

# REVISÃO DA LITERATURA SOBRE A USINABILIDADE DO AÇO AISI H13 SOB DIFERENTES MEIOS LUBRIRREFRIGERANTES

*Data de aceite: 01/09/2023*

### **Carlos Eduardo Borsoi Rheinheimer**

Aluno de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

### **Rafael Talini Lorenzi**

Aluno de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

### **André João de Souza**

Professor Doutor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Porto Alegre, RS

**RESUMO:** O AISI H13 é um aço-ferramenta para trabalho à quente ligado ao cromo-molibdênio que apresenta alta resistência ao desgaste, ao choque térmico, à fadiga térmica e ao amolecimento pelo calor. São utilizados principalmente na fabricação de moldes e matrizes de forjamento, fundição e extrusão devido à sua capacidade de manter a dureza em temperaturas elevadas, com suficiente tenacidade. O seu alto teor de carbono, associado aos demais elementos de liga, lhe permite alta temperabilidade.

Quando tratado termicamente, o H13 forma carbonetos globulares que expõem repetidamente a ferramenta de corte durante a usinagem a elevadas tensões térmicas e mecânicas. Tais dificuldades direcionam para a aplicação de fluidos de corte em abundância visando reduzir o atrito nas interfaces ferramenta-peça e ferramenta-cavaco, remover a energia térmica que surge na zona de corte, e expulsar os cavacos gerados. Por outro lado, o avanço tecnológico de máquinas e ferramentas tem possibilitado a “usinagem dura” aplicando métodos alternativos de lubrificação em substituição ao fluido em abundância motivados por aspectos econômicos e ambientais. Assim, esta revisão da literatura visa apresentar as vantagens e limitações da aplicação desses métodos alternativos (a seco, com mínima quantidade de lubrificante, refrigerado a gás, e por criogenia) na usinagem do AISI H13 endurecido.

**PALAVRAS-CHAVE:** usinabilidade do AISI H13, meios lubrificadorantes, materiais de difícil usinagem.

# A LITERATURE REVIEW ON MACHINABILITY OF THE AISI H13 STEEL UNDER DIFFERENT LUBRICOOING ENVIRONMENTS

**ABSTRACT:** AISI H13 is a chromium-molybdenum alloy steel with high wear resistance, high thermal shock resistance, high thermal fatigue resistance, and high heat softening resistance. This tool steel is mainly used to manufacture molds and dies applied on forging, casting, and extrusion due to its ability to maintain hardness at high temperatures with sufficient toughness. The high carbon content present in AISI H13 tool steels, associated with other alloying elements, allows their high hardenability. When heat-treated, H13 produce globular carbides that expose the cutting tool to high thermal and mechanical stresses during machining. Such difficulties encourage applying cutting fluid in abundance to reduce friction at the tool-workpiece and tool-chip interfaces, extracting the heat produced in the cutting zone, and removing the generated chips. On the other hand, technological advances in machine tools and cutting tools have enabled “hard machining” by applying alternative methods of lubricooling to replace the cutting fluid in abundance supported by economic and environmental aspects. Thus, this literature review aims to present the advantages and limitations of applying these alternative methods (dry, minimal quantity lubrication, gas cooling, and cryogenic cooling) in the machinability of hardened AISI H13.

**KEYWORDS:** Machinability of AISI H13 tool steels, lubricating media, hardness machine materials.

## 1 | INTRODUÇÃO

Aços da família “H” são aços para trabalho a quente, sendo o H11 o primeiro a ser desenvolvido para fabricação de moldes para fundição de alumínio.

O aço AISI H13 é um aço-ferramenta para trabalho a quente, do tipo cromo-molibdênio (Cr-Mo), utilizado principalmente para fabricação de moldes e matrizes devido a sua capacidade de manter a dureza em temperaturas elevadas, com resistência mecânica e tenacidade suficientes (Kumar e Chauhan, 2015).

O endurecimento do AISI H13 acontece por tratamento térmico de têmpera com revenimento ao ar, devido a sua elevada temperabilidade (Umbrello *et al.*, 2008). Essa característica se deve, além do alto teor de carbono, aos elementos de liga encontrados em sua composição. A presença de cromo propicia maior uniformidade das características mecânicas entre a superfície e o núcleo da peça, podendo atingir durezas de até 60 HRC, onde apresenta fase martensítica metaestável (Cardarelli, 2008).

Devido à alta dureza do AISI H13 e à formação de carbonetos globulares, a ferramenta de corte é repetidamente exposta a níveis extremamente elevados de tensões mecânicas e térmicas. A aplicação de fluido de corte em abundância é altamente utilizada, visando a redução do atrito entre peça-ferramenta e ferramenta-cavaco, a extração da energia térmica que surge na zona de corte, e a remoção dos cavacos (Bakar *et al.*, 2020).

Materiais endurecidos comumente apresentam baixa usinabilidade. No entanto, a usinagem realizada após tratamento térmico com o material já em sua dureza final evita

problemas decorrentes do tratamento térmico, como por exemplo variações dimensionais e empenamentos (Wang e Zheng, 2003).

