

## BREVE REVISÃO DA LITERATURA SOBRE A USINAGEM LIMPA DA LIGA DE ALUMÍNIO AERONÁUTICO AA 7075

Abdiel M. Vilanova<sup>1</sup>

Emerson S. Passari<sup>2</sup>

André J. Souza<sup>3</sup>

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) – Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) – Rua Sarmento Leite, nº 425 – CEP 90050-170 – Porto Alegre, RS.

<sup>1</sup>abdiel.vilanova@gmail.com; <sup>2</sup>emerson.passari@gmail.com; <sup>3</sup>ajsouza@ufrgs.br

**Resumo:** A preocupação mundial com o meio ambiente e os seus impactos junto à sociedade tem afetado os processos de fabricação que comumente influenciam na poluição ambiental. Tais processos estão adotando novas tecnologias para atender a demanda de produtos com qualidade e produtividade de maneira sustentável. Essa preocupação é contínua e os seus impactos na sociedade necessitam de busca por alternativas ambientalmente amigáveis nos processos de manufatura. O estudo com usinagem limpa em processos de usinagem de ligas de alumínio aeronáutico é de grande interesse para a indústria aeroespacial em que a precisão e a qualidade são diferenciais significativos. Assim, o trabalho apresenta comparativamente algumas técnicas como a mínima quantidade de lubrificação (MQL), a aplicação de fluidos de base vegetal, a criogenia e o corte a seco, demonstrando suas vantagens e limitações nos processos de fresamento, torneamento e furação de ligas de alumínio AA 7075.

**Palavras-chave:** Usinagem do AA 7075, MQL, Criogenia, Fluido vegetal, Corte a seco

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de usinagem vem sendo foco de diversas pesquisas relacionadas aos fluidos de corte, visto que estes representam uma parcela significativa dos custos e dos impactos ambientais. Como resultado, diferentes métodos de lubrificação têm sido desenvolvidos para otimização e redução destes problemas.

A lubrificação com fluidos de base vegetal são uma alternativa sustentável para o processo de usinagem visto que esse tipo de fluido, em comparação aos óleos convencionais, gera menores danos ao meio ambiente durante sua produção, utilização e descarte, tendo a capacidade de reduzir a produção de névoa que resulta em menor risco à saúde do operador (Kuram et al., 2013). Em contrapartida por ser um método ainda em desenvolvimento, os custos de produção e durabilidade do óleo ainda não apresentam o mesmo desempenho dos óleos emulsificados, necessitando normalmente da utilização de aditivos para atingir tais características (Sharma et al., 2015).

Neste sentido, a mínima quantidade de lubrificação (MQL) pode ser uma aliada. Cada vez mais aplicada em diversos processos, a utilização de MQL permite uma redução significativa da quantidade de óleo aplicada, apresentando a formação de um tribofilme lubrificante na região de corte, diminuindo por sua vez o atrito nas interfaces cavaco/ferramenta e ferramenta/peça, e reduzindo o calor gerado nessa região. Como consequência, obtêm-se bons acabamentos, menores forças de corte e maior vida da ferramenta quando comparado a usinagem a seco e até mesmo a alguns processos com lubrificação em abundância (Sharma et al., 2015). Porém, a utilização de MQL tem como desvantagem o fato de não eliminar completamente a utilização de fluido.

A usinagem criogênica, entretanto, apresenta-se completamente limpa, visto que são utilizados gases de baixa reatividade como fluidos refrigerantes. Geralmente utilizando nitrogênio líquido (LN<sub>2</sub>) ou gás carbônico líquido (LCO<sub>2</sub>) como fluido, este processo pode resultar em menores forças de corte e melhores acabamentos, visto que reduz significativamente a temperatura na região de corte (pode chegar a -60 °C). Além disso, afeta as durezas superficiais da ferramenta e da peça usinada resultando em redução no atrito do sistema tribológico. Porém, deve-se observar que o processo criogênico, além de possuir elevados custos para sua implementação, também afeta a precisão dimensional da peça usinada, principalmente de materiais que possuem elevado coeficiente de expansão térmica, como o alumínio (Shokrani et al. 2013).

Diversas operações de usinagem têm sido utilizadas para o processamento do alumínio aeronáutico, que possui elevada relação resistência mecânica/peso específico. Particularmente no processo de fresamento, observa-se elevado interesse da indústria automotiva e aeronáutica devido a possibilidade de geometrias complexas de alto desempenho (Duan et. al., 2020). Nesse âmbito, as características específicas do fresamento em alumínio, aliadas aos meios de lubrificação alternativos e ecologicamente amigáveis, impactam o desenvolvimento tecnológico industrial ambientalmente amigável.

