

A POSSIBILIDADE DO USO DO RESFRIAMENTO CRIOGÊNICO COMO UMA SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL NA USINAGEM DE LIGAS DURAS: UMA BREVE REVISÃO

Carlos Renato Pagotto

Tales Humberto de Aquino Boratto

Universidade Federal de Juiz de Fora – Faculdade de Engenharia

Rua José Lourenço Kelmer, S/N – campus universitário – São Pedro – Juiz de Fora – MG

e-mails: renato.pagotto@ufjf.br, tales.boratto@engenharia.ufjf.br

Resumo: Apesar do calor gerado durante a formação do cavaco promover a redução das tensões de cisalhamento de ligas metálica, podendo facilitar o processo de usinagem, as altas temperaturas causam a diminuição da vida útil da ferramenta, baixa qualidade superficial do produto final, além da necessidade do uso em abundância de fluido de corte. Os fluidos na usinagem podem causar corrosão na peça e na máquina ferramenta, provocar incêndios, danos à saúde dos operadores e degradação do meio ambiente, além de se tornar necessário ter instalações de reciclagem deste produto. Com o desenvolvimento de materiais de difícil usinagem que necessitam de grandes quantidades de fluido de corte e a cobrança por sustentabilidade, o setor industrial tem buscando soluções para a diminuição do calor na usinagem. Este estudo avalia a possibilidade do uso do resfriamento criogênico de ligas duras. A usinagem criogênica é considerada uma técnica limpa devido à ausência de óleo lubrificante, não deixando resíduos na peça e nem no cavaco, o que consequentemente dispensa a limpeza da peça e a reciclagem dos cavacos. O fluido criogênico absorve rapidamente o calor dentro da zona de corte, causando sua evaporação. A aplicação do nitrogênio líquido a baixas temperaturas dissipa o calor e proporciona uma camada de amortecimento na interface ferramenta/cavaco reduzindo o atrito nessa região. A usinagem criogênica também é útil para eliminar o desgaste por lascamento e deformação plástica da ferramenta de corte, reduzir a temperatura de corte mesmo em altas velocidades de corte. Além disso, o jato do fluido criogênico ajuda a quebrar o cavaco. Este trabalho faz uma revisão verificando o desempenho da usinagem criogênica em materiais de alta dureza, sendo possível verificar os avanços obtidos nessa área. Os resultados mostram uma melhora substancial na qualidade superficial, vida da ferramenta, corrosão, desgaste da ferramenta, dureza, dentre outras melhorias, porém ainda estudos substanciais precisam ser feitos para avaliar o uso de aparato criogênico nas empresas.

Palavras-chave: Usinagem; Sustentabilidade; Resfriamento Criogênico; Ligas duras.

1. INTRODUÇÃO

O fluido de corte é usado em abundância na usinagem de materiais de alto desempenho para a indústria aeroespacial, automobilística, fabricação de próteses ortopédicas, entre outros, desempenhando um papel importante no processo (Kim et al., 2021). Para atender às demandas do cenário tecnológico atual, engenheiros desenvolveram materiais que atendem a uma gama cada vez mais ampla de altos índices de desempenho, além de materiais já existentes (Proud et al., 2022). O titânio, o níquel e suas ligas são exemplos desses materiais que são de difícil usinagem devido às suas propriedades como baixo módulo de elasticidade, resistência a altas temperaturas e baixa condutividade térmica (García-Martínez et al., 2019).

O uso do fluido de corte na usinagem desses materiais visa o aumento da produtividade, pois tem função de diminuir o atrito na interface ferramenta peça, cavaco-ferramenta, reduzir a temperatura nas zonas de corte e promover a quebra e a expulsão do cavaco gerado na usinagem e proteger a peça de trabalho, a ferramenta e a máquina ferramenta da corrosão (Khanna et al., 2021).

A demanda global de lubrificantes foi de 39,4 milhões de toneladas em 2015 e deve chegar a 43,9 milhões de toneladas agora em 2022 (Benedicto et al., 2017). Porém, os fluidos de corte exigem cuidados especiais na sua manipulação, manutenção, transporte e armazenagem. A presença de água nas soluções e emulsões podem acelerar um processo de corrosão, sendo necessário o uso de aditivos anticorrosivos. Os fluidos de corte podem entrar em combustão, tornando necessário ter atenção às condições de corte e à formulação do óleo. Além disso, névoas de óleo podem irritar a pele e as vias respiratórias, causando doenças graves aos operadores. O produto também pode emitir vapores, fumaças e gases, causando efeitos nocivos à atmosfera além da degradação do solo e recursos hídricos através do descarte inadequado (Hegab et al., 2019; Singh et al., 2020).

Devido a todos esses problemas, muitos governos estão tomando decisões a fim de garantir que os fluidos de corte estejam em conformidade com a norma ISO 14000 (Yildirim, 2020). A fim de minimizar e até eliminar esses impactos,

vários pesquisadores tem buscado soluções para tornar o processo de usinagem mais sustentável, várias técnicas tem sido estudadas há muitos anos (Danish et al., 2022; Deshpande et al., 2018, De Oliveira et al., 2020).

No entanto, as novas técnicas chamadas de Usinagem Verde podem alcançar níveis de qualidade equivalente ou até mesmo superiores às técnicas convencionais (Wickramasinghe et al., 2020). De acordo com Krolczyk et al. (2019), a usinagem de alto desempenho, com a minimização dos seus efeitos no meio ambiente, pode ser caracterizada pelo círculo de usinagem sustentável adaptado por Teles et al. (2022), que consiste em técnicas de lubrificação com um impacto relativamente baixo no meio ambiente. Nas últimas décadas foram desenvolvidas novas alternativas para superar as principais desvantagens dos fluidos de corte. As principais alternativas incluem usinagem a seco, MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação), lubrificação sólida, resfriamento criogênico, refrigeração gasosa, fluidos de corte sustentáveis e nanofluidos (Benedicto, 2017). Algumas dessas alternativas como usinagem a seco e MQL foram amplamente avaliados do ponto de vista técnico, no entanto, o estudo de outras alternativas como refrigeração gasosa receberam menos atenção. Portanto, são necessários esforços para o estudo dessas alternativas tanto no aspecto econômico como ambiental. A Fig. 1 apresenta o círculo de usinagem sustentável, mostrando a criogenia como uma técnica sustentável.



Figura 1. Círculo de usinagem sustentável (Teles et al., 2022 apud Krolczyk et al., 2019).

