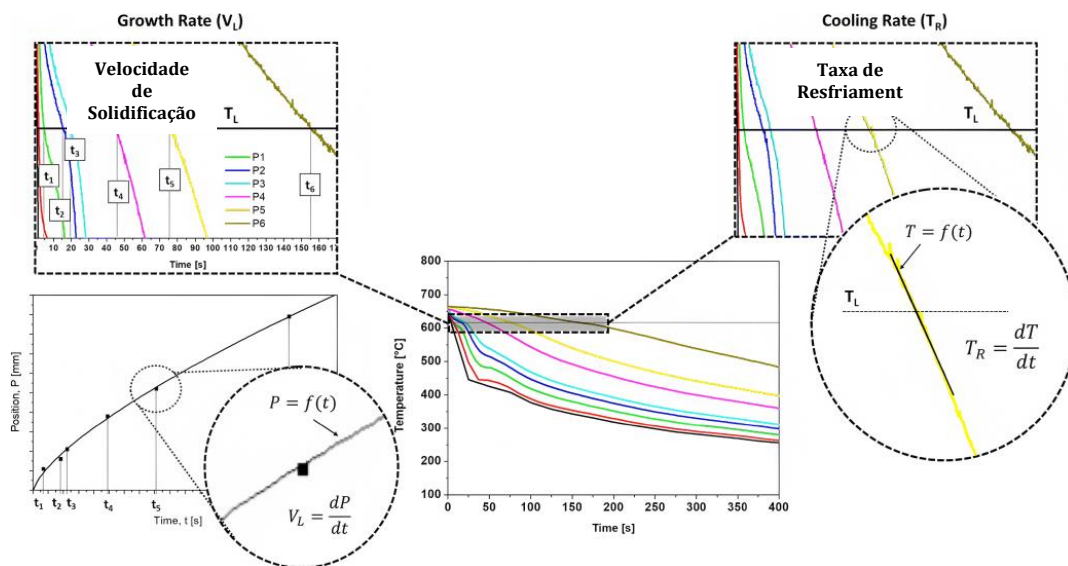
Desgaste máximo em função λ_2



Rugosidade média em função de λ_2

Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 2 - Técnica utilizada para cálculo de V_L e T_R : P é a posição no dispositivo de solidificação, a partir da face refrigerada; t é o tempo e T_L é a temperatura liquidus



Fonte: Adaptado de Costa et al. (2019)

Após a completa solidificação da liga, o mesmo foi seccionado ao longo de sua direção longitudinal, e preparado pra as técnicas metalográficas, visando a caracterização macro e microestrutural. A quantificação microestrutural (medição dos espaçamentos dendríticos) foi feita utilizando técnica já consolidada na literatura (Peres et al., 2004; Rocha et al., 2003, 2018; Barros et al., 2015, 2016; Costa et al., 2019).

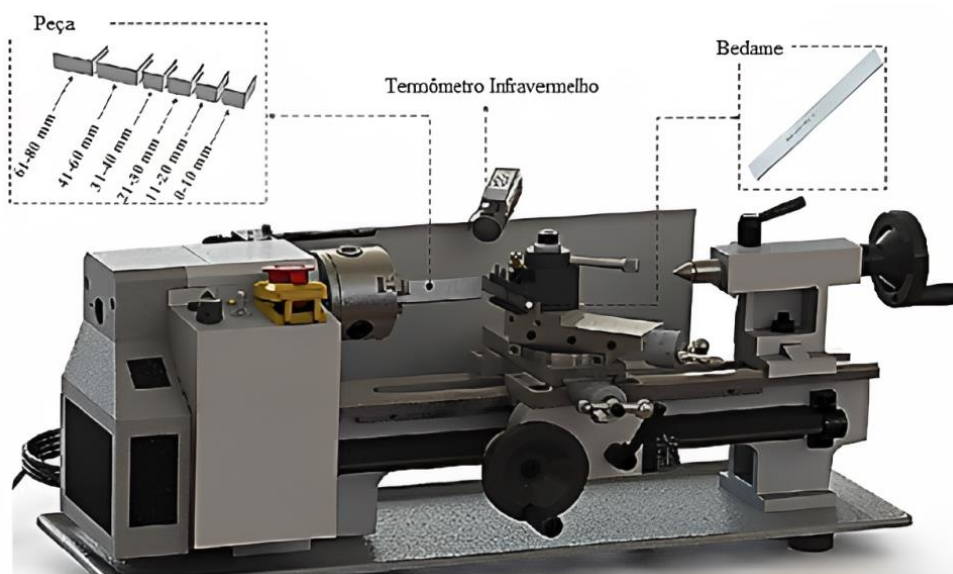
Após caracterizar e quantificar os parâmetros térmicos e estruturais da liga, uma amostra do lingote foi utilizada para o ensaio de sangramento. O ensaio foi realizado em um torno de bancada, adotando uma rotação de 650 RPM, avanço de 0,1 mm/rot, avanço automático e velocidade de corte de 28,39 m/min. O corte foi realizado sem o uso de elementos lubrificantes para garantir maior confiabilidade na análise dos critérios de temperatura de corte.

As posições de corte foram determinadas com base na localização dos termopares utilizados no processo de solidificação da liga, permitindo a correlação com outras propriedades. Foram selecionadas posições de corte pré-determinadas a cada 10 mm (10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 60 mm e 80 mm) ao longo da chapa metal/molde do dispositivo de solidificação direcional. No entanto, dois dos sangramentos não foram concluídos com sucesso nas posições de 40 mm e 80 mm, resultando em quatro posições válidas para análise (peça 1, peça 2, peça 3 e peça 5).