A usinagem de materiais endurecidos afeta o mecanismo de formação do cavaco, sendo comum encontrar forças de usinagem mais altas para materiais de maior dureza (maior pressão específica de corte); no entanto, as áreas das seções transversais de corte utilizadas na usinagem são normalmente menores, fazendo com que as forças não sejam elevadas. Percebe-se ainda que a utilização de materiais com baixas condutividades térmicas resultam em maiores solicitações de usinagem, pois apenas uma pequena quantidade de energia térmica que surge na usinagem seja removida junto ao cavaco. Isso faz com que uma quantidade maior de calor seja absorvida pela ferramenta, reduzindo a sua vida (Klocke, 2011).

Os avanços tecnológicos das ferramentas de corte e conjuntos máquinas-ferramentas possibilitaram a usinagem de materiais endurecidos através de métodos alternativos. Processos de torneamento de materiais endurecidos vem substituído processos de retificação de forma econômica (Wang e Zheng, 2003). A aplicação de novos revestimentos tem resultado em melhorias significativas na vida das ferramentas de corte, possibilitando o estudo de fresamento a seco em altas de velocidades de corte (Fox-Rabinovich *et al.*, 2005), além de outros métodos de refrigeração.

A eliminação, ou ao menos a redução do uso de fluido lubrificante é uma busca devido a pressões econômicas e ambientais, visando atender uma série de normas atualmente adotadas que contempla o controle e o descarte deste tipo de insumo. Além do custo gerado ao processo, o fluido é associado a uma série de doenças que podem acometer os colaboradores, doenças essas que podem ser respiratórias ou cutâneas, além do impacto ambiental devido ao seu descarte incorreto (Goindi e Sarkar, 2017).

Diante disso, o objetivo deste artigo é apresentar uma revisão concisa da literatura acerca das possibilidades da usinagem deste material utilizando diferentes métodos de aplicação de lubrificantes ambientalmente amigáveis.

## **2 | USINAGEM A SECO DO AISI H13**

A usinagem sem utilização de qualquer fluido lubrificante, denominada usinagem a seco, é considerada como ideal do ponto de vista econômico e ambiental. Uma vez que não há o custo envolvido com a aquisição e descarte deste insumo, bem como a eliminação do agente causador de doenças que afetam a saúde dos operadores. Por isso a busca pela usinagem a seco tem sido cada vez maior. Entretanto, sem o uso de fluido de corte, o excessivo aumento de temperatura causa o amolecimento do material da ferramenta, fazendo com que esta perca sua dureza, aumente a taxa de desgaste, e modifique a geometria de corte. Isso, por sua vez, aumenta as forças de usinagem e gera maiores deformações, que podem inclusive causar falhas repentinas da ferramenta. Além

disso, pode causar danos à superfície usinada. Por isso, a usinagem a seco tem sido implementada com sucesso em alguns poucos materiais e processos (Goindi e Sarkar, 2017).

## 2.1 Torneamento

O torneamento a seco tem sido o processo mais estudado para usinagem de materiais de difícil usinagem, onde busca-se com isso reduzir a necessidade de retificação pós beneficiamento.

Ghani *et al.* (2008) realizaram estudos para torneamento a seco de AISI H13 temperado (dureza de 56 HRC) com usando insertos de PCBN. Foram utilizadas duas velocidades de corte distintas para realização dos experimentos. A profundidade de corte e o avanço e foram mantidos constantes e iguais a  $a_p = 0,2$  mm e  $f = 0,172$  mm/rev., respectivamente. Os parâmetros experimentais, na Tab. (1). Os dados obtidos experimentalmente foram utilizados em conjunto com análise de elementos finitos para estabelecer relações entre a temperatura na zona de corte e o desgaste da ferramenta, uma vez que influencia fortemente nas forças de usinagem e na integridade superficial da peça. Após cada passe de 85 mm de comprimento, a aresta de corte e os cavacos gerados foram analisados em microscópio óptico para determinar a área da seção transversal do cavaco e assim calcular a espessura do cavaco gerado.

Experimento N°	Velocidade de corte vc (m/min)	Comprimento de corte l (mm)	N° de passes
1	144,26	85	1
2	144,26	170	2
3	144,26	255	3
4	144,26	340	4
5	288,52	85	1
6	288,52	170	2
7	288,52	255	3

Tabela 1. Parâmetros de corte no torneamento de AISI H13 com dureza de 56 HRC (Ghani *et al.* 2008)

A Figura (1) mostra a influência da espessura do cavaco na área de contato entre o cavaco e a ferramenta e a transferência de calor na interface. Supondo que 90% do trabalho realizado na usinagem seja convertido em energia térmica, cerca de  $\frac{3}{4}$  desta energia é transformada devido ao cisalhamento durante a formação do cavaco (zona primária) e  $\frac{1}{4}$  por meio do atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta (zona secundária) e pelo do atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a peça de trabalho (zona terciária).