O processo de usinagem a seco representa uma boa alternativa para a usinagem da liga de alumínio AA 7075-T6. De acordo com Yazid e Zainol (2020), as indústrias aeroespaciais estão muito atentas ao fato de o custo do fluido de corte ser aproximadamente de 17% do custo total de fabricação. Algumas pesquisas demonstraram vantagens no uso da usinagem a seco, em especial a AA 7075-T6, com resultados desejados para valores menores de rugosidade e com menores forças de corte em comparação à usinagem com MQL (Feix, 2019). Por fim, a usinagem a seco consiste numa alternativa sustentável em que os custos com descarte de fluido de corte podem ser eliminados desempenhando um papel importante no conceito de usinagem ambientalmente amigável.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é apresentar e comparar as vantagens e desvantagens da aplicação de quatro diferentes técnicas de lubrificação (lubrificação com fluidos vegetais, MQL, criogenia e usinagem a seco) utilizadas nos processos de fresamento, torneamento e furação em alumínio aeronáutico AA 7075.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO

Alta resistência e baixa densidade fazem do alumínio o material excelente para aeronaves (responde por até 80% do seu peso estrutural). Está presente nas asas, na fuselagem, no trem de pouso e nas estruturas de portas, janelas e assentos. Por ser ótimo dissipador de calor, permite voos a altíssimas velocidades com muito conforto térmico. O alumínio é altamente resistente a carregamentos cíclicos, sendo empregado em diversos componentes de segurança. A baixa densidade do alumínio representa um menor consumo de combustível, menor desgaste, mais eficiência e maior capacidade de carga (ABAL, 2021).

As ligas Al-Zn (série 7xxx) tratáveis termicamente possuem elevada resistência mecânica, boa conformabilidade e boa resistência à corrosão. São utilizadas quando o fator de resistência por peso é a principal característica, como na indústria aeronáutica. Por isso, são aplicadas em peças estruturais de aeronaves militares e comerciais (incluindo fuselagens e revestimento das asas). Exemplos desta liga são a AA 7050, a AA 7075 e a AA 7178 (Oliveira, 2011; Yazid e Zainol, 2020). Essas ligas de alumínio são endurecíveis por precipitação através de tratamento térmico controlado de solubilização e envelhecimento. Os tratamentos térmicos são indicados por uma letra e um número que identificam o tipo de tratamento aplicado, dentre esses podem ser destacados o T6 (solubilizado e envelhecido artificialmente) e T7 (solubilizado e estabilizado). A liga AA 7075 tratada termicamente pode atingir valores de limite de resistência a tração da ordem de 570 MPa e limite de escoamento da ordem de 505 MPa (Callister, 2000). No entanto, a liga AA 7050 alcança um limite de resistência à tração de 525 MPa e limite de escoamento de 455 MPa (Oliveira, 2011).

Os principais estudos realizados por pesquisadores encontrados na literatura estão dedicados à liga de alumínio AA 7075-T6 e que serão apresentados nas próximas seções.

## 3. TÉCNICAS APLICADAS NA USINAGEM LIMPA

### 3.1. Aplicação de Fluidos de Corte Vegetais

Comparado aos óleos minerais tradicionais, os fluidos vegetais apresentaram avanços tecnológicos e amigáveis ao meio ambiente, visto que são biodegradáveis (Kuram et. al., 2013). Apesar de suas vantagens, os estudos sobre o fresamento em AA 7075-T6 utilizando estes fluidos ainda são bastante limitados.

Bork et. al. (2014) apresentaram uma revisão sobre a aplicação do recente desenvolvido fluido de corte vegetal à base de pinhão-mansão (*jatropha curcas*), em comparação com a utilização de óleo de canola, óleos sintéticos e semissintéticos. No fresamento da liga Al 7050-T7451 foi observado que o óleo de corte de pinhão-mansão apresentou os melhores resultados em relação à lubrificação, à rugosidade média e aos erros dimensionais. Também proporcionou um aumento no tempo de vida da ferramenta que superou em aproximadamente 30% os demais óleos de corte analisados. Em relação às suas propriedades físico-químicas, este fluido mostrou-se o mais indicado para ser utilizado na usinagem da liga AA 7050-T7451 por não afetar a formação de corrosão intergranular ou de pite (não permitidas na produção de componentes aeronáuticos). Este óleo vegetal, além de ser produzido a partir de uma base limpa e fonte renovável, possui características inerentes que podem ajudar a alcançar uma fabricação sustentável.