A amostra utilizada no ensaio possui uma seção transversal retangular e não passou por qualquer procedimento de usinagem para alteração de sua geometria. Isso foi feito para evitar transformações metalúrgicas e tensões residuais que poderiam comprometer a integridade microestrutural do material antes do ensaio.

Durante cada sangramento, a temperatura de corte foi registrada por meio de um termômetro infravermelho, utilizando um valor de emissividade (ϵ) igual a 0,95, portanto durante o processo experimental, a temperatura indicada pelo termômetro não representa a temperatura real de corte, mas pode ser utilizada para fins qualitativos e análise comparativa, que é o objetivo deste estudo. Para garantir um posicionamento adequado, o termômetro foi instalado em um tripé e conectado a um computador para monitoramento em tempo real e registro da variação de temperatura na interface ferramenta/peça ao longo do ensaio. O aparato experimental do ensaio por meio da operação de sangramento pode ser ilustrado pela Figura 3.

Figura 3 - Representação esquemática do ensaio de sangramento.



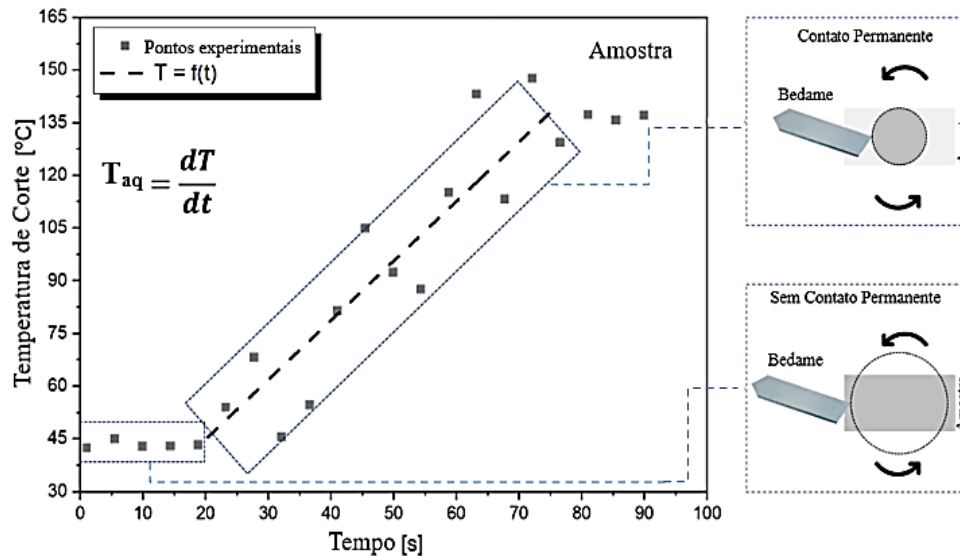
Fonte: Arquivo pessoal.

Foram utilizados bedames de aço rápido HSS T6 de 3/4" x 1/8" x 6" como ferramentas de corte, sendo um bedame utilizado para cada posição de corte. Vale ressaltar que as ferramentas foram afiadas e polidas de fábrica.

Após a coleta das temperaturas durante o experimento, é possível calcular a taxa de aquecimento média (T_{aq}) para cada sangramento, de acordo com procedimento da

Figura 4. No início do corte, o contato entre o bedame e a peça não é constante, especialmente quando a peça possui uma seção retangular.

Figura 4 - Técnica para medição da taxa de aquecimento de corte.



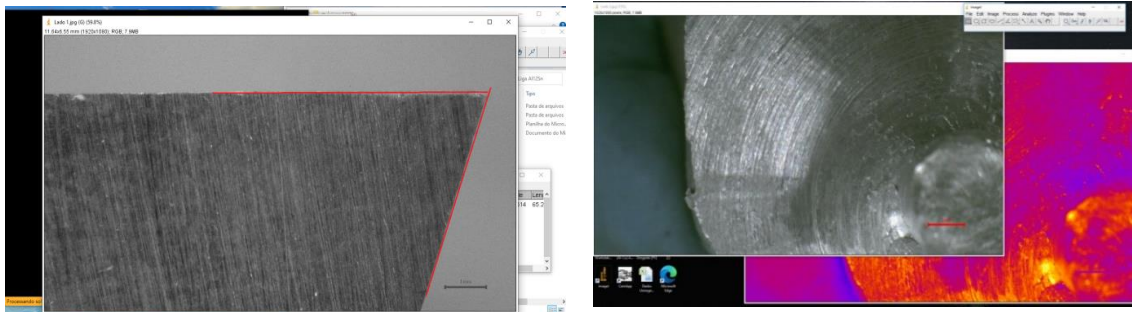
Fonte: Rocha et al. (2022).