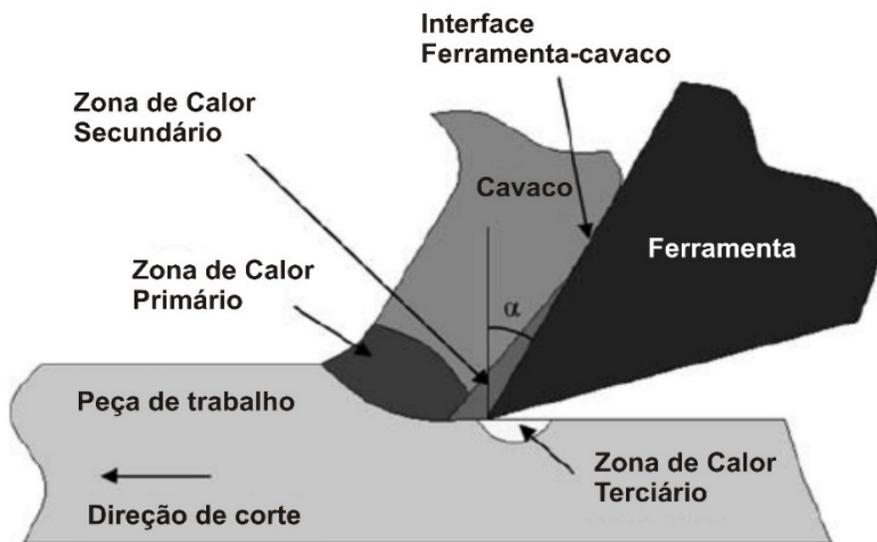


Figura. 1. Geração de calor na usinagem ortogonal (Ghani *et al.* 2008).

O desgaste da ferramenta foi medido ao final de cada passe, mostrando-se menores para as condições com menor  $v_c$  (menor calor gerado durante o corte). A evolução dos desgastes máximos de flanco pode ser vista na Fig. (2). Identificou-se alta incidência de lascamentos nos flancos dos inserts. O desgaste de cratera também foi identificado, sendo mais acentuado para altas velocidades de corte.

As forças de usinagem quando  $v_c = 144,26$  m/min permaneceram praticamente constantes, aumentando a partir do segundo passe e permanecendo constante para o restante dos testes, com exceção do passe 3, que apresentou um aumento temporário das forças de corte (provavelmente devido a alguma inclusão de maior dureza), e o passe 4, que exibiu redução gradativa das forças devido ao lascamento da aresta, que diminuiu o contato original com a peça. A temperatura apresentou aumento de forma oscilatória no início do processo, sendo essa oscilação gradualmente eliminado com o tempo; isso acontece durante o aquecimento inicial, pois o coeficiente de transferência de calor da ferramenta é muito baixo, e por isso o calor é transferida desta forma até que uma temperatura constante e com menores oscilações, seja atingida. A conclusão dos autores é que a vida da ferramenta pode ainda ser melhorada se utilizados materiais com menores condutividades térmicas, inibindo assim o calor que é transmitido para a ferramenta, o que poderia tornar viável a usinagem a seco do AISI H13.

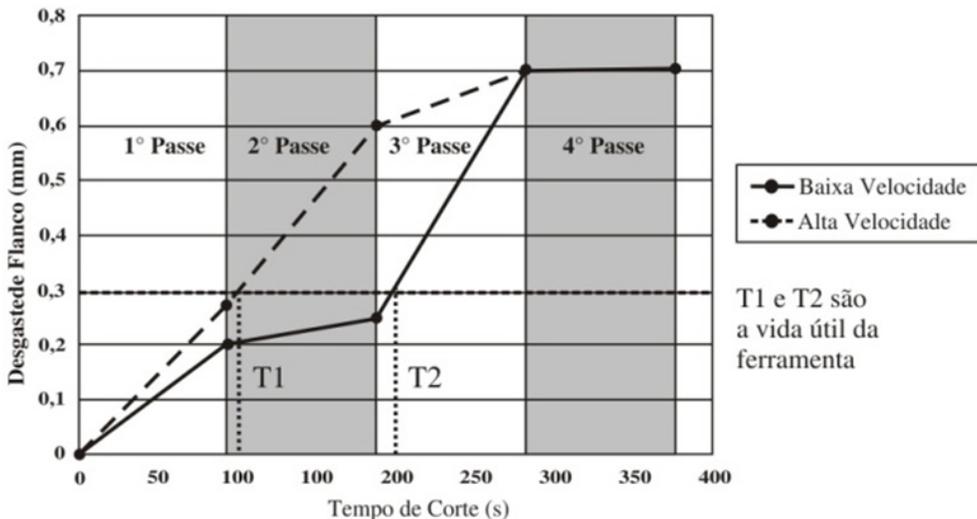


Figura. 2. Desgastes máximos de flanco no torneamento a seco de AISI H13 com dureza de 56 HRC, (Ghani *et al.* 2008).

## 2.2 Fresamento HSM

Com o avanço tecnológico, o fresamento de topo em altas velocidades de corte (HSM – *High-Speed Machining*) tornou-se um processo de fabricação de baixo custo, com produção de peças de alta precisão dimensional e qualidade superficial. Inicialmente utilizou-se o fresamento aço rápido em ligas de alumínio; com o passar do tempo, foram realizados estudos em materiais com usinabilidade cada vez menor. As principais vantagens da utilização de HSM são alta produtividade, baixa força de usinagem (seção de corte reduzida) e boa dissipação térmica. Entretanto, muitas vezes se associa HSM com desgastes excessivos de ferramenta, uso de máquinas-ferramentas de alto custo e necessidade de utilização de materiais avançados para ferramentas de corte e revestimentos (Fallböhmer *et al.*, 2000).