Estudos com refrigeração criogênica tem tido um papel significativo na melhoria da eficiência, aumentando a qualidade das peças usinadas, desenvolvendo uma metodologia aceitável tecno-econômica e ecologicamente na usinagem de componentes (Gowthaman et al, 2022). Esta técnica começou a ser estudada em 1968 por Uehara e Kumagai quando os óleos tradicionais foram substituídos como refrigerantes por gases líquidos como hélio, dióxido de carbono e nitrogênio (Zindani e Kumar, 2020). Pesquisas feitas nos últimos anos mostram a superioridade do resfriamento criogênico às técnicas tradicionais em termos de integridade superficial e vida útil da ferramenta de corte (Khanna et al., 2021). A usinagem criogênica é considerada uma técnica limpa devido à ausência de óleo lubrificante, não deixando resíduos na peça e nem no cavaco e, consequentemente, dispensando a limpeza da peça e reciclagem dos cavacos. Além disso, o fluido criogênico absorve rapidamente o calor dentro da zona de corte, causando sua evaporação (Shah et al., 2020). As principais funções do resfriamento criogênico no corte dos metais foram definidas como sendo a remoção eficaz do calor na zona de corte, diminuindo a temperatura de corte, modificação das características do atrito na interface ferramenta/cavaco e alteração das propriedades da peça e do material da ferramenta.

Segundo Gupta et al. (2020) a aplicação do nitrogênio líquido a baixas temperaturas dissipa o calor e proporciona uma camada de amortecimento reduzindo o atrito naquela região. A usinagem criogênica também é útil para eliminar o desgaste por lascamento e deformação plástica da ferramenta de corte, reduzir a temperatura de corte mesmo em altas velocidades de corte. Além disso, o jato do fluido criogênico ajuda a quebrar o cavaco.

No entanto, a adequação do processo ainda é um problema complexo que precisa ser abordado pela comunidade científica que trabalha nessa área. Em um futuro próximo, a possibilidade de a usinagem criogênica ser integrada à usinagem convencional (Faisal et al., 2019) precisa ser discutida. Além disso, as discussões devem considerar a integração da criogenia à Indústria 4.0, considerando o comportamento de diferentes materiais. Há ainda uma discussão considerando a redução de custos com perspectiva industrial.

2. METODOLOGIA DA REVISÃO

Para a busca dos trabalhos na base de dados “Scopus” foi utilizada uma expressão lógica com as seguintes palavras-chave: (“cryogenic” AND “machining”) OR (“cryogenic” AND “turning”) AND (“cryogenic” AND “drilling”) AND (“cryogenic” AND “milling”). A pesquisa selecionou artigos com acesso aberto. Na busca foram incluídos estudos da influência dos parâmetros de corte em ambiente criogênico ou híbrido na qualidade superficial da peça, desgaste da ferramenta, temperatura de corte, forças de corte, corrosão, morfologia do cavaco, dureza, tensões residuais, dentre outras saídas compatíveis com o trabalho. Foram excluídos trabalhos de pesquisadores que realizaram experimentos com alguns tipos de aço e/ou aço inoxidável e alguns artigos de revisão. Ao final de todas essas etapas, foram obtidos 86 trabalhos. Destes, apenas 18 foram selecionados para leitura superficial (resumo e conclusão), como mostrado na Tabela 1. Porém, para uma discussão mais detalhada do assunto, foram escolhidos 2 artigos sobre torneamento, 2 artigos sobre fresamento e 2 artigos sobre furação. O critério para a escolha destes artigos foi o número de citações e relevância do tema. A Tabela 1 mostra as características de tais trabalhos escolhidos: autor e ano de publicação, material usinado, condições de resfriamento criogênico e o processo de usinagem a que o artigo se refere.

3. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

As estratégias de fabricação sustentável estão associadas a técnicas sustentáveis empregadas na indústria com o uso de materiais inteligentes, compósitos e revestimentos avançados na utilização de práticas de fabricação modernas como processos híbridos, técnicas de manufatura aditiva, usinagem consciente/verde, práticas de manufatura enxuta, automação, planejamento dos recursos empresariais, sistemas de gerenciamento de ciclo do produto, reciclagem e remanufatura. Esses são as formas principais para o impulsionamento dos três pilares da sustentabilidade.

A sustentabilidade nos processos de usinagem é influenciada significativamente pelos parâmetros do processo, geometria e material da ferramenta, geometria e material da peça, e estratégias de resfriamento e lubrificação. A sustentabilidade durante a usinagem pode ser alcançada de várias formas, tais como as listadas a seguir (Benedicto et al., 2017; Chandel et al., 2022):

- Seleção de condições ótimas de usinagem a fim de minimizar o consumo de energia;
- Seleção correta de materiais, geometrias e revestimentos de ferramentas, aumentando desta forma, sua vida útil, além de promover uma boa qualidade superficial na peça usinada;
- Emprego de processos de usinagem híbrida (*Hybrid Machining Process* - HMPs) a fim de eliminar a necessidade de operações de acabamento posteriores;
- Adoção de técnicas avançadas de lubrificação/resfriamento como Mínima Quantidade de Fluido (MQF) e resfriamento criogênico, reduzindo o impacto ambiental e minimizando os custos.

Segundo Chandel et al. (2022), a usinagem sustentável é um processo subtrativo, em que uma ferramenta de corte é usada para remover material com boa qualidade superficial da peça, minimizando o consumo de energia.

A alta reatividade térmica, baixa condutividade térmica e alta dureza são alguns dos elementos que tornam as ligas duras difíceis de serem usinadas, principalmente a altas velocidades de corte. Isso aumenta o custo de fabricação, especialmente na indústria aeroespacial, onde é uma prática comum retirar mais de 90% de material para a fabricação de um único componente (Gupta et al., 2020). Existem vários caminhos para se tentar conseguir a diminuição dos custos de usinagem, tal como a seleção correta da ferramenta de corte (raio de ponta, ângulos e principalmente revestimentos) com o intuito de minimizar o desgaste devido às altas temperaturas geradas nas zonas de corte, a otimização das condições de corte para melhorar a eficiência da usinagem, dentre outros. Outra estratégia seria uma lubrificação e refrigeração eficientes com o intuito de reduzir a geração de calor inerente ao processo de corte (Mia et al., 2018). Nas últimas décadas tem acontecido avanços importantes em estudos para se conseguir a redução deste calor, entre eles o uso de ar a alta pressão, líquidos refrigerantes ou via refrigeração criogênica (Khanna et al., 2021). O uso de nitrogênio líquido como refrigerante está se tornando atrativo porque é um fluido limpo, barato, não tóxico e não contamina o meio ambiente (Pervaiz et al., 2019).

O resfriamento criogênico usa o nitrogênio líquido (LN₂) a -196 °C ou o dióxido de carbono (CO₂) a -78 °C como suporte durante a usinagem. O LN₂ absorve o calor e evapora rapidamente formando uma camada de gás entre o cavaco e a superfície da ferramenta, atuando como lubrificante (Pimenov et al., 2021). O uso do LN₂ é seguro. O líquido evapora após o uso (se torna parte do ar) e, portanto, não deixa resíduos. A Fig. 2 mostra um exemplo de resfriamento com LN₂.