Após os sangramentos, foi feita a captura das imagens para a identificação e análise visual e quantitativa do desgaste das ferramentas. Utilizou-se o estereoscópio DIGILAB zoom 3,5x a 180x DI-45T, com a ampliação do local específico da ponta da ferramenta em 7,5x do tamanho real, na vista lateral de cada bedame, e em seguida foram capturadas as imagens através do programa computacional IMAGEVIEW para os dois lados da ferramenta (Lado “A” e lado “B”), como ilustrado na Figura 5a. Após isso, com o software de análise de imagem ImageJ®, foram feitas as medições, traçando-se linhas de referência, sem medição, delineando as arestas de corte, e posteriormente traçando também linhas perpendiculares que se estende da linha paralela à aresta de corte feita anteriormente, até o ponto específico onde se encontra o limite do desgaste, obtendo assim os dados das dimensões do desgaste de flanco (VB). Para os critérios de fim de vida da ferramenta, foi considerado o final do experimento com valor de desgaste obtido a desgaste máximo do flanco (VBMAX) de acordo com ISO 3685 (1993).

Por fim, utilizou-se o estereoscópio DIGILAB zoom 3,5x a 180x DI-45T, para a aquisição das imagens e medição da rugosidade média (R_a). Não foi possível utilizar o rugosímetro portátil disponível para realização das medições de rugosidade, pois poderiam ocorrer danos na agulha do mesmo devido às altas reentrâncias e elevações na superfície dos corpos de prova. Assim, foram obtidas imagens de topo dos corpos de

prova e com o auxílio do *software* ImageJ com o plugin SurfCharJ foi possível obter o parâmetro Ra. Este plugin contém vários serviços comumente utilizados para caracterizar superfície, como os cálculos de parâmetros de rugosidade, e pode ser usado com qualquer imagem topográfica adquirida. A entrada é uma imagem de 32 bits em escala de cinza (Figura 5b) (Chinga et al., 2007).

Figura 5 - (a) Imagem da ferramenta de corte com as linhas de medição e (b) imagem de topo das amostras



(a)

(b)

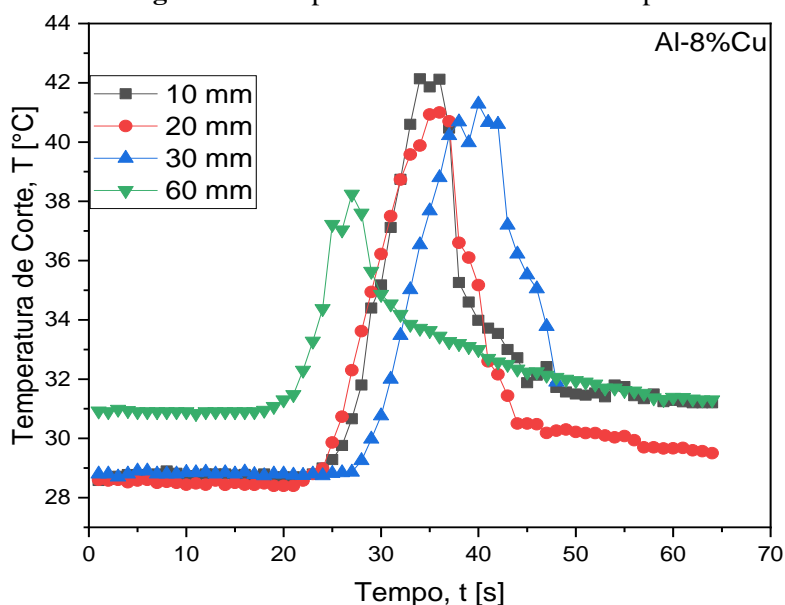
Fonte: Arquivo pessoal.

Todos os tratamentos e dados de compilação, consolidados na forma de gráficos e expressões, realizada durante este estudo foram obtidos por meio do *software* OriginPro 9.1®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A temperatura de corte é resultante da ação conjunta de parâmetros como o processo de usinagem, máquina ferramenta, ferramenta de corte e material, podendo ser influenciada pela velocidade de corte utilizada, pelo avanço empregado a ferramenta e pelo uso ou não de fluido de corte (Silva et. al, 2018). Com os dados de temperatura de corte obtidos durante o experimento foi possível gerar gráficos que correlacionam o comportamento desta grandeza em função do tempo, de forma a comparar o desempenho de cada uma das amostras avaliadas, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Temperatura de corte versus tempo

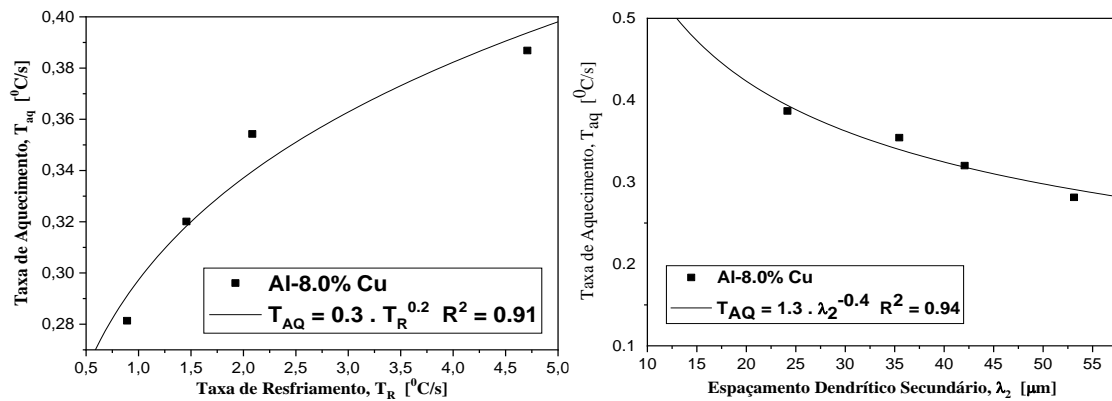


Fonte: A autoria própria.