Fallböhmer *et al.* (2000) analisaram o fresamento a seco HSM do AISI H13 com dureza de 46 HRC utilizando fresas com insertos de metal-duro com diferentes revestimentos (TiN, TiCN, TiAlN<sup>1</sup> e AlTiN<sup>2</sup>) e fresas com insertos de PCBN a 300, 450 e 800 m/min de velocidade de corte. A ferramenta que apresentou maior tempo de vida foi o inserto com revestimento de TiN atingindo fim de vida após a usinagem de uma área de 750 cm<sup>2</sup>. Além disso, todos os insertos de metal-duro tiveram vida superior aos insertos de PCBN, possivelmente devido à menor tenacidade. A vida da ferramenta foi ligeiramente maior para velocidades de corte menores, mas as vidas foram também expressivas para  $v_c = 450$

1. A designação “TiAlN” é usada para revestimentos de nitreto de Ti-Al onde o teor de alumínio atômico de Al é menor ou igual a 50%, normalmente de cor marrom opaca.

2. A designação “AlTiN” é usada para revestimentos de nitreto de Ti-Al onde o teor de alumínio atômico de Al é maior do que 50%, normalmente de cor preta.

m/min, tornando esse parâmetro como ideal para estas condições. Outra característica notada foi que os insertos de PCBN apresentaram maior vida para  $v_c = 800$  m/min, pois estas apresentam maior dureza a quente. A Figura (3) mostra os resultados encontrados. Os autores concluíram que a usinagem de AISI H13 com durezas próximas às ensaiadas em HSM não só são possíveis de serem realizadas, como são economicamente viáveis.

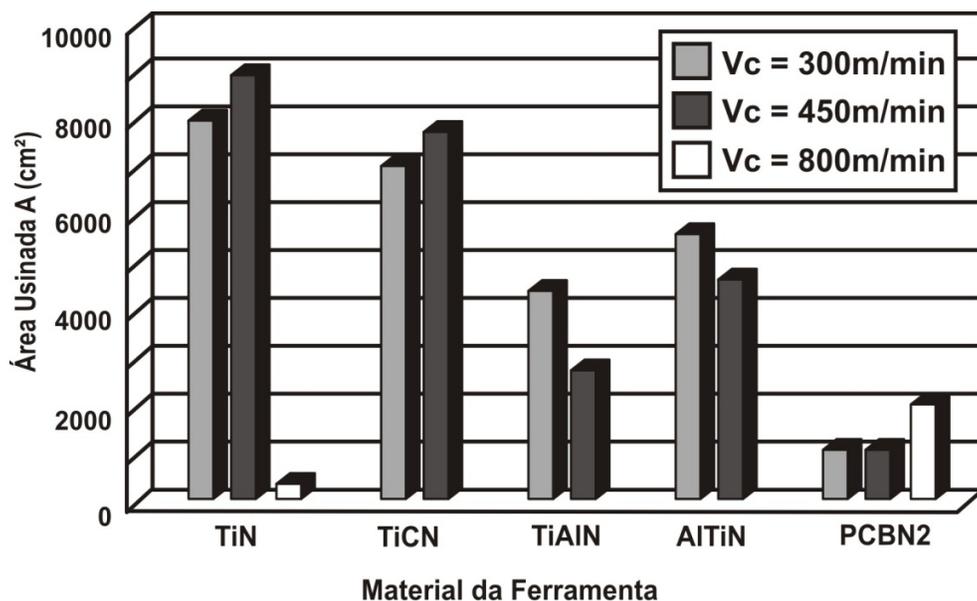


Figura 3. Área de material usinado vs. material da ferramenta (Fallböhmer *et al.* 2000).

Outro estudo em HSM foi feito por Fox-Rabinovich *et al.* (2005) em que os autores analisaram fresamento utilizando fresas esféricas inteiriças com revestimentos PVD de TiAlN (50% Al + 50 Ti), TiAlCrN (25% Ti + 65% Al + 10% Cr) e TiAlCrN (10% Ti + 70% Al + 20% Cr), com diferentes teores de elementos constituintes, no fresamento a seco em aço AISI H13 endurecido (50 HRC) com velocidade de corte  $v_c = 200$  m/min, avanço por dente  $f_z = 0,06$  mm/dente, profundidade de corte radial  $a_e = 5$  mm e profundidade de corte axial  $a_p = 0,6$  mm. A Figura (4) mostra os valores de desgaste máximo de flanco ( $VB_{max}$ ) medido nas ferramentas após 30 m usinados. Observou-se que as ferramentas revestidas com TiAlCrN (10% Ti + 70% Al + 20% Cr) apresentaram os menores valores de  $VB_{max}$ , sendo quase duas vezes superior ao TiAlN (50% Ti + 50% Al). Para os autores, a existência de cromo na composição química do revestimento promoveu a criação de um tribofilme que reduziu o atrito nas interfaces peça-ferramenta e ferramenta-cavaco. Analisando-se as ferramentas através de MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) observou-se que esse revestimento promoveu a redução do mecanismo de desgaste por oxidação (a formação de  $Cr_2O_3$  impede que a superfície entre em contato com a atmosfera, prevenindo a oxidação).