Suarez et. al. (2011) investigaram a influência dos parâmetros de corte na precisão dimensional da superfície fresada da AA 7075-T7 utilizando insertos de metal-duro sem revestimento. Os autores compararam diferentes parâmetros através do método Fatorial Completo, investigando a utilização do corte a seco comparado ao fluido vegetal em MQL e em abundância. O estudo indicou uma melhoria de 5,6% da precisão dimensional com a utilização do fluido em abundância em comparação à usinagem a seco, enquanto que na aplicação em MQL esta melhora é levemente superior (6,7%). No entanto, o aumento da velocidade de corte no processo apresenta um maior desvio dimensional e os demais parâmetros analisados como avanço e profundidade de corte não apresentaram efeitos significativos para o processo.

Guntreddi e Ghosh (2020) identificaram que o uso de óleo de girassol não foi significativo no torneamento de alta velocidade de corte da liga AA 7075, exceto a 1000 m/min, em que os cavacos foram descontínuos, permitindo maior passagem do fluido de corte na interface cavaco/ferramenta. Com esta velocidade de corte (1000 m/min), avanço de 0,2 mm/volta e profundidade de corte de 1,0 mm foi encontrado um valor de rugosidade média 13% menor com a utilização de óleo de girassol em comparação ao corte a seco nas mesmas condições de usinagem.

O processo de furação da liga AA 7075-T6 utilizando óleo vegetal obteve menores valores de rugosidade no comparativo com o corte a seco (Kumba et al., 2015). Os pesquisadores utilizaram a modelagem em Logica *Fuzzy* para prever valores de rugosidade durante o processo de furação com três brocas de materiais diferentes e alguns parâmetros de corte pré-definidos. Com velocidade de corte de 500 m/min, avanço de 0,36 mm/volta e broca de aço rápido, a furação com óleo vegetal gerou uma rugosidade média  $R_a = 0,78 \mu\text{m}$ , enquanto que no corte a seco o menor valor encontrado com os mesmos parâmetros de corte foi  $R_a = 2,75 \mu\text{m}$ .

### 3.2. Aplicação de MQL

A utilização de mínima quantidade de lubrificação (MQL) tem sido amplamente estudada nos últimos anos em virtude de seus menores custos com fluido de corte e menores impactos ambientais.

Bankar et. al. (2019) relatam uma melhor qualidade da superfície usinada e menores temperaturas na região de corte no fresamento da AA 7075-T6 em comparação ao corte a seco e à aplicação de fluido em abundância. Os autores explicam que, além de aplicar menor quantidade de óleo, o MQL penetra melhor na região de corte e forma um filme lubrificante que reduz o atrito nas interfaces cavaco/ferramenta/peça, resultando em menores temperaturas e melhor acabamento.

Yazid et. al. (2019) conduziram um estudo sobre otimização dos parâmetros de corte no fresamento frontal da AA 7075-T6 com ferramenta de metal-duro e aplicando MQL. As variáveis controláveis de entrada (três fatores e dois níveis) foram combinadas utilizando o Fatorial Completo e avaliadas quanto à sua influência significativa sobre as variáveis de saída (rugosidade média  $R_a$  e vida da ferramenta  $T$ ) através da análise de variância (ANOVA). Considerando um intervalo de confiança igual ou superior a 95%, os resultados mostraram que a velocidade de corte ( $v_c$ ) e o avanço por dente ( $f_z$ ) foram significativos para ambas as variáveis de resposta, enquanto que a profundidade axial de corte ( $a_p$ ) foi parcialmente significativo para  $R_a$  e  $T$ , isto é, o intervalo de confiança ficou entre 90 e 95%. Assim, a otimização indicou a utilização de maior  $v_c$  (600 m/min) e de menores  $f_z$  (0,12 mm/dente) e  $a_p$  (1,4 mm), resultando em  $R_a = 0,57 \mu\text{m}$  e  $T = 14 \text{ min}$ .

Tosun e Huseyinoglu (2010) investigaram o efeito do MQL no acabamento da superfície fresada da AA 7075-T6 variando em três níveis a rotação, a velocidade de avanço, o material da ferramenta e a condição lubrificante. Os autores aplicaram um experimento Fatorial Completo, resultando em 81 execuções. Através da ANOVA, os autores observaram uma elevada significância da rotação e sua contribuição para redução da rugosidade à medida que seu valor era aumentado. Em relação aos insertos utilizados, os de metal-duro apresentaram os melhores resultados nas diferentes condições de corte. Os menores valores de rugosidade também foram resultantes do processo MQL (vazão de 300 ml/h) em que o fluido de menor viscosidade (solução 1:10) apresentou maior eficiência, pois houve melhor penetração na interface ferramenta/peça. Em baixas rotações, a condição de fluido em abundância (vazão de 60 l/h) foi mais eficiente. À medida que a rotação aumentava, o desempenho do MQL também crescia, superando a condição abundante.