Na Figura anterior é possível verificar o desempenho térmico de cada uma das peças. O comportamento da curva de temperatura em função do tempo obtida neste trabalho é conhecido da literatura (Abukhshim, 2006; Silva et al., 2018). Em termos de maiores temperaturas desenvolvidas pode ser observado que a peça 1 foi a que obteve o maior patamar de temperatura e a peça 5, a menor. O tempo total de corte também apresentou diferença, mais especificamente na peça 3, que teve um tempo de duração de ensaio de, aproximadamente 49 segundos, enquanto as demais duraram em torno de 65 segundos.

A Figura 7 a e b mostra a taxa de aquecimento de corte (T_{aq}) em função da taxa de resfriamento (T_R) e do espaçamento dendrítico secundário (λ_2), respectivamente. Ao observar os resultados, verifica-se um aumento da taxa de aquecimento com o aumento da taxa de resfriamento e diminuição dos valores de taxa de aquecimento de corte com o aumento de λ_2 . Os resultados encontram-se em consonância, uma vez que maiores taxas de resfriamento levam a uma microestrutura mais refinada, com menores espaçamentos dendríticos. Funções do tipo potência foram utilizadas para representar a correlação entre as variáveis, com excelentes coeficientes de correlação (R^2).

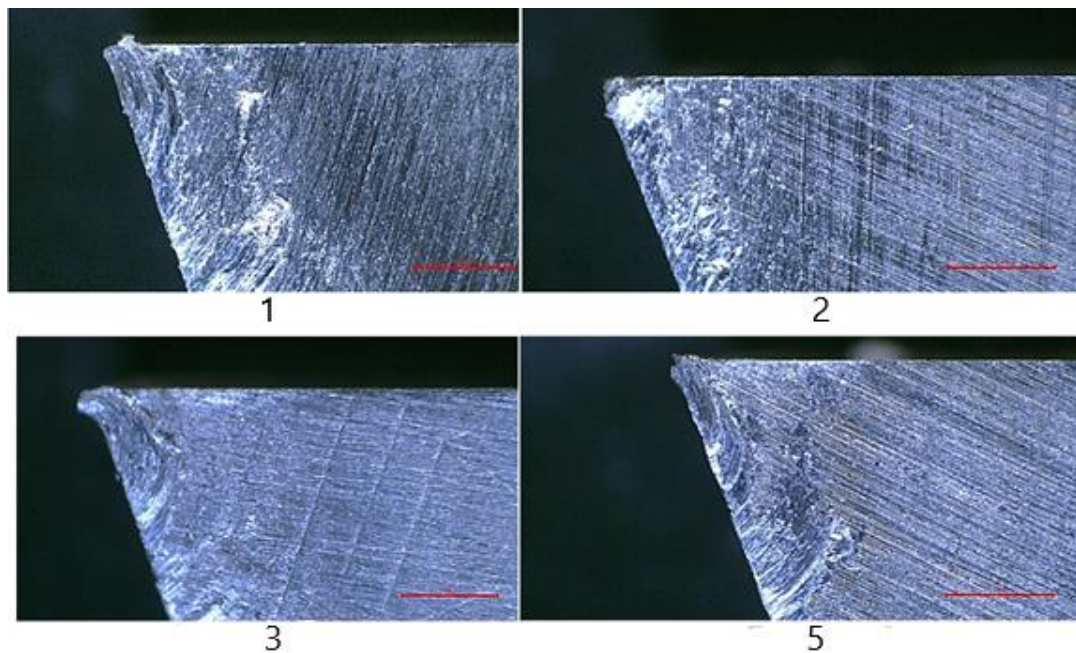
Figura 7-Taxa de aquecimento de corte em função da taxa de resfriamento e do espaçamento dendrítico secundário, para a liga Al-8%Cu



Fonte: Autoria própria.

A Figura 8 mostra as ferramentas de corte em sua vista lateral, após cada um dos sangramentos. Após uma análise visual é possível verificar que o desgaste predominante é o de flanco, além de ser perceptível uma aderência de material nas laterais de todas as ferramentas e um resquício de aresta postiça mais acentuado na ferramenta 3.

Figura 8 - Ferramentas após o ensaio



Fonte: Autoria própria.