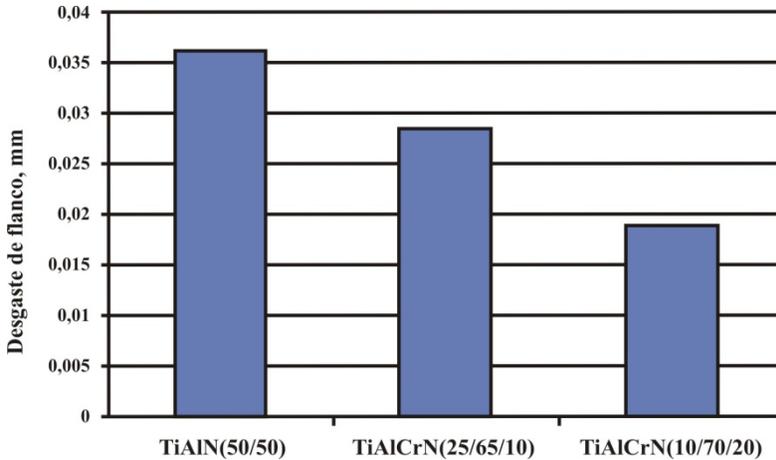


Figura. 4. Desgaste máximo de flanco vs. revestimento de ferramenta após 30 m de usinagem do AISI H13 endurecido a 50 HRC (Fox-Rabinovich *et al.* 2005).

### 3 I MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE NA USINAGEM DO AISI H13

A usinagem a seco tem se mostrado como o grande objetivo para uma usinagem ambientalmente amigável. Entretanto, para materiais de difícil corte, ela ainda não é viável, sendo muitas vezes impraticável. Por outro lado, os fluidos de corte em abundância são uma importante ferramenta para o aumento da produtividade, seja através de efeito refrigerante, que reduz a temperatura de corte nas interfaces pelo efeito lubrificante, que reduz o atrito da ferramenta com o cavaco e a peça; e ainda há o efeito de remover o cavaco da zona de corte. Nesse contexto, a usinagem com mínima quantidade de lubrificante (MQL) pode ser tornar uma opção de estudo.

Diversos estudos apresentam o uso de método de lubrificação MQL satisfatórios para fresamento, torneamento furação e retificação, inclusive apresentando melhorias perceptíveis para a maiorias destes processos. Os resultados mais expressivos podem ser vistos quando comparados com método de aplicação de fluido abundante. Pode-se concluir que o uso de MQL não se mostra não apensar como uma melhoria ambiental, mas também, em muitos casos, com uma melhoria da usinagem em si, embora ainda haja diferentes estudos neste campo (Sharma *et al.*, 2015).

Se o objetivo principal é realizar a lubrificação, utiliza-se o sistema é MQL; se tanto o resfriamento quanto a lubrificação são necessários, aplica-se o MQCL com o uso de tubo de vórtice. Em operações MQCL, o lubrificante usado é comumente óleo puro, mas em algumas aplicações usam-se emulsão ou água (Dixit *et al.*, 2012).

#### 3.1 Furação

Brandão *et. al* (2011) realizaram o processo de furação do aço AISI H13 com dureza de 55 HRC utilizando brocas helicoidais inteiriças de metal duro revestidas com

TiAIN. O processo foi realizado utilizando três meios lubrificantes: a seco, MQL e por inundação. Os testes foram realizados utilizando a broca nova; posteriormente, foram realizados outros testes em um novo corpo de prova até o desgaste de flanco atingir 0,2 mm e novamente foi realizado o teste com a broca desgastada para registro de temperaturas. Para a realização das medidas de temperatura, termopares foram inseridos na peça a 0,8 mm, 3,3 mm e 5,8 mm da parede do furo em distâncias da entrada da broca de 3 mm (T0), 7 mm (T1) e 11 mm (T2). Os resultados das medições de temperatura apresentados na Figura (5). Os valores mais altos são encontrados na condição a seco, sendo a condição por inundação a que apresentou menores temperaturas. De acordo com os autores, o melhor para brocas que apresentam já um certo nível de desgaste, é a condição abundante, visto que as temperaturas se mantiveram na mesma faixa das brocas novas. Utilizando como base os valores encontrados no termopar T1 na posição de 0,8 mm (Dist\_0,8) no teste utilizando MQL, verificam-se temperaturas muito mais elevadas nas brocas desgastadas ao serem comparadas com as brocas novas, demonstrando com isso que este método não foi suficiente para manter as temperaturas próximas em ambos os níveis.

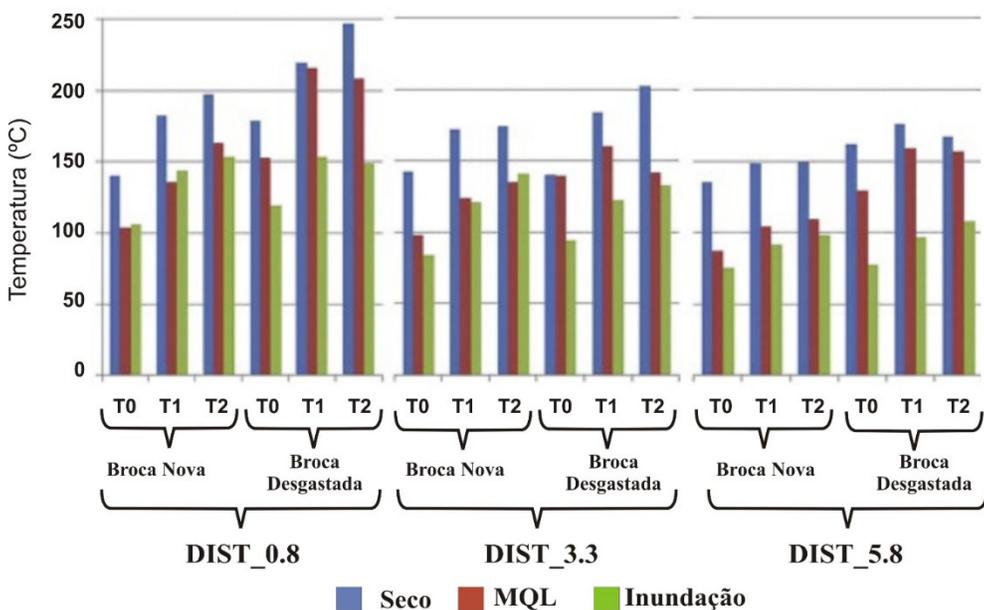


Figura 5. Resultados da temperatura para os testes com broca nova e desgastada na furação de AISI H13 nas condições a seco, MQL e por inundação (Brandão *et al.* 2011).