Kouam et. al. (2012) cita que o torneamento com MQL da liga AA 7075-T6 com ferramenta de metal-duro revestida de  $\text{TiB}_2$  pode resultar em bom acabamento se aplicado em determinadas condições de parâmetro quando comparado ao corte a seco. Ao aplicar velocidade de corte  $v_c = 133 \text{ m/min}$ , profundidade de corte  $a_p = 1,0 \text{ mm}$  e avanço  $f = 0,05$  a  $0,20 \text{ mm/volta}$ , os autores observaram menores valores de rugosidade média ( $R_a$ ) quando utilizado MQL a uma vazão de 100 ml/h na comparação com o corte a seco utilizando iguais parâmetros. Feix (2019) realizou a otimização dos parâmetros de corte no torneamento da liga de alumínio AA 7075-T6 utilizando o experimento de Box-Behnken nas condições com MQL e a seco. Utilizando os níveis otimizados  $v_c = 554 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/volta}$  e  $a_p = 0,5 \text{ mm}$  (taxa de remoção de material  $Q = 13,8 \text{ cm}^3/\text{min}$ ), os valores de rugosidade média e média parcial obtidos com MQL ( $R_a = 0,25 \mu\text{m}$  e  $R_z = 1,55 \mu\text{m}$ ) foram similares aos produzidos no corte a seco ( $R_a = 0,21 \mu\text{m}$  e  $R_z = 1,52 \mu\text{m}$ ) utilizando níveis distintos ( $v_c = 300 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/volta}$  e  $a_p = 1,4 \text{ mm}$ ), mas este gerando maior taxa de material removido ( $Q = 21 \text{ cm}^3/\text{min}$ ).

Kilickap et al. (2011) aplicaram MQL na furação de placas de AA 7075-T6 com broca de aço rápido. Os resultados mostraram valores de rugosidade 8% menores que com aplicação de ar comprimido e 66% menores que no corte a seco.

### 3.3. Criogenia

O processo criogênico na usinagem permite a mudança na microestrutura devido à redução da temperatura na peça, o endurecimento superficial da ferramenta e uma refrigeração indireta na região de corte, ou mesmo uma aplicação direta, promovendo uma refrigeração mais efetiva desta região (Shokrani et. al. 2013).

Huang et al. (2014) realizaram o fresamento frontal de liga AA 7075 com fresa de metal-duro e relataram que o resfriamento criogênico aumenta a estabilidade da ferramenta durante a usinagem. Os autores observaram que menores marcas de vibração foram detectadas na superfície usinada com criogenia comparada à gerada no corte a seco. Notaram também que a técnica possibilita maiores níveis para os parâmetros de corte quando comparados com a usinagem a seco, aumentando assim a produtividade. Em contrapartida, Hernández et. al. (2017), obtiveram os piores acabamentos durante o fresamento da AA 7075-T6 aplicando criogenia em comparação a outras técnicas. Os autores utilizaram  $\text{CO}_2$  a  $-90^\circ\text{C}$  e pressurizado a 30 bar, ar comprimido (temperatura ambiente) a 8 bar e corte a seco. Como parâmetros de corte, utilizaram  $v_c = 950 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,3 \text{ mm/dente}$  na condição de desbaste e  $f_z = 0,15 \text{ mm/dente}$  na condição de acabamento. No caso, os menores valores de rugosidade foram obtidos na condição a seco, tanto para desbaste quanto para acabamento. Os autores afirmam que a liga de alumínio possui boa usinabilidade em condições convencionais e o processo criogênico aumenta a dureza do material-base, acelerando a taxa de desgaste da ferramenta.

A aplicação criogênica na usinagem de alumínio aeronáuticos está bastante concentrada ainda no processo de torneamento devido às questões de aplicação do refrigerante e aumento significativo da vida à fadiga de componentes comumente resultantes desse tipo de processo. Rotella et. al. (2012) citam que, durante o torneamento do AA 7075-T6, a criogenia gerou melhor acabamento e aumento da vida à fadiga do componente na comparação ao corte a seco devido ao refinamento de grão decorrente da baixa temperatura.

Não foram encontrados trabalhos que reportassem a criogenia na furação de ligas Al-Zn (série 7xxx) tratáveis termicamente.