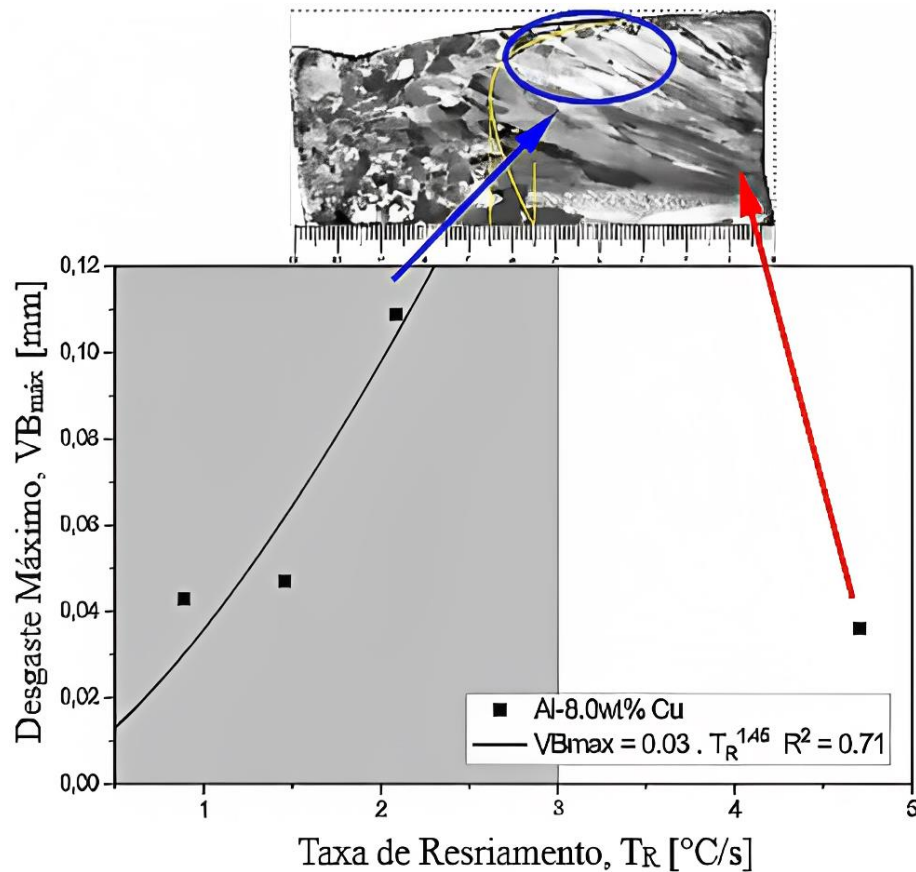
De acordo com a norma NBR ISO 3685 (1993), a vida útil da ferramenta é determinada pelo período em que ela desempenha sua função eficazmente, até perder sua capacidade de corte. Neste estudo, o critério de desgaste máximo da ferramenta de torno foi estabelecido como $VB_{\text{máx}} = 0,6 \text{ mm}$. Os desgastes máximos medidos para cada ferramenta foram de 0,034, 0,019, 0,047 e 0,036 mm, indicando que nenhuma das

ferramentas atingiu o fim de sua vida útil. Diversos trabalhos ressaltam que em ligas de alumínio com cobre, o desgaste da ferramenta é principalmente causado por adesão (BARROS et al., 2010; BATISTA et al., 2019; NOUARI et al., 2003). Fatores como a formação da aresta postiça e a geometria retangular do corpo de prova podem ter favorecido o mecanismo de adesão.

O processo de sangramento exige um esforço contínuo da ferramenta de corte, e ao ser realizado a seco, ocorre atrito entre o cavaco, a ferramenta e a peça, resultando em aumento de temperatura na área de contato. Estudos mostram que esse aumento de temperatura leva à coalescência das ligas de alumínio com cobre, formando uma fina camada (gume postiço) composta principalmente pela matriz de alumínio aderida à face superior da ferramenta. Essa camada inicial modifica o comportamento de fricção na área de contato, e o processo de adesão continua com a formação de camadas subseqüentes, facilitando a presença de partículas de cobre na superfície. Quando a adesão muda para adesão mecânica, ocorre a extrusão do material aderido sobre as camadas anteriores, gerando desgaste na ferramenta. Os estudos anteriores apresentados mostram que ligas hipoeutéticas de alumínio, mesmo usinadas a altas velocidades de corte e sem refrigeração, apresentam menor desgaste nas ferramentas de aço rápido em comparação com ligas de alumínio com maior teor de solutos, o que resulta em uma vida útil satisfatória.

Examinando o desgaste medido em função da taxa de resfriamento, conforme pode ser visto na Figura 9, verifica-se uma relação entre três pontos de estudo, porém há um ponto que não obedece a este padrão. Neste caso, analisando-se a macroestrutura da liga, observa-se que mesmo que a transição colunar/equiaxial (TCE) comece majoritariamente a 55 mm da interface metal/molde, a pequena quantidade de grãos equiaxiais ocorrida de aproximadamente 10 a 54 mm contribuiu para o comportamento diferente do desgaste da ferramenta para o valor mais elevado de taxa de resfriamento.

Figura 9 - Desgaste máximo em função da taxa de resfriamento

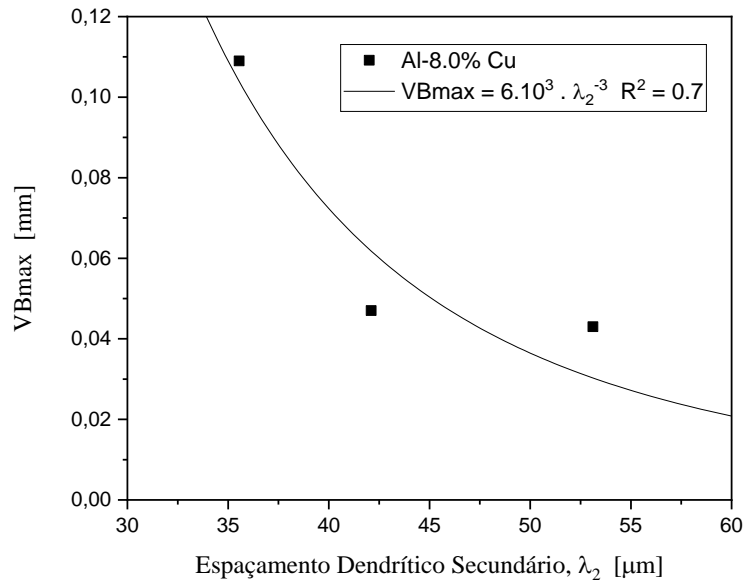


Fonte: Autoria própria.