## 3.2 Fresamento

Mulyadi *et al.* (2015) realizaram o fresamento frontal HSM em aço AISI H13 utilizando fresas inteiriças de metal-duro com 8 mm de diâmetro revestidas com TiAlN sob diferentes meios lubrificantes: a seco, com fluido abundante de base mineral (vazão de 1,8 L/h) e com método MQL (vazão de 29,9 mL/h). Os parâmetros de corte foram mantidos constantes e iguais a  $v_c = 315$  m/min,  $f = 0,05$  mm/rev.  $a_p = 1,5$  mm e  $a_e = 1,5$  mm. Foram realizados 11 passes consecutivos com comprimentos de corte de 100 mm cada. A medição de  $VB_{max}$  foi registrada por microscópio óptico, adotando como critério de fim de vida da ferramenta  $VB_{max} \leq 0,3$  mm. Além disso, foram monitorados os consumos de energia elétrica através da potência para cada condição de lubrificação.

A Figura (6) mostra as curvas de vida encontradas pelos autores. A maior taxa de desgaste ocorreu na usinagem a seco, que atingiu fim de vida após 15,3 min de usinagem. No caso da usinagem com MQL e com fluido abundante (inundação), a vida foi de 25,0 min e 29,7 min, respectivamente. Notou-se que até 23,3 min de usinagem ( $VB_{max} \leq 0,235$  mm) as taxas de desgaste para ambos foram próximas e estatisticamente iguais.

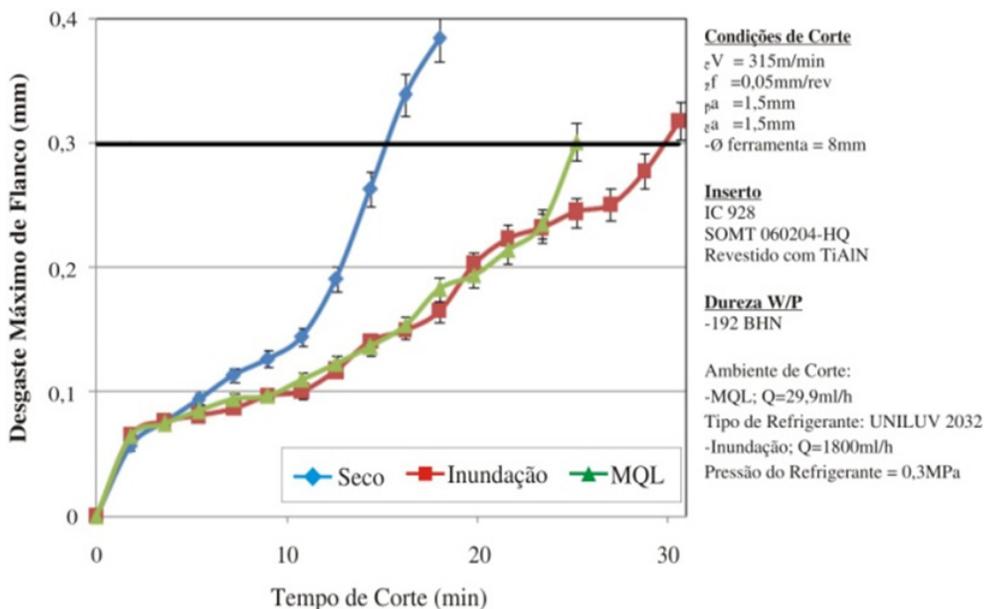


Figura 6. Desgaste de flanco na usinagem de AISI H13 nas condições a seco, MQL e com fluido em abundância (Mulyadi *et al.* 2015).

A Figura (7) mostra os valores de potência consumida. Como era esperado pelos autores, a usinagem a seco foi a que consumiu menores quantidades de potência, uma vez que não havia demanda de energia da bomba. Notou-se ainda a potência de corte na usinagem com MQL muito próxima da usinagem a seco, e a usinagem por inundação a

que apresentou maior consumo de potência. Por considerar que a vida da ferramenta com MQL e com fluido em abundância foram relativamente próximas. Para autores o conjunto de fatores econômicos e ambientais devem definir qual método preferível.