### 3.4. Usinagem a Seco

O processo de usinagem a seco é realizado sem a aplicação de qualquer tipo de fluido para a remoção de material. Segundo Kannan et. al. (2014), as principais motivações que levam a utilização desse são as atuais leis rígidas de proteção ao meio ambiente e os altos custos associados ao descarte de fluidos de corte.

No estudo comparativo realizado por Bankar et. al. (2019), os autores observaram um valor de rugosidade média ligeiramente menor no corte a seco ( $R_a = 0,239 \mu\text{m}$ ) que com fluido de corte em abundância ( $R_a = 0,245 \mu\text{m}$ ) ao utilizar rotação de 12000 rpm, velocidade de corte de 226 m/min, velocidade de avanço de 800 mm/min e profundidade de corte axial de 0,15 mm no fresamento frontal do AA 7075-T6.

Khettabi et. al. (2017) efetuaram a comparação entre o corte a seco e com MQL no fresamento do AA 7075-T6 e constataram que o corte a seco possui vantagens sobre o MQL em determinados níveis dos parâmetros de corte. Com  $v_c$  entre 300 e 600 m/min e  $a_p = 1,0 \text{ mm}$ , o corte a seco gerou menor força de corte que com MQL. Além disso, com valores de  $v_c > 1200 \text{ m/min}$ , os valores de  $R_a$  no corte a seco situaram-se entre 0,1 e 0,2  $\mu\text{m}$ , enquanto que na usinagem com MQL, os valores de  $R_a$  se aproximaram de 0,4  $\mu\text{m}$ .

Košarac et al. (2020) avaliaram através do método de Taguchi a influência da velocidade de corte ( $v_c$ ), da profundidade de corte radial ( $a_e$ ), do avanço ( $f$ ) e da condição de lubrificação (abundante, a seco e com ar comprimido) no acabamento gerado pelo fresamento tangencial do AA 7075-T6. Os resultados mostraram que os valores de  $R_a$  foram afetados principalmente por  $f$  (83,47%), seguido por  $a_e$  (2,14%),  $v_c$  (1,8%) e a condição de lubrificação (1,83%). A pouca influência do meio lubrificante mostra que o corte a seco pode ser considerado a melhor opção em termos de saúde do operador e meio ambiente.

No torneamento com alta velocidade do AA 7075-T6, Imbrogno et. al. (2018) identificaram que a força de corte foi menor para o corte a seco que o MQL quando  $v_c$  estava entre 1000 e 1250 m/min e  $f$  entre 0,1 e 0,3 mm/volta. Os autores também registraram uma menor força de avanço e um menor desgaste de flanco da ferramenta no corte a seco em comparação ao corte com MQL aplicando  $v_c = 1500 \text{ m/min}$  e  $f = 0,3 \text{ mm/volta}$ .

Segundo Rivero et al. (2006), os principais problemas na furação a seco do AA 7075-T6 são o desgaste acelerado da ferramenta devido ao mecanismo de adesão e a formação de grandes rebarbas. Assim, os autores realizaram experimentos visando otimizar os parâmetros do processo. Os experimentos foram conduzidos usando diferentes revestimentos (TiAlN e DLC) de ferramentas em condições de corte variadas. Constataram que se a quantidade de energia mecânica necessária para usinar um furo for minimizada, a temperatura na região de corte também diminuirá. A ferramenta com TiAlN obteve melhores resultados em termos de tamanho da rebarba, consumo de energia e vida útil da ferramenta. Além disso, as rebarbas diminuíram com o aumento do avanço (maior espessura de corte).

Kilickap (2010) avaliou pelo método de Taguchi o efeito do ângulo da ponta da broca, do avanço e da velocidade de corte na rugosidade da parede do furo e na altura da rebarba durante a furação a seco do AA 7075. Os resultados indicaram a necessidade de um ângulo de ponta de perfuração alto em combinação com velocidade de corte reduzida e parâmetros de avanço para minimizar a altura da rebarba. Os menores valores de rugosidade foram obtidos com parâmetros semelhantes. Os valores preditos e medidos apresentaram boa compatibilidade.