Analisando-se apenas os três pontos correlatos, verifica-se que o desgaste também aumenta com o aumento da taxa de resfriamento, conforme visto na Figura anterior e diminui à medida que o λ_2 aumenta, como pode ser visto na Figura 10. Todos os resultados puderam ser expressos por funções do tipo potência. Os valores de desgaste de ferramenta encontrados corroboram com outros de ligas de alumínio hipoeutéticas (Silva et al. 2018; de Paula et al. 2021; Botelho et al. 2023), indicando que provavelmente ligas de alumínio com baixo teor de soluto, ainda que submetidas à usinagem com alta velocidade de corte e sem uso de fluido de refrigeração não desgastam a ferramenta de aço rápido com tanta facilidade, levando à uma vida útil satisfatória.

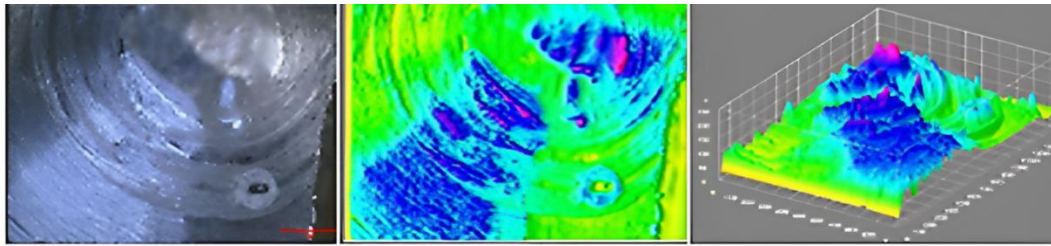
Com a utilização do recurso *Iterative 3D Surface Plot* foi possível realizar a representação da superfície que as peças avaliadas indicaram, ilustrado pela Figura 11, onde as partes que apresentam uma coloração roxa ou vermelha indicam os pontos mais elevados e os pontos em verde ou amarelo os mais profundos.

Figura 10 - Desgaste máximo em função do espaçamento dendrítico secundário



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 - Representação das superfícies da peça 1.

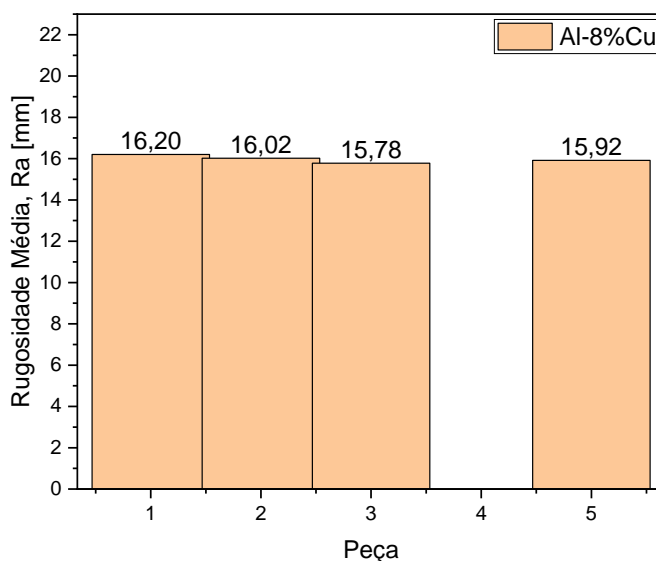


Peça 1

Fonte: Autoria própria.

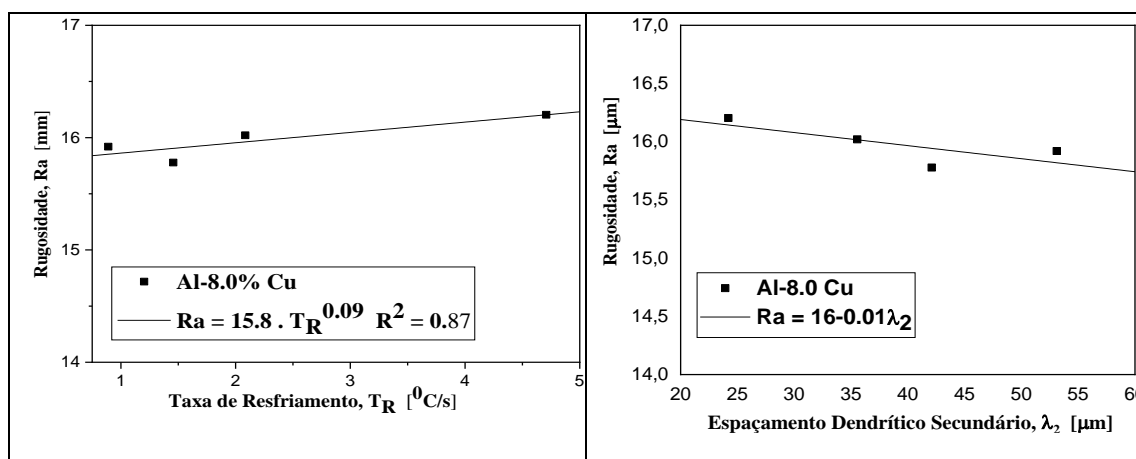
Os valores médios de rugosidade alcançados pelas peças podem ser visualizados na Figura 12, mostrando que não houve grande variação entre estes valores, sendo a peça 1 a que apresentou o maior valor dentre as demais. Já Avaliando-se a rugosidade em relação aos parâmetros térmico e estrutural de solidificação, mais uma vez nota-se também um comportamento oposto entre estas variáveis. Na Figura 13 a e b pode ser visto que o valor do R_a apresenta um comportamento crescente à medida que o valor de T_R aumenta e um comportamento decrescente com o aumento de λ_2 . Todos os resultados também puderam ser expressos por funções do tipo potência, com excelentes coeficientes de correlação.