Krolczyk et al. (2019) diz que o resfriamento criogênico é eficiente, de fácil instalação e não causa impacto negativo nas peças usinadas. Mas ainda segundo Sing et al. (2020), apesar de o nitrogênio líquido e o CO₂ serem fluidos básicos, em geral, o resfriamento criogênico é um sistema caro, pois necessita de equipamentos especiais para se conseguir baixíssimas temperaturas. No entanto, apesar do alto custo do equipamento e dos desafios para a implementação desta técnica, é uma alternativa de interesse em operações especiais e quando o custo da ferramenta é alto. O uso do CO₂ líquido é eficaz na redução no desgaste de cratera em ferramentas de metal duro na usinagem de ligas de titânio, superligas à base de níquel austenítico e outros materiais de difícil usinagem (Proud et al., 2022).

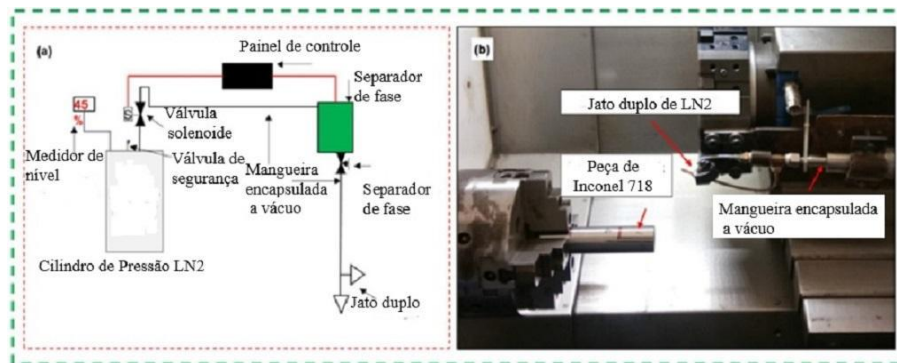


Figura 2. a) Exemplo de um sistema de resfriamento criogênico de LN₂ e b) torneamento de Inconel 718 (adaptado de Khanna et al. (2020a)).

A usinagem criogênica é uma abordagem de usinagem que atende aos três pilares da sustentabilidade (Sing et al., 2020) - economia, meio ambiente e sociedade - em um contexto com os principais impulsionadores. Tais impulsionadores que sustentam esses pilares são a energia, a eficiência de custos e recursos, a redução de gerenciamento de resíduos, a saúde humana, a segurança operacional e o respeito ao meio ambiente. A Fig. 3 traz um esquema dos três pilares da sustentabilidade e seus impulsionadores na usinagem (Gupta et al., 2017).

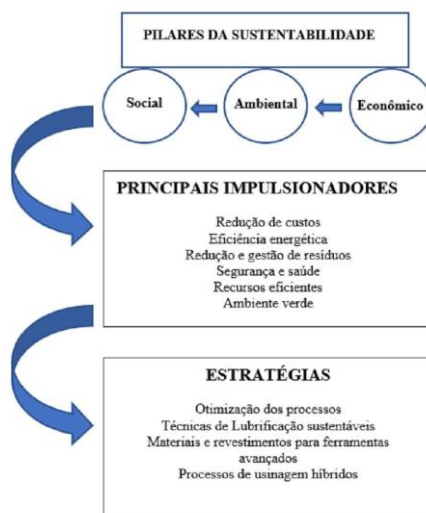


Figura 3. Esquema mostrando várias estratégias de usinagem sustentável atingindo os principais impulsionadores para reforçar os três pilares da sustentabilidade.

Na usinagem criogênica, os líquidos criogênicos refrigeram a zona de corte, mas também podem tratar a ferramenta de corte a fim de aumentar sua vida, diminuindo os desgastes, e tratar a peça antes da usinagem, melhorando sua isotropia. A Fig. 4 mostra as aplicações do tratamento criogênico (Deshpande et al., 2018). De acordo com esta figura, a criogenia pode ser usada de 3 maneiras: no processo de usinagem, no crioprocessamento das peças e no crioprocessamento das ferramentas. Na primeira, o fluxo criogênico é enviado diretamente para a zona de corte para quebrar o fluxo de calor, reduzir a taxa de desgaste da ferramenta e melhorar o desgaste da superfície. O crioprocessamento da ferramenta é um método para melhorar a resistência ao desgaste da ferramenta, tratando-a antes do processo de usinagem. Por fim, a técnica do crioprocessamento da peça restringe a temperatura abaixo da temperatura de transição vítrea da usinagem, melhorando sua usinabilidade (Khanna et al., 2021).

A Fig. 5 mostra os principais *outputs* dos 18 trabalhos estudados. A qualidade superficial da peça e o desgaste da ferramenta de corte são os principais parâmetros estudados pelos pesquisadores, seguido por forças de usinagem e morfologia do cavaco, dentre outros.



Figura 4. Aplicações do tratamento criogênico (adaptado de Khanna et al., 2021).



Figura 5. Outputs dos trabalhos estudados.

O efeito da orientação do bocal de saída do refrigerante criogênico na capacidade de resfriamento também foi investigado. Os pesquisadores perceberam que a orientação ortogonal é a melhor em relação à máxima eficiência do resfriamento. As principais funções do LN_2 e do LCO_2 (CO_2 líquido) são: retirar o calor da região de corte, refrigeração da ponta da ferramenta, reduzir o atrito da região de corte quando combinado com a técnica MQL, resfriamento da peça no caso de compósitos, fragilização dos cavacos para quebra. A Fig. 6 mostra as 3 formas de orientação do bocal criogênico (Khanna et al., 2021, García-Martínez et al., 2019).

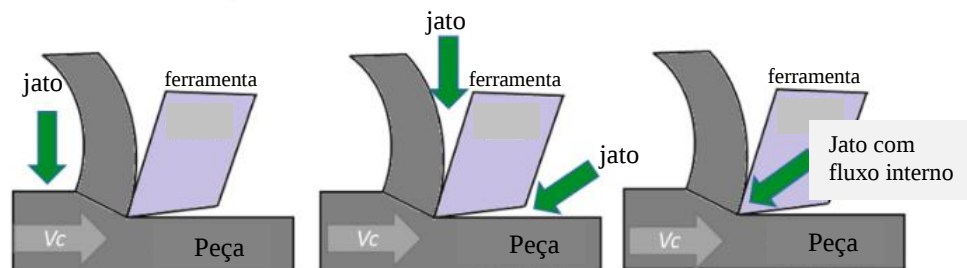


Figura 6. Métodos de resfriamento criogênico (adaptado de Khanna et al., 2021)

Poucos pesquisadores estão focando nos custos de implementação ou adaptando esta tecnologia nas indústrias. Um dos principais desafios é conseguir fornecer refrigerantes criogênicos a alta pressão. As técnicas de geração de pressão costumam gerar pressões de 1 MPa, o que não é suficiente para uso na criogenia em grande escala (Khanna et al, 2021). Segundo Sarikaya et al. (2021), a usinagem criogênica é a candidata mais promissora para a usinagem sustentável de ligas leves, portanto são necessárias mais pesquisas em relação à aplicação da técnica no chão de fábrica.