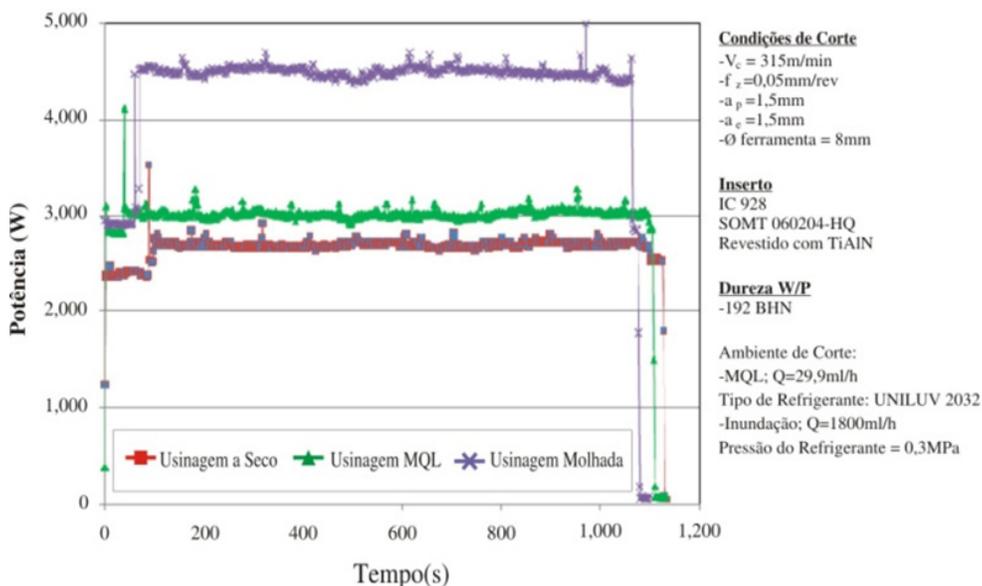


Figura 7. Potência de corte na usinagem de AISI H13 nas condições a seco, MQL e com fluido em abundância (Mulyadi *et al.* 2015).

Manimaran e Ross (2020) realizaram o fresamento de uma liga de aço AISI H13 comparando o método MQCL com o corte a seco e com emulsão 1:20 em abundância. O MQCL utilizou óleo de rícino (vegetal) em conjunto com dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) aplicado a uma vazão de 3,6 l/h e pressão de 2 bar. Os autores analisaram os resultados obtidos em relação à temperatura de corte, ao desgaste da ferramenta, à morfologia do cavaco, à microdureza e a rugosidade média ( $R_a$ ). Constataram que o MQCL reduziu respectivamente a temperatura e o desgaste de flanco em relação ao corte a seco em 52% e 54%, e em relação à usinagem inundada em 40% e 18%. Ao analisarem os cavacos, observaram que houve redução no ângulo de cisalhamento, aumentando a espessura do cavaco e facilitando sua quebra devido a lubrificação e resfriamento superiores. Ao investigar a superfície usinada, o MQCL gerou uma microdureza 6% mais alta em relação à usinagem a seco e 2% maior que na com fluido em abundância. Com relação à rugosidade, a condição MQCL gerou os menores valores de  $R_a$  e a condição a seco os maiores. Além disso, maiores velocidades de corte ( $v_c$ ) produziram menor rugosidade em todas as condições lubrificantes, havendo pequena influência do avanço ( $f$ ) que apresentou valores ligeiramente maiores para um avanço 20% maior. A Figura (8) mostra as rugosidades encontradas.

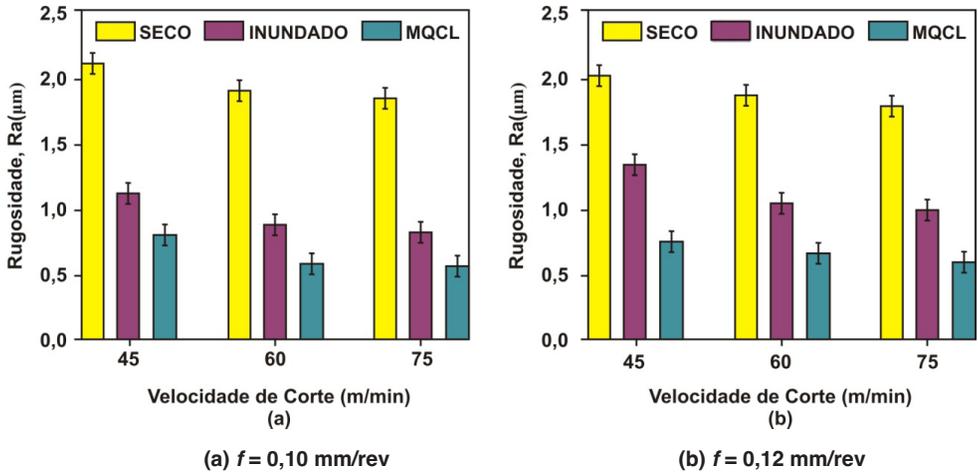


Figura 8. Valores de  $R_a$  para diferentes velocidades de corte e avanço (Manimaran e Ross, 2020).

## 4 I REFRIGERAÇÃO A GÁS NA USINAGEM DO AISI H13

A utilização de fluido gasoso causa menores prejuízos ambientais, uma vez que não há geração de qualquer resíduo com uso deste insumo. O ar comprimido é tido como a alternativa economicamente mais viável, uma vez que o mesmo está prontamente disponível na maioria das empresas. Outros gases como oxigênio ( $O_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), nitrogênio ( $N_2$ ) e argônio (Ar) sob altas pressões também podem ser aplicados isoladamente ou em conjunto com o ar comprimido. Um fluido gasoso pode ser aplicado de várias formas, com vários ângulos de aplicação: quando aplicado diretamente na superfície de saída (face) da ferramenta, reduz o atrito desta com o cavaco; quando aplicado na superfície de folga (flanco) refrigera a interface ferramenta-peça. Ao ser aplicado através de um tubo de vórtice, este reduz a temperatura do gás e amplia sua capacidade refrigerante, podendo chegar a ser  $20^\circ\text{C}$  menor (Sarma, 2009).