Figura 12 - Valores de rugosidade



Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Rugosidade média em função (a) da taxa de resfriamento e (b) do espaçamento dendrítico secundário



Fonte: Autoria própria.

Em seus resultados, Barros *et al.* (2015) verificaram a presença da fase α -Al (matriz) e do intermetálico Al_2Cu denominado de fase θ na liga Al-8%Cu do presente trabalho. Sabe-se que o aumento da dureza de ligas Al-Cu consiste na interação da fase intermetálica Al_2Cu com refinamento de λ_2 . O tamanho e a morfologia da fase intermetálica, juntamente com o espaçamento dendrítico são responsáveis, conseqüentemente, pelo comportamento dos esforços de corte, e, portanto, da temperatura de corte, desgaste de ferramenta e rugosidade superficial da peça usinada. Os mesmos autores, entretanto, observaram uma maior quantidade da fase Al_2Cu microsegregada na

mistura eutética, o que indica que, nesse caso, os resultados de usinabilidade serão majoritariamente comandados pelos espaçamentos dendríticos.

CONCLUSÕES

Os resultados encontrados neste trabalho permitem concluir que:

- Os três critérios de usinabilidade estudados aumentam com o aumento da taxa de resfriamento e diminui com o aumento de λ_2 . Funções do tipo potência foram utilizadas para expressar as correlações;
- Observou-se predominantemente o desgaste de flanco nas ferramentas utilizadas, com formação de gume postiço, que fora removido;
- O fim da vida da ferramenta não foi alcançado em nenhum sangramento paras as condições de ensaio realizados neste trabalho, com o maior valor alcançado de 0.109 mm, para a ferramenta 2;
- O desgaste de flanco encontrado pode ter sido originado pela combinação dos mecanismos de adesão e/ou abrasão, além da geometria do corpo de prova ser retangular e gerar contato intermitente da peça na ferramenta de corte pode ter culminada para este tipo de desgaste;
- A pequena quantidade de grãos anteriores à transição colunar/equiaxial (TCE) majoritária contribuiu para o comportamento diferente do desgaste da ferramenta para o valor mais elevado de taxa de resfriamento;
- Por conta quantidade da fase Al_2Cu microsegregada na mistura eutética na liga estudada, os resultados de usinabilidade são majoritariamente comandados pelos espaçamentos dendríticos;
- O valor de espaçamento dendrítico que apresentou os resultados mais satisfatório, analisando de forma conjunta os critérios, foi de aproximadamente 53 μm .

REFERÊNCIAS

Abukhshim, N. A., Mativenga, P. T., & Sheikh, M. A. (2006). Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(7-8), 782-800. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.024>

Aljanabi Z, Carrere J, Cruz C. *Opportunities for Aluminium in a Post-Covid Economy*. International Aluminum Institute; 2022:1-41. <https://international->

[aluminium.org/resource/opportunities-for-aluminium-in-a-post-covid-economy/?_thumbnail_id=6715](https://www.aluminium.org/resource/opportunities-for-aluminium-in-a-post-covid-economy/?_thumbnail_id=6715);

Batista, M., Salguero, J., Gómez-Parra, Á., Carrilero, M. S., Álvarez, M., & Marcos Bárcena, M. (2010). Identification, analysis and evolution of the mechanisms of wear for secondary adhesion for dry turning processes of Al-Cu alloys. *Advanced Materials Research*, *107*, 141-146. <https://doi.org/10.3390/met9101094>

Barros, A. S., de Souza da Silva, M. A. P., da Rocha, O. F. L., & Moreira, A. L. (2016). Thermal parameters, tertiary dendritic growth and microhardness of directionally solidified Al-3wt% Cu alloy. In *Materials Science Forum* (Vol. 869, pp. 452-457). doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.869.452>

Barros, A. S., Magno, I. A., Souza, F. A., Mota, C. A., Moreira, A. L., Silva, M. A., & Rocha, O. L. (2015). Measurements of microhardness during transient horizontal directional solidification of Al-Rich Al-Cu alloys: Effect of thermal parameters, primary dendrite arm spacing and Al₂Cu intermetallic phase. *Metals and Materials International*, *21*, 429-439. doi:<https://doi.org/10.1007/s12540-015-4499-2>

Barros, A. S.; Magno, I. A. B.; Souza, F. V. A.; Mota, C. A.; Moreira, L. S.; Batista, M., Salguero, J., Gomez, A., Carrilero, M. S., Álvarez, M., & Marcos, M. (2010). Identification, analysis and evolution of the mechanisms of wear for secondary adhesion for dry turning processes of Al-Cu alloys. *Advanced Materials Research*, *107*(1), 141–146. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.107.141>

Binali, R., Demirpolat, H., Kuntoğlu, M., & Sağlam, H. (2023). Machinability investigations based on tool wear, surface roughness, cutting temperature, chip morphology and material removal rate during dry and MQL-assisted milling of Nimax mold steel. *Lubricants*, *11*(3), 101. <https://doi.org/10.3390/lubricants11030101>.