A Tabela 1 apresenta os artigos mais citados nos últimos 5 anos sobre a usinagem criogênica. Apesar de se usar criogenia nos processos de fabricação há muito tempo, existem perguntas que precisam ser respondidas para que as pesquisas não se tornem apenas material desperdiçado. Portanto, a usinagem criogênica é ecologicamente sustentável de verdade? Existem empresas usando protótipos da usinagem criogênica? Seria viável? Quais os custos dessa tecnologia? Já a Tabela 2 mostra os dois mais significativos trabalhos de resfriamento em termos de número de citações, para os processos de usinagem por torneamento, fresamento e furação. Percebe-se nas obras lidas que as pesquisas, apesar de bem conduzidas, não entram de forma mais direta e aprofundada na possibilidade de uso da criogenia em escala industrial junto a Indústria 4.0. A Fig. 7 mostra um resumo da Tabela 2.

Tabela 1. Classificação da revisão da literatura usando a usinagem criogênica.

Autor	Material	Criogenia	Processo
Yildirim et al. (2020a)	Liga Níquel 625	LN ₂ , CMQL	Torneamento
Mia et al. (2019)	Ti-6Al-4V	LN ₂	Torneamento
Khanna et al. (2021)	Ti-6Al-4V	LCO ₂	Torneamento
Jamil et al. (2019)	Ti-6Al-4V	LN ₂ , CMQL	Torneamento
Gupta et al. (2021)	Ti-6Al-4V	LN ₂ , CMQL	Torneamento
Gupta et al. (2021a)	Ti-6Al-4V	LN ₂ , CO ₂	Torneamento
Halim et. al. (2019)	Inconel 718	LCO ₂	Fresamento
Jamil et al. (2019)	Ti-6Al-4V	LN ₂ , CO ₂ , CMQL	Fresamento
Wu et al. (2022)	Ti-6Al-4V	MQL, CMQL	Fresamento
Shokrani et al. (2019)	Ti-6Al-4V	LN ₂ , CMQL	Fresamento
Jamil et al., (2021)	Ti-6Al-4V	LN ₂ , CO ₂	Fresamento
Pereira et al. (2020)	Inconel 718	LN ₂ , CMQL	Fresamento
Uçak e Çiçek (2018)	Inconel 718	LN ₂ , CO ₂	Furação
Khanna et al. (2020c)	Compósito CFRP	LN ₂	Furação
Khanna et al. (2020b)	Inconel 718	LN ₂	Furação
Shah et al. (2020)	Inconel 718	LCO ₂	Furação
Joshi et al. (2018)	Compósito CFRP	LN ₂	Furação
Impero et al. (2018)	Compósito CFRP/Ti	LN ₂	Furação

Tabela 2. Artigos discutidos no trabalho de revisão bibliográfica.

Autor	Título	Periódico
Mia et al. (2019) 122 citações (set/2022)	Multi-objective optimization and life cycle assessment of eco-friendly cryogenic N2 assisted turning of Ti-6Al-4V	<i>Journal of Cleaner Production</i>
Gupta et al. (2021) 69 citações (set/2022)	Experimental characterization of the performance of hybrid cryo-lubrication assisted turning of Ti-6Al-4V alloy	<i>Tribology International</i>
Jamil et al. (2021) 51 citações (set/2022)	Sustainable milling of Ti-6Al-4V: A trade-off between energy efficiency, carbon emissions and machining characteristics under MQL and cryogenic environment	<i>Journal of Cleaner Production</i>

Shokrani et al. (2019) 92 citações (set/2022)	Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy	<i>Journal of Manufacturing Processes</i>
Khanna et al. (2020b) 68 citações (set/2022)	Tool wear and hole quality evaluation in cryogenic Drilling of Inconel 718 superalloy	<i>Tribology International</i>
Uçak e Çiçek (2018) 59 citações (set/2022)	The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills	<i>Journal of Manufacturing Processes</i>



Figura 7. Resumo da Tabela 2 relacionando quantidade de artigos selecionados, materiais e criogenia.

Uçak e Çiçek (2018) relataram que, sob a usinagem criogênica, as forças de avanço aumentaram em 2,6% (388,36 – 398,47 N) e em 10% (362 – 398,47 N) no uso de lubrificação convencional e a seco, respectivamente. Isso se deve ao fato de que o jato do LN₂ endurece a peça, tornando-a mais resistente e aumentando as forças de corte. Segundo esses pesquisadores, outro fato que chamou a atenção é que com o uso de ferramenta de metal duro recoberta com TiAlN, as forças de avanço também aumentaram devido ao aumento do contato da ferramenta-peça. A ferramenta recoberta sob usinagem criogênica aumentou as forças de avanço em 8,3% (358,62 – 388,36 N), 6% (375,92 – 398,47 N) e 3,8% (348,87 – 362 N) sob condições secas, criogênicas e úmidas, respectivamente. Com relação ao desgaste da ferramenta de corte, foram percebidos aresta postiça de corte, lascamento e desgaste do flanco sob condições criogênicas, úmidas e sem fluido de corte, aumentando ainda mais as forças. Também foi relatado que houve uma pequena mudança na microestrutura da peça, aumentando a sua dureza, devido às mudanças da deformação plástica. Os pesquisadores concluíram que o aumento das forças e valores de microdureza abaixo da superfície do furo não são favoráveis à furação criogênica do Inconel 718, possibilitando mais estudos principalmente em relação à vida da ferramenta de metal duro recoberta. Os autores deste trabalho não comentaram a influência dos parâmetros de entrada da usinagem nas respostas obtidas.

Khanna et al. (2020b) realizaram pesquisas com a furação do Inconel 718 em ambiente criogênico LN₂ tendo como entrada a velocidade de corte e o avanço com ferramenta de corte recoberta com TiAlN. Os resultados indicam que a vida da ferramenta de corte em condições criogênicas aumentou 87,5% em relação ao corte a seco. A análise do desgaste da ferramenta mostrou mecanismos de adesão e difusão, bem como lascamento e aresta postiça de corte. Esses desgastes aconteceram mais rapidamente no corte a seco. O torque requerido pela broca na criogenia (4,6 N.m) foi 30% menor do que o corte a seco (5,5 N.m). Isso pode ser devido, segundo os pesquisadores, pela menor adesão dos cavacos na broca no momento da furação. Na condição criogênica também houve uma redução no coeficiente de atrito. Portanto, a combinação entre um menor desgaste por adesão e do coeficiente de atrito leva a uma diminuição no valor do torque na usinagem criogênica quando comparado ao corte a seco. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da resistência do material devido à deformação plástica e fragilização do ambiente criogênico. Também foi confirmado através dos espectros EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) que o revestimento da ferramenta é mais estável sob criogenia comparado com o corte a seco. A furação do Inconel 718 a seco não é recomendada devido à alta reatividade química do material do revestimento da ferramenta a altas temperaturas. Foram observadas, sob o resfriamento criogênico, uma diminuição de 47% na rugosidade Ra em relação ao corte a seco. Portanto, pode-se observar um gargalo nas pesquisas em relações às forças de usinagem na furação, o que leva a crer que há um aumento na eficiência energética do processo e um possível aumento de custo.