## 4. ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE USINAGEM LIMPA

Na usinagem do AA 7075-T6 as técnicas demonstradas neste trabalho possuem vantagens e desvantagens de acordo com o processo e os parâmetros adotados. Os diversos estudos apresentados com as configurações e equipamentos diferentes, como também o ferramental aplicado sendo diferente nas técnicas de usinagem dificultam uma comparação direta e precisa que indique qual a melhor aplicação para a usinagem do AA 7075-T6. Entretanto, é possível fazer uma análise genérica de todas as técnicas avaliando os pontos que mais se destacam na usinagem do AA 7075-T6 dentro de cada estratégia de usinagem limpa. Nos principais mecanismos de pesquisas são encontrados trabalhos dedicados a técnicas de fresamento e torneamento, e poucos trabalhos em furação em comparação aos demais. Assim sendo, a Tab. 1 faz um comparativo geral das técnicas apresentadas neste trabalho demonstrando as suas vantagens e desvantagens dos principais processos de usinagem utilizados.

Tabela 1. Comparativo das técnicas de usinagem limpa

| Meio<br>lubrificadorrefrigerante | Usinagem limpa da liga de alumínio AA 7075-T6                                                                                 |                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                |                                                                                                                            |                                                                                                                                  |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                  | Fresamento                                                                                                                    |                                                                                                  | Torneamento                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                | Furação                                                                                                                    |                                                                                                                                  |
|                                  | Vantagens                                                                                                                     | Desvantagens                                                                                     | Vantagens                                                                                                                                                                                              | Desvantagens                                                                                                                   | Vantagens                                                                                                                  | Desvantagens                                                                                                                     |
| Vegetal                          | Melhor lubrificação com óleo de pinhão-manso.<br>Aumento da vida da ferramenta.<br>Sem interferência corrosiva.<br>Renovável. | Menor poder de refrigeração.<br>Crescimento de bactérias.                                        | Óleo de girassol gera rugosidade 13% menor que o corte a seco c/ $v_c = 1000$ m/min.                                                                                                                   | Óleo de girassol gera rugosidade maior que o corte a seco para $v_c$ entre 500 e 700 m/min.                                    | Rugosidade menor que no corte a seco c/ $v_c = 500$ m/min e broca HSS.                                                     | Proliferação de bactérias.<br>Rugosidade maior que no corte a seco c/ $v_c = 500$ m/min e broca de metal-duro revestida com TiN. |
| MQL                              | Melhor penetração do fluido na região de corte.<br>Menor atrito.<br>Melhor rugosidade com $v_c$ de 500 a 600 m/min            | Menor vida da ferramenta com $v_c$ de 500 a 600 m/min.<br>Pior acabamento em baixas velocidades. | Melhor acabamento que o corte a seco c/ $v_c = 133$ m/min, $a_p = 1$ mm e $f$ entre 0,05 e 0,20 mm/volta                                                                                               | Menores taxas de remoção de material que o corte a seco.                                                                       | Rugosidade 8% menor que o ar comprimido e 66% menor que o corte a seco.<br>Menor temperatura na interface ferramenta/peça. | Produção de pequenas rebarbas na saída dos furos.                                                                                |
| Criogenia                        | Parâmetros de corte elevados.                                                                                                 | Pior acabamento em relação ao corte a seco.                                                      | Melhor acabamento;<br>Aumento da vida à fadiga do componente.                                                                                                                                          | Alto custo de implementação.                                                                                                   | -                                                                                                                          | -                                                                                                                                |
| Seco                             | Em relação ao MQL:<br>Menor força de corte com $v_c$ de 300 a 600 m/min<br>Menor rugosidade com $v_c > 1200$ m/min.           | Aumento da temperatura na região de corte.                                                       | Em relação ao MQL:<br>Menor força corte com $v_c$ de 1000 a 1250 m/min e $f$ entre 0,1 e 0,3 mm/volta.<br>Menor desgaste de flanco e menor força de avanço com $v_c = 1500$ m/min e $f = 0,3$ mm/volta | Maiores forças de corte, força de avanço e desgaste de flanco que o MQL com $v_c < 1000$ m/min e $f$ entre 0,1 e 0,3 mm/volta. | Menor custo com o processo<br>Menor impacto ambiental<br>Redução da formação de rebarbas com a otimização de parâmetros    | Desgaste acelerado da ferramenta<br>Formação de rebarbas                                                                         |

## 5. CONCLUSÃO

Observa-se que a mínima quantidade de lubrificante (MQL), por possuir diversos parâmetros como pressão de aplicação, ângulo de incidência do fluido, vazão, entre outras, necessita de um estudo particular sobre a otimização de sua aplicação em cada processo, o que pode ser considerado uma desvantagem no ponto de vista econômico. Entretanto, sua utilização mostrou diversas vantagens. Apesar de não eliminar completamente a utilização do fluido de corte, pode ser combinada com óleos vegetais que apresentam desempenho similar ou superior aos fluidos convencionais, e são biodegradáveis. Assim, a união entre os dois minimiza os pontos negativos de ambos, visto que os óleos vegetais ainda possuem elevado custo e baixo tempo de vida útil; entretanto, ao ser aplicado em MQL, tal fator é amortecido.