Botelho, T. I. M., Maciel, A. C. da C., da Rocha, F. S., Nascimento, J. M., & da Silva, M. A. P. de S. (2023). Correlação entre rugosidade superficial e estrutura da solidificação direcional horizontal de uma liga Al-10% Sn. *Cuadernos De Educación Y Desarrollo*, *15*(2), 1600–1610. <https://doi.org/10.55905/cuadv15n2-031>

Chinga, G., Johnsen, P. O., Dougherty, R., Berli, E. L., & Walter, J. (2007). Quantification of the 3D microstructure of SC surfaces. *Journal of microscopy*, *227*(3), 254-265. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.2007.01809.x>

COSTA, T. A., Dias, M., Silva, C., Freitas, E., Silva, A. P., Cheung, N., & Garcia, A. (2019). Measurement and interrelation of length scale of dendritic microstructures, tensile properties, and machinability of Al-9 wt% Si-(1 wt% Bi) alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1391–1410. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04211-1>

Çadırlı E. Effect of solidification parameters on mechanical properties of directionally solidified Al-Rich Al-Cu alloys. *Metals and Materials International*. 2013;19(3):411-422. doi:<https://doi.org/10.1007/s12540-013-3006-x>

De Paula, S. L., Dias Filho, J. M. S., dos Santos, C. F., de Sousa Costa, T. A. P., & da Rocha, O. F. L. (2021). Usinabilidade de uma liga Al-6% Cu Solidificada em um Dispositivo Direcional Horizontal, pelo Critério de Temperatura de Corte. *Brazilian Journal of Development*, 7(6), 60959-60971. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n6-460>

Diniz, A. E., Machado, A.R. & Corrêa, J. G., Mecanismos de desgaste de ferramentas na usinagem de aços e aços inoxidáveis. *Int J Adv Manuf Technol* **87** , 3157–3168 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8704-3>

Gajrani, K. K., Prasad, A., & Kumar, A. (Eds.). (2022). *Advances in Sustainable Machining and Manufacturing Processes*. CRC Press..
doi:<https://doi.org/10.1201/9781003284574>

Gündüz, M., & Çadırlı, E. (2002). Directional solidification of aluminium–copper alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 327(2), 167-185. doi:[https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(01\)01649-5](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(01)01649-5)

ISO 3685 (1993): Tool-life testing with single-point turning tools.

Kakitani, R., de Gouveia, G. L., Garcia, A., Cheung, N., & Spinelli, J. E. (2019). Thermal analysis during solidification of an Al–Cu eutectic alloy: interrelation of thermal parameters, microstructure and hardness. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137, 983-996. doi:<https://doi.org/10.1007/s10973-018-07992-x>

Liao Z, la Monaca A, Murray J, et al. Surface integrity in metal machining - Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021;162:103687. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103687>

Mahesh, K., Philip, J. T., Joshi, S. N., & Kuriachen, B. (2021). Machinability of Inconel 718: A critical review on the impact of cutting temperatures. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(7), 753-791. doi:<https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1843671>

Nouari, M., List, G., Girot, F., & Coupard, D. (2003). Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys. *Wear*, 255(7-12), 1359-1368. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00105-4)

Peres, M. D., Siqueira, C. A., & Garcia, A. (2004). Macrostructural and microstructural development in Al–Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 381(1-2), 168-181. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.03.107>

ROCHA, F. S. *et al.* Analysis of metallurgical conditions favorable to machinability of an A413.0 alloy series: Cutting Temperature Criteria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2022, Águas de Lindóia. Proceedings. São Paulo: 2022.

Rocha, O. L., Costa, T. A., Dias, M., & Garcia, A. (2018). Cellular/dendritic transition, dendritic growth and microhardness in directionally solidified monophasic Sn-2% Sb alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(8), 1679-1686.
doi:[https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(18\)64811-3](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(18)64811-3)

Rocha, O. L., Siqueira, C. A., & Garcia, A. (2003). Heat flow parameters affecting dendrite spacings during unsteady-state solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34, 995-1006.
doi:<https://doi.org/10.1007/s11661-003-0229-3>

Shamsudin S., Lajis M., Zhong Z.W. Evolutionary in Solid State Recycling Techniques of Aluminium: A review. *Procedia CIRP*. 2016;40(40):256-261.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.117>

Silva, C. A., Leal, L. R., Guimarães, E. C., Junior, P. M., Moreira, A. L., Rocha, O. L., & Silva, A. P. (2018). Influence of thermal parameters, microstructure, and morphology of Si on machinability of an Al-7.0 wt.% Si alloy directionally solidified. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1-12.
doi:<https://doi.org/10.1155/2018/9512957>

Vasconcelos, A. J., Kikuchi, R. H., Barros, A. S., Costa, T. A., Dias, M., Moreira, A. L., ... & Rocha, O. L. (2016). Interconnection between microstructure and microhardness of directionally solidified binary Al-6wt.% Cu and multicomponent Al-6wt.% Cu-8wt.% Si alloys. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88, 1099-1111.
doi:<https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150172>