Já Shokrani et al. (2019), que usinaram o Ti-6Al-4V, exploraram bem a influência das condições de corte do fresamento no resultado das saídas, usando o LN₂ e sua forma híbrida (MQL com o LN₂). Os autores concluíram que tanto o resfriamento criogênico comum quanto o CMQL aumentam em até 30 vezes a vida da ferramenta em velocidades

baixas/moderadas de corte, quando comparado ao resfriamento tradicional por inundação. A refrigeração eficaz na zona de corte garantiu um resfriamento potente da ferramenta de corte que permitiu uma redução significativa no desgaste da ferramenta. A CMQL, segundo os autores, reduziu significante o mecanismo de difusão e controlou a taxa de atrito que causa a adesão. O controle da temperatura aconteceu em todas as velocidades de corte (60, 90, 120 e 190 m/min). Porém, houve um aumento da dureza e fragilidade do material devido à pulverização do jato de LN₂. Isso causou problemas na zona de corte, aumentando o desgaste depois de algum tempo de usinagem. A técnica do MQL foi a que registrou a melhor rugosidade superficial, ficando em torno de 0,2 µm, mesmo em velocidades de corte altas graças à efetividade da lubrificação que reduziu a força de atrito. Os pesquisadores terminam relatando a viabilidade econômica do fresamento da liga de Al-6Ti-4V usando CMQL com dois bicos de saída de jato (bico duplo) com pressão de 1,5 bar. Eles relatam que na indústria aeroespacial o aumento de produtividade pode chegar a 50%.

Jamil et al. (2021) resolveram fazer uma ponte quase esquecida entre medidas de sustentabilidade (tempo de processo, energia específica de corte, eficiência energética e emissões de carbono) e os parâmetros de usinagem no fresamento do Ti-3Al-4V (desgaste da ferramenta, rugosidade superficial, temperatura de corte). Para os ensaios preliminares, os pesquisadores usaram velocidades de corte acima de 200 m/min, avanço por dente $f_z = 0,1$ mm por dente, $a_p = 8$ mm e $a_e = 0,5$ mm e comprimento de corte de 210 mm e pressão do jato criogênico em 6 bar. Porém, os pesquisadores concluíram nestes testes que precisariam usar velocidades de corte menores em um menor comprimento de corte, mas sem comprometer a produtividade. Portanto, eles usaram $V_c = 100$ e 185 m/min, ângulo de posição da ferramenta de 30° e 42°, e 4 formas de refrigeração (a seco, MQL, CLN₂ e o chamado CO₂-snow. Segundo os pesquisadores, a eficiência energética na usinagem ainda não está em um patamar desejado, principalmente quando se fala em usinagem de materiais frágeis como as ligas de titânio, em que o tempo de processo de fabricação é alto devido à necessidade de condições de corte mais baixa. A eficiência energética neste trabalho foi calculada por uma equação. A energia específica de corte na usinagem é uma variável que apresenta a eficiência energética do processo de usinagem. Também pode ser definida como a resistência oferecida ao corte para um determinado material. Neste trabalho foi verificado que o ângulo de posição e a velocidade de corte no fresamento interfere na energia específica devido à diminuição das forças de usinagem, levando a uma menor energia específica de corte. Alta eficiência energética (30,73% e 30,53%) foram alcançados com as seguintes combinações: $V_c = 110$ m/min e ângulo de posição de 30° com LN₂. A segunda maior eficiência foi alcançada com $V_c = 110$ m/min e ângulo de posição de 30° com a refrigeração CO₂-snow. A diferença foi muito pequena, mostrando que o refrigerante não é tão importante neste caso. A redução nas emissões de carbono foram cerca de 10,8%, 7,1% e 6,6% para os modos CO₂-snow, LN₂ e MQL respectivamente em comparação com o fresamento a seco. O desgaste do flanco, a rugosidade superficial foi menor com a refrigeração CO₂-snow, seguido por LN₂ e MQL. Os pesquisadores concluíram que a refrigeração CO₂-snow superou as outras formas de refrigeração em desempenho e é uma opção viável à indústria.

Gupta et al. (2021) usaram vários ambientes refrigerantes para tornear o Ti-6Al-4V usando os ambientes LCO₂, MQL+CO₂ (MCO₂) e um Ranque-Hilsch Vortex tube com MQL (RHVT). O RHVT chamado de tubo de vórtice de Ranque Hilsch é um dispositivo mecânico sem partes móveis que separa um gás comprimido em um fluxo quente e outro frio. O fluxo frio, em particular, atrai a atenção de pesquisadores, pois pode atingir temperaturas dezenas de graus abaixo daquela do gás que entra no tubo. O gás pressurizado com 6 bar é injetado tangencialmente em uma câmara de giro e então acelerado até uma rotação muito alta. Devido a um fechamento cônico regulável no final do tubo, somente a camada mais externa de ar comprimido consegue escapar naquela extremidade. O restante do gás é forçado a retornar em um vórtice interno, de menor diâmetro. Este vórtice interno é composto de gás mais frio do que aquele que entra no tubo, e escapa por um orifício próximo ao ponto de entrada do ar comprimido. Para os experimentos, Gupta et al. (2021) usaram ferramenta de corte de metal duro com revestimento tripo, velocidades de corte de 100 e 150 m/min, $f = 0,05$ e 0,15 mm/rev., $a_p = 0,5$ mm e tempo de corte de 30 s. Como resultado, os pesquisadores encontraram o menor desgaste do flanco sob o ambiente híbrido CO₂ + MQL em relação aos outros ambientes. Entretanto, o corte a seco provocou danos severos na ferramenta de corte em altas velocidades de corte (como era esperado). Neste ambiente foram encontrados aresta postiça de corte e remoção do material. Na análise em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) os melhores resultados foram em ambiente híbrido.

A análise 3D da rugosidade também mostrou melhores condições no ambiente híbrido. Percebeu-se uma topografia mais lisa no ambiente híbrido. Neste ambiente o fluido refrigerante conseguiu atingir a zona de corte na interface ferramenta-peça provocando bons resultados. Já os valores da microdureza Vickers foram altas para todos os ambientes na superfície da peça, sendo que o LN₂ provocou a maior dureza e o ambiente a seco a menor, mostrando que a criogenia endurece a microestrutura da peça, podendo fragilizá-la. O ambiente híbrido provocou a formação de cavacos descontínuos, ajudando na usinagem. Desta forma, conclui-se, neste trabalho, que no torneamento do Ti-6Al-4V o ambiente LN₂ +MQL pode ser uma alternativa à usinagem desse material, aumentando a vida da ferramenta de corte.