Em um comparativo com o corte a seco, o MQL apresentou desvantagens que indicam a necessidade de uma análise cautelosa para sua aplicação. No estudo demonstrado por alguns pesquisadores, o torneamento de AA 7075-T6 utilizando esta técnica obteve maiores forças de cortes e maior desgaste de flanco em velocidades de corte abaixo de 1000 m/min.

A usinagem criogênica não apresentou vantagens significativas no fresamento de AA 7075-T6 que justificassem os custos de sua aplicação, apresentando até em certos casos desempenho inferior à usinagem a seco. Observou-se um melhor acabamento e aumento da vida à fadiga do componente após o torneamento com criogenia. Apesar de os níveis dos parâmetros de corte empregados poderem ser maiores e isso aumentar a produtividade, é necessário avaliar seu alto custo de implementação, o que pode inviabilizar a sua aplicação.

As indústrias aeroespaciais buscam continuamente o aperfeiçoamento dos processos de usinagem de alumínio aeronáuticos, e também se mantêm atentas às legislações que estão cada vez mais exigentes. Assim, deve-se realizar uma profunda e cautelosa análise de qual estratégia a ser aplicada. As técnicas de usinagem limpa podem ser diferentes de acordo com os parâmetros de corte e os processos adotados na usinagem do alumínio aeronáutico, e necessitam ser bem avaliados em cada situação que se destina a sua utilização.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Capes (nº 88887.495511/2020-00) pela bolsa de estudos concedida.

## 7. REFERÊNCIAS

- ABAL, 2021. “Alumínio: Aplicações e Vantagens”. Associação Brasileira do Alumínio. 26 Jan. 2021 <<https://abal.org.br>>
- Bankar, N. D., Shelke, G. D., Irfan, M. D., 2019. “Experimental Investigation of Aluminum 7075 using Dry, Wet and MQL Condition”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 10, p. 957-962.
- Bork, C. A. S., Gonçalves, J. F. S., Gomes, J. O. e Gheller, J., 2014. “Performance of the jatropha vegetable-base soluble cutting oil as a renewable source in the aluminum alloy 7050-T7451 milling”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 7, No. 3, p. 210-221.
- Callister Jr., W. D., 2000. *Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução*, 5ª Edição, Guanabara, p. 258-259.
- Duan, Z., Li, C., Zhang, Y., Dong, L., Bai, X., Yang, M., Jia, D., Li, R., Cao, H. e Xu, X., 2020. “Milling surface roughness for 7050 aluminum alloy cavity influenced by nozzle position of nanofluid minimum quantity lubrication”, *Chinese Journal of Aeronautics*. In Press, Corrected Proof.
- Feix, E. C., 2019. *Otimização do Torneamento de Acabamento a Seco e com MQL nas Ligas de Alumínio 6082-T6 e 7075-T6 utilizando Box-Behnken Design*, Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, PROMEC, UFRGS.
- Guntreddi, B. e Ghosh, A., 2020. “High-speed machining of aluminium alloy using vegetable oil-based small quantity lubrication”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. In Press, Corrected Proof.
- Hernández, P., Ares, E., Martínez, J. e Nieto, I., 2017. “Analysis of CO<sub>2</sub> dry ice projection on Al 7075, applied to drilling and milling operations”. *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, p. 205-210.
- Huang, X., Zhang, X., Mou, H., Zhang, X. e Ding, H., 2014. “The influence of cryogenic cooling on milling stability”. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 12, p. 3169-3178.
- Imbrogno, S., Rinaldi, S., Suarez, A., Arrazola, P. e Umbrello, D., 2018. “High-speed machinability of the aerospace alloy AA7075 T6 under different cooling conditions”. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1960, No. 1, A. 070013
- Kannan, I. S. e Ghosh, A., 2014. “Dry machining of AA7075 by H-DLC coated carbide end mill”. *Procedia Materials Science*, Vol. 5, p. 2615-2621.
- Khettabi, R., Nouioua, M., Djebara, A. e Songmene, V., 2017. “Effect of MQL and dry processes on the particle emission and part quality during milling of aluminum alloys”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 92, p. 2593-2598.
- Kilickap, E., 2010. “Modeling and optimization of burr height in drilling of Al-7075 using Taguchi method and response surface methodology”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, p. 911-923.
- Kilickap, E., Huseyinoglu, M. e Ozel, C., 2011. “Empirical study regarding the effects of minimum quantity lubricant utilization on performance characteristics in the drilling of Al 7075.” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 33, No. 1, p. 52-57.
- Kouam, J., Songmene, V., Balazinski, M. e Hendrick, P., 2015. “Effects of minimum quantity lubricating (MQL) conditions on machining of 7075-T6 aluminum alloy”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 79, p. 1325-1334.
- Košarac, A., Šikuljak, L., Obradović, Č., Mladenović, C. e Zeljković, M., 2020. “Cutting parameters influence on surface roughness in AL 7075 milling”. In: *19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.