No artigo de Mia et al. (2019), os pesquisadores usaram o LN₂ e corte a seco para o torneamento do Ti-6Al-4V com altas velocidades de corte e baixos avanços, chegando a resultados parecidos com os de outros pesquisadores e, usando como planejamento de experimentos a metodologia Grey Taguchi, chegaram a resultados ótimos de condições de corte. Os parâmetros de entrada foram $v_c = 80, 110$ e 140 m/min, $f = 0,12, 0,14$ e 0,16 mm/rev. com ambientes a seco, com um único jato e com 2 jatos de LN₂, um direcionado à superfície de saída da ferramenta e outro no flanco da ferramenta. Os estudos pretendiam retratar a influência dos parâmetros de corte nas respostas da usinagem, otimização multiobjetiva de todas as respostas através da metodologia Taguchi, chegando à conclusão que, segundo os pesquisadores, as condições

ótimas do corte do Ti-6Al-4V são força de corte média $F_c = 539,55\text{N}$, temperatura na interface cavaco/ferramenta 910°C , $R_a = 0,72\text{ }\mu\text{m}$, energia específica de corte média $E = 4,49\text{ kN/mm}^2$, e taxa de remoção de matéria TRM = $16,8\text{ mm}^3/\text{min}$. A velocidade de corte e o avanço influenciam na usinagem em diferentes graus de desempenho. Verificou-se que menores velocidades de corte e altas taxas de avanço aumentam as forças de corte; e maiores forças de corte causam um consumo de energia maior devido ao atrito. Além disso, altas velocidades de corte são contraproducentes e comprometem a produtividade. Portanto, foi necessário um aumento na velocidade de corte e uma diminuição do avanço para baixar as forças de corte. Desta forma o processo de usinagem se torna sustentável reduzindo as forças de usinagem e consequentemente a energia requerida pelo processo. Altos avanços e velocidades de corte aumentam a temperatura na interface ferramenta-cavaco. Velocidades de corte altas aumentam a produtividade, mas aumentam o aquecimento global. Está mostrado que o aumento da velocidade de corte do processo aumenta a energia cinética que se converte em calor. O interessante neste trabalho foi a Avaliação do Ciclo de Vida (já feita nas empresas no Brasil) usando o *Software Simapro 8.0®*. Com isso, os foram determinados os impactos ambientais do processo de usinagem com LN_2 , fornecendo informações sobre várias questões relacionadas ao meio ambiente. Foram usadas duas metodologias no *software* com a ajuda da metodologia Taguchi. Uma delas é focada na redução do consumo de energia e a redução de recursos não energéticos. Nestes termos, as diferentes condições experimentais de corte são correlacionadas com a saúde humana, recursos abióticos e biodiversidade. Presumivelmente, a usinagem a seco e em ambiente criogênico tem impacto insignificante sobre o ecossistema e a biodiversidade. Porém, quando se trata de saúde humana e recursos abióticos o impacto é significativo. Isto é devido à montagem e utilização do aparato de LN_2 que tem um gasto significativo de energia, envolvendo muitas etapas do processo de fabricação. Apesar de o uso do resfriamento criogênico ser puro e limpo, sua produção envolve fatores preocupantes. O manuseio dos jatos criogênicos pode causar acidentes como queimaduras a frio. Mia et al. (2019) concluem também que a avaliação do ciclo de vida dos processos de usinagem com refrigeração de última geração como o resfriamento criogênico de ligas e superligas precisa ainda de mais pesquisas. Os pesquisadores não informaram a pressão dos jatos usados neste experimento.

Baseado no que foi lido nesses seis artigos anteriores e nos outros constantes na Tab. 2, serão descritas abaixo os prós e os contras dessa tecnologia estudada há vários anos, e que voltou a fazer parte das pesquisas da academia no mundo todo devido ao aparecimento de novos materiais difíceis de serem usinados com aplicações importantes como próteses para o corpo humano, como a liga de Ti-6Al-4V.

3. CONCLUSÕES

Baseado nos estudos feitos pelas seis pesquisas discutidas neste artigo e outras lidas da Tab. 2, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Nas pesquisas discutidas neste trabalho, perceberam-se algumas lacunas que precisam ser melhor avaliadas. O aumento da dureza e das forças de usinagem causadas pelo resfriamento precisam ser mais investigadas. Nos estudos de Pereira e Delijaicov (2019), no torneamento do Inconel 718, as forças de corte na usinagem a seco foram bem menores. Já no trabalho de Gupta et al. (2021), no experimento com criogenia observou-se um pico de microdureza maior que o corte a seco. Esses resultados se devem à fragilização do ambiente criogênico. O aumento da dureza e outros parâmetros também foram percebidos na maioria dos trabalhos lidos, mostrando haver uma lacuna que precisa ser avaliada (Pereira et al., 2020). Estudos relacionados à direção dos jatos, tipos de bicos, ângulos de ataque tentando minimizar esse endurecimento também poderiam ser realizados.
- Não há, entre os pesquisadores, um consenso sobre qual ambiente de resfriamento é mais apropriado para a usinagem de ligas duras. Tanto o LN_2 quanto o CO_2 são bastante eficientes em relação à melhora das respostas do processo de usinagem. Porém, faltam pesquisas sobre os custos e eficiência energética de cada um desses ambiente, sendo necessárias mais pesquisas.
- Os pesquisadores forneceram várias formas de se avaliar a possibilidade de se usar a usinagem criogênica. Porém, não foram verificadas diferenças substanciais quando comparada com a técnica MQL e CMQL. Neste contexto, a usinagem híbrida poderia ser uma solução para o corte de ligas duras.
- O desgaste da ferramenta de corte ficou bem evidente para todos os trabalhos, mostrando que a usinagem criogênica apenas aumenta a vida da ferramenta, mas os desgastes são semelhantes ao da usinagem convencional, mesmo para ferramentas com três revestimentos como mostrado por Sivaiah e Chakradhar (2018). No entanto, em nenhum dos trabalhos foi avaliado o custo benefício do aparato criogênico em relação ao aumento da vida útil das ferramentas de corte.
- Verificou-se que a produtividade precisa ser menor para se conseguir uma eficiência energética requerida. Baixas velocidades de corte e baixos avanços no processo de usinagem atrasam a produção de peças, porém melhoram os impactos ambientais requeridos pelos governos. Desta forma fica uma pergunta: Será que uma empresa diminuindo sua produtividade, apostaria investir em uma nova tecnologia?
- Os trabalhos pesquisados não revisitaram a possibilidade da adequação da criogenia ao ambiente industrial em termos de custo, apesar da criogenia possibilitar de forma efetiva a melhora na usinabilidade de ligas

duras e ser uma técnica sustentável. Assim, é possível concluir que mais pesquisas precisam ser feitas para reforçar ou não essa possibilidade. Além disso, segundo Mia et al. (2020), na Avaliação do ciclo de vida, percebeu-se outra lacuna relacionada à segurança dos operadores referente ao manuseio dos jatos criogênicos. Será necessário investimento na adequação da força de trabalho a esta tecnologia.

- O sucesso da usinagem criogênica depende do processo. Na furação, as altas forças de avanço provocada no furo e a fragilização da peça podem impossibilitar o uso desta tecnologia.
- Com relação a custos, há um aumento na energia consumida no processo além do custo do aparato para a viabilidade da técnica.
- Baseando-se nesses estudos, já que a técnica da criogenia terá uma certa demora para ser implementada nas empresas, no momento a melhor forma sustentável, a curto prazo, é o uso da MQL com fluidos não poluentes, tal como os biolubrificantes (BMQL). Enquanto isso, novos estudos estão sendo feitos para avaliar a possibilidade do uso de lubrificantes nanoprocessados aliado ao MQL (Zhang et al., 2022).

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benedicto, E., Carou, D. e Rubio, E.M., 2017. Technical, economic and environmental review of the lubrication/cooling systems used in machining processes. *Procedia Engineering*, Vol. 184, p. 99-116.
- Chandel, R.S., Kumar, R. e Kapoor, J., 2022. Sustainability aspects of machining operations: A summary of concepts. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 50, p. 716-727.
- Danish, M., Gupta, M.K., Rubaiee, S., Ahmed, A., Sarikaia, M. e Krolczyk, G.M., 2022. Environmental, technological and economical aspects of cryogenic assisted hard machining operation of Inconel 718: a step towards., *Journal of Cleaner Production*, Vol. 337, p. 130483.
- Deshpande, Y. V., Andhare, A.B. e Padole P.M., 2018. How cryogenic techniques help in machining of nickel alloys? a review. *Machining Science and Technology*, Vol. 22, n. 4, p. 543-584.
- De Oliveira, D., De Paiva, R.L., Da Silva, R.B. e Castro, P.H.C., 2020. Assessment of the grindability of Inconel 718 under different coolant delivery techniques. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42. N.1, p. 1-9.
- Faisal, N., Zindani, D., Kumar, K. e Sumit, B., 2019. Laser Micromachining of Engineering Materials—A Review. *Machining of Engineering Materials. Materials Forming, Machining and Tribology*. Springer, Cham.
- García-Martínez, E., Miguel, V., Martín-Martínez, A., Manjabacas, M.C. e Coello, J., 2019. Sustainable lubrication methods for the machining of titanium alloys: an overview. *Materials*, V.12, N. 23, p. 3852.
- Gowthaman, B., Boopathy, S.R. e Kanagaraju, T., 2022. Effect of LN2 and CO2 coolants in hard turning of AISI 4340 steel using tungsten carbide tool. *Surface Topography: Metrology and Properties*, Vol. 10, N.1., p. 015032.
- Gupta, K., Laubscher, R.F., Davim, J.F e Jain, N.K., 2017. Recent developments in sustainable manufacturing of gears: a review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, p. 3320-3330.
- Gupta, M.K., Song, Q., Liu, Z., Sarikaya, M., Jamil, M., Mia, M., Khanna, N. e Krolczyk, G.M., 2021. Experimental characterization of the performance of hybrid cryo-lubrication assisted turning of Ti-6Al-4V alloy. *Tribology International*, Vol. 153, p. 106582.
- Gupta, M.K., Song, Q., Liu, Z., Sarikaya, M., Jamil, M., Mia, M., Kushvaha, V., Singla, A.K. e LI, Z., 2020. Ecological, economical and technological perspectives based sustainability assessment in hybrid cooling machining of Ti-6Al-4V alloy. *Sustainable materials and technologies*, Vol.26, p. e00218.
- Gupta, M.K., Song, Q., Liu, Z., Sarikaya, M., Mia, M., Jamil, M., Singla A.K., Bansal, A., Pimenov, M.K., 2021a. Tribological performance based machinability investigations in cryogenic cooling assisted turning de α - β titanium alloy. *Tribology International*, Vol. 160, p. 107032.
- Halim, N.H.A., Haron, C.H.C., Ghani, J.A. e Azhar, M.F., 2019. Tool wear and chip morphology in high-speed milling of hardened Inconel 718 under dry and cryogenic CO2 conditions. *Wear*, Vol. 426-427, p. 1683-1690.
- Hegab, H., Kishawy., H.A. e Darras, B., 2019. Sustainable cooling and lubrication Strategies in machining processes: a comparative study. *Procedia Manufacturing*, Vol 33, p. 786-793.
- Impero, F., Dix, M., Squillace, A., Prisco, U., Palumbo, B. e Tagliaferri, F., 2018. A comparison between yet and cryogenic drilling of CFRP/Ti stacks. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 33, N. 12, p. 1354-1360.
- Jamil, M., Khan, A.M., Hegab, H., Gong, L., Mia, M., Gupta, M.K. e He, N., 2019. Effects of hybrid Al2O3-CNT nanofluids and cryogenic cooling on machining of Ti-6Al-4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, p. 3895-3909.
- Jamil, M., Zhao, W., He, N., Gupta, M.K., Sarikaya, M., Khan, A.M., Sanjay, M.R., Siengchin, S. e Pimenov, D.Y., 2021. Sustainable milling of Ti-6Al-4V: a trade-off between energy efficiency, carbon emissions and machining characteristics under MQL and cryogenic environment. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 281, p. 125374.
- Joshi, S., Rawat, K. e Balan, A.S.S., (2018). A novel approach to predict the delamination factor for dry and cryogenic drilling of CFRP. *JMP&T*, Vol. 262, p. 521-531.