- Kumba, A. B., Kumar, G. V. e Venkataramaiah, P., 2015. "Prediction of surface roughness in drilling of Al 7075/10%-SiCp composite under MQL condition using fuzzy logic". *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 8, No. 12, p. 1-10.
- Kuram, E., Ozcelik, D. e Demirbas, E., 2013. "Environmentally friendly machining: Vegetable based cutting fluids". In: *Green Manufacturing Processes and Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 23-47.
- Oliveira, R. R., 2011. *Avaliação da Tensão Residual em Alumínio 7050 Conformado pelo Processo Peen Forming*, Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação de Tecnologia Nuclear em Materiais, IPEN-USP.
- Rivero, A., Aramendi, G., Herranz, S. e Lopez, L. N., 2006. "An experimental investigation of the effect of coatings and cutting parameters on the dry drilling performance of aluminium alloys". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, No. 1, p. 1-11.
- Rotella, G., Lu, T., Settineri, L., Dillon Jr, O., W. e Jawahir, I. S., 2012. "Dry and cryogenic machining: Comparison from the sustainability perspective". In: *Sustainable Manufacturing*, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 95-100.
- Sharma, V. S., Singh, G. e Sørby, K., 2015. "A review on minimum quantity lubrication for machining processes". *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 30, No. 8, p. 935-953.
- Shokrani, A., Dhokia, V., Muñoz-Escalona P. e Newman, S., T., 2013. "State-of-the-art cryogenic machining and processing". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 26, No. 7, p. 616-648.
- Suarez, M. P., Costa, E. S., Machado, Á, R. e Abrão, A. M., 2011. "Dimensional accuracy of end milled slots in 7075-T7 aluminium alloy". *Journal of Machine and Forming Technologies*, Vol. 3, No. 1-2, p. 20-30.
- Tosun, N. e Huseyinoglu, M., 2010. "Effect of MQL on surface roughness in milling of AA7075-T6". *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, No. 8, p. 793-798.
- Yazid, M. Z. A., Zainol, A. e Mustapha, A. M., 2019. "Effect of machining parameters in milling aluminum alloy 7075-T6 under MQL condition". *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol. 9, No. 2, p. 109-113.
- Yazid, M. Z. A. e Zainol, A., 2020. "Tool life and surface roughness in dry high-speed milling of aluminum alloy 7075-T6 using bull nose carbide insert". *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 15, No. 1, p. 128-138.

## 8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

## CLEAN MACHINING OF AERONAUTICAL ALUMINUM ALLOY AA 7075: A BRIEF LITERATURE REVIEW

Abdiel M. Vilanova<sup>1</sup>

Émerson S. Passari<sup>2</sup>

André J. Souza<sup>3</sup>

Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) – Department of Mechanical Engineering (DEMEC) – Laboratory of Automation in Machining (LAUS) – 425 Sarmento Leite St. – Zip Code 90050-170 – Porto Alegre, RS, Brazil.

<sup>1</sup>abdiel.vilanova@gmail.com; <sup>2</sup>emerson.passari@gmail.com; <sup>3</sup>ajsouza@ufrgs.br

**Abstract:** The global concern with the environment and its impacts on society has affected the manufacturing processes that commonly influence environmental pollution. Such processes are adopting new technologies to meet the demand for products with quality and productivity sustainably. This concern is continuous, and its impacts on society need to search for environmentally friendly alternatives in manufacturing processes. The study of clean machining in aeronautical aluminum alloys machining processes is of great interest to the aerospace industries, where precision and quality are significant differentials in this segment. Thus, the work compares some techniques such as the minimum quantity lubrication (MQL), the application of vegetal-based fluids, cryogenics, and dry cutting, demonstrating its advantages and limitations in the milling, turning and drilling processes of 7075 aluminum alloy.

**Keywords:** Machining Al 7075; MQL; Cryogenic; Vegetal-based fluid; Dry cutting

## RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only ones responsible for the printed material included in this paper.