- Khanna, N., Agrawal, C., Dogra, M. e Pruncu, C.I., 2020a. Evaluation of tool wear, energy consumption, and surface roughness during turning of Inconel 718 using sustainable machining technique. *Journal of materials research and technology*, Vol. 9, N. 3, p.5794-5804.
- Khanna, N., Agrawal, C., Gupta, M.K. e Song, Q., 2020b. Tool wear and hole quality evaluation in cryogenic Drilling of Inconel 718 superalloy. *Tribology International*, Vol. 143, p. 106084.
- Khanna, N., Agrawal, C., Pimenov, D.Y., Singla, A.K., Machado, A.R., da Silva, L.R.R., Gupta, M.K., Sarikaya, M. e Krolczyk, G.M., 2021. Review on design and development of cryogenic machining setups for heat resistant alloys and composites. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 68, p. 398-422.
- Khanna, N., Pusavec, S., Agrawal, C. e Krolczyk, G.M., 2020c. Measurement and evaluation of hole attributes for drilling CFRP composites using an indigenously developed cryogenic machining facility. *Measurement*, Vol. 154, p. 107504.
- Khanna N., Shah, P., de Lacalle, L.N.L., Rodríguez, A. e Pereira, O., 2021a. In pursuit of sustainable cutting fluid strategy for machining Ti-6Al-4V. *Sustainable Materials and Technologies*, Vol. 29, p. e00301.
- Kim, D.M., Kim, H.I. e Park, H.W., 2021. Tool wear, economic costs, and CO2 emissions analysis assisted hard-turning process of AISI 52100 steel. *Sustainable Materials and Technologies*, Vol. 30, p. e00349.
- Królczyk, G.M., Maruda, R.W., Krolczyk, J.B., Wojciechowski, S., Mia, M., Nieslony, P. e Budzik, G., 2019. Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production - a review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 218, p. 601-615.
- Mia, M., Gupta, M.K., Lozano, J.A., Carou, D., Pimenov, D.Y., Królczyk, G., Khan, A.M. e Dar, N.R., 2019. Multi-objective optimization and life cycle assessment of eco-friendly cryogenic N2 assisted turning of Ti-6Al-4V. *Journal of cleaner Production*, Vol. 210, p. 121-133.
- Mia, M., Gupta, M.K., Singh, G., Królczyk, G. e Pimenov, D.Y., 2018. An approach to cleaner production for machining hardened steel using different cooling – lubrication conditions. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 187, p. 1069-1081.
- Percvaiz, S., Anwar, S., Qureshi, I. e Ahmed, N., 2019. Recent advances in the machining of titanium alloys using minimum quantity lubrication (MQF) bases techniques. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, Vol. 6, n.1, p. 133-145.
- Pereira, O., Celaya, A., Urbikain, G., Rodríguez, A., Valdivielso, A.F., de Lacalle, L.N.L., 2020. CO2 cryogenic milling of Inconel 718: cutting forces and tool wear., *JMR&T*, Vol. 9, n.4, p. 8459-8468.
- Pereira, W.H. e Delijaicov S., 2019. Surface integrity of Inconel 718 turned under cryogenic conditions at high cutting speeds. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, V. 104, N. 5-8, p. 2163-2177.
- Pimenov, D.Y., Mia, M., Gupta, M.K., Machado, A.R., Tomaz, I.V., Sarikaya, M., Wojciechowski, S., Mikolajczyk, T. e Kaplonek, W., (2021). Improvement of machinability of Ti alloys using cooling lubrication techniques: a review and future prospect. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 11, p. 719-753.
- Proud, L., Tapoglou, N. e Slatter, T., 2022. A review of CO2 coolants for sustainable machining. *Metals*, Vol. 12, N. 2, p. 283.
- Sarihaya M., Gupta, M.K., Tomaz, I., Danish, M., Mia, M., Rubaiee, S., Jamil, M., Pimenov, D.Y. and Khanna, N., 2021. Cooling techniques improve the machinability and sustainability of light-weight alloys: a-state-of-the-art review. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 62, p. 179-201.
- Shah, P., Khanna, N. e Chetan, 2020. Comprehensive machining analysis to establish cryogenic LN2 and LCO2 as sustainable cooling and lubrication techniques. *Tribology International journal*, Vol. 148, p. 106314.
- Shokrani, A., Al-Samarrai, I. e Newman, S.T., 2019. Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 43, p. 229-243.
- Singh, G., Aggarwal, V., Singh, S., 2020. Critical review on ecological, economical and technological aspects of minimum quantity lubrication towards sustainable machining. *Journal of Cleaner Production*, Vol.271, p. 122185.
- Sivaiah, P. e Chakradhar, D., 2018. Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 14-4 PH stainless steel: A comparison with MQL, wet, dry machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. V.21, p. 86-96.
- Sutherland, J.W., Richter, J.S., Hutchins, M.J., Dornfeld, D., Dzombak, R., Mangold, J., Robinson, S., Hauschild, M.Z., Bonou, A., Schönsleben, P. e Friemann, F., 2016. The role of manufacturing in affecting the social dimension of sustainability. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 65, N. 2, p. 689-712.
- Teles, D.B., Policena, M.R. e De Souza, A.J., 2022. Técnicas sustentáveis de lubrificação refrigerada aplicadas no torneamento de aços inoxidáveis duplex: uma breve revisão. In: Barra, S.R. e Pintaude, G. (org.). *Materiais metálicos: composição, fabricação, propriedades e desempenho*. E-book. cap. 4, p. 64-73.
- Uçak, N. e Çiçek, A., 2018. The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 31, p. 662-673.
- Wickramasinghe, K.C., Sasahara, H., Rahim, E.A. e Perera, G.I.P., 2020. Green metalworking fluids for sustainable machining applications: a review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 257, p. 120552.
- Wu, G., Li, G., Pan, W., Raja, I., Wang, X. e Ding, S., 2022. Experimental investigation of eco-friendly cryogenic minimum quantity lubrication (CMQL) strategy in machining of Ti-6Al-4V thin-wall part. *Journal of Cleaner Production*, V.357, p. 131993.

- Yıldırım, V.Ç., 2020. Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: cryogenic cooling and nanofluid based MQL. *Tribology International*, Vol. 144, p. 106127.
- Yildirim V.Ç., Kivak, T., Sarikaia, M. e Senol, S., 2020a. Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and cryoMQL. *JMR&T*, Vol. 9, n.2, p. 2079-2092.
- Zhang, Y., Li, H.N., Huang, C., Ali, H.M., Xu, X., Mao, C., Ding, W., Cui, X., Yang, M., Yu, T., Jamil, M., Gupta, M.K., Jia, D. e Said Z, 2022. Nano-enhanced biolubricant in sustainable manufacturing: from processability to mechanisms. *Friction*, Vol. 10, N.6, p. 803-841.
- Zindani, D. e Kumar, K., 2020. A brief review on cryogenics in machining process. *Applied Sciences*, Vol. 2, N. 6, p. 1-10.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

THE POSSIBILITY OF USING CRYOGENIC COOLING AS A SUSTAINABLE SOLUTION IN HARD ALLOY MACHINING: A BRIEF REVIEW

Carlos Renato Pagotto

Tales Humberto de Aquino Boratto

Universidade Federal de Juiz de Fora – Faculdade de Engenharia

Rua José Lourenço Kelmer, S/N – Campus Universitário – São Pedro – Juiz de Fora – MG

e-mails: renato.pagotto@ufjf.br, tales.boratto@engenharia.ufjf.br

Abstract. *Although the heat generated during chip formation promotes the reduction of shear stresses in metallic alloys, which may facilitate the machining process, high temperatures cause a decrease in tool life, low surface quality of the final product, in addition to the need to use large amounts of cutting fluid. Machining fluids can cause corrosion in the workpiece and in the machine tool, can cause fires, damage to the health of operators, degradation of the environment in addition to the need for recycling facilities for this product. With the development of difficult-to-machine materials that require large amounts of cutting fluid and the demand for sustainability, the industrial sector has been looking for solutions to reduce heat in machining. This study evaluates the possibility of using cryogenic cooling of hard alloys. Cryogenic machining is considered a sustainable technique due to the absence of lubricating oil; it does not leave residues on the part and on the chip and, consequently, does not require cleaning the part and recycling the chips. Cryogenic fluid quickly absorbs heat within the cutting zone causing it to evaporate. The application of liquid nitrogen at low temperatures dissipates heat and provides a damping layer at the tool/chip interface, reducing friction in this region. Cryogenic machining is also useful to eliminate chipping wear and plastic deformation of the cutting tool, reducing cutting temperature even at high cutting speeds. In addition, the cryogenic fluid jet helps to break the chip. This work makes a review verifying the performance of cryogenic machining in high hardness materials, and it is possible to verify the advances obtained in this area. The results showed a substantial improvement in surface quality, tool life, corrosion, tool wear, hardness, among other improvements, but substantial studies still need to be done to evaluate the use of cryogenic apparatus in companies.*

Keywords: *Machining; Suitability; Cryogenic cooling; Hard alloys.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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