### 4.1 Torneamento

Sarma (2009) realizou torneamento de AISI H13 com dureza de 46 HRC utilizando corte a seco e refrigeração com ar comprimido. Para os testes foram utilizadas ferramentas de CBN revestidas com TiN variando os parâmetros de corte ( $v_c = 125$  a  $215$  m/min  $f = 0,05$  a  $0,25$  mm/rev. e  $a_p = 0,06$  a  $0,40$  mm). Foram considerados as forças de usinagem, o desgaste de flanco da ferramenta e a rugosidade da superfície usinada. As forças de avanço e de corte, em geral, são maiores para o torneamento com refrigeração a ar. A Figura (9) mostra as imagens da progressão do desgaste do flanco da ferramenta no torneamento a seco e refrigerado a ar para  $v_c = 125$  m/min,  $f = 0,16$  mm/rev e  $a_p = 0,16$  mm. Cada imagem foi obtida após a usinagem de 200 mm. Nota-se nas imagens que o desgaste de flanco foi maior para condição a seco em comparação com a refrigerada a ar. Isso mostra

que a refrigeração com ar comprimido tem influência direta na vida da ferramenta. Isso foi evidenciado pelos autores para altas velocidades de corte, onde há tendência de elevação da temperatura de usinagem. Observou-se ainda na condição refrigerada a ar que não houve desgaste de cratera e formação de aresta postiça de corte (APC). No entanto, o resfriamento a ar não influencia significativamente a rugosidade da superfície usinada e não auxilia na redução das forças de corte e avanço. Portanto, o método parece ser uma opção ecologicamente correta e econômica para torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de CBN.

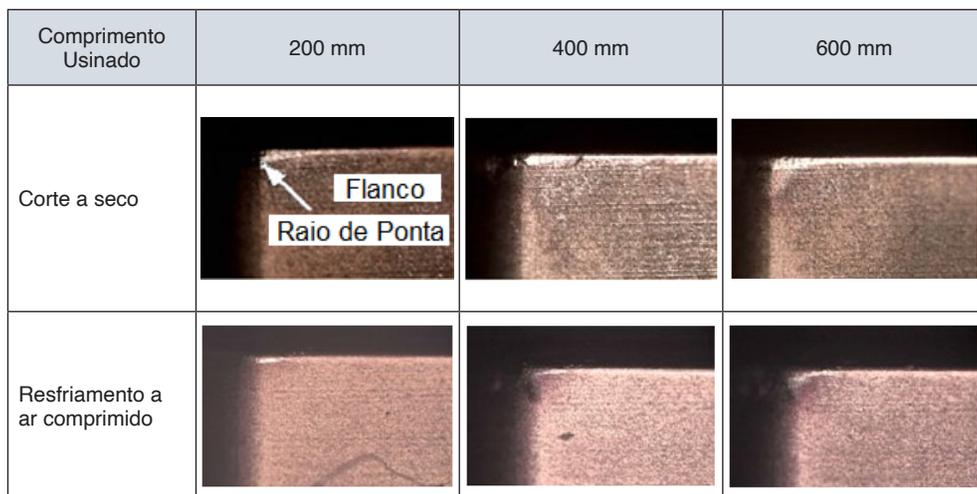


Figura 9. Progressão do desgaste de flanco da ferramenta durante o torneamento a seco e com ar comprimido do AISI H13 com ferramenta de CBN (Sarma, 2009).

## 5 | REFRIGERAÇÃO POR CRIOGENIA

Refrigeração criogênica em processos de usinagem envolve o uso de gases liquefeitos como nitrogênio ( $LN_2$ ), dióxido de carbono ( $LCO_2$ ), hélio (LHe) e argônio (LAr), em baixíssimas temperaturas (abaixo de 120 K). Pode-se utilizar esse artifício como parte do tratamento térmico da ferramenta, melhorando as propriedades do material que a compõe, denominado crio-processamento, ou como fluido de corte propriamente dito, a fim de refrigerar a zona de corte, reduzindo o atrito e afastando o cavaco (Shokrani *et al.*, 2013). A usinagem criogênica visa aumentar a vida da ferramenta, melhorar o acabamento superficial da peça e reduzir as forças de usinagem (Bakar *et al.*, 2020).

Usinagem criogênica é um termo utilizado para denominar processos de usinagem submetidos a uso de gases liquefeitos super frios, direcionados área de usinagem com objetivo de resfriar a zona de corte. Há, entretanto, uma ressalva importante para utilização de refrigeração criogênica: as baixíssimas temperaturas da criogenia também podem alterar as propriedades superficiais do material da peça usinada, geralmente aumentando

a dureza e elasticidade. Aços de baixo carbono, por exemplo, que são materiais dúcteis, com tendência a aderir a ferramenta de usinagem, podem vitrificar – de forma similar a materiais poliméricos – ao atingir temperaturas inferiores a de transição vítrea, reduzindo significativamente a usinabilidade do material. A redução da temperatura também diminuiu a condutividade térmica do material, podendo resultar em um comportamento imprevisível durante a usinagem (Shokrani *et al.*, 2013).

## 5.1 Fresamento

A geometria da aresta de corte e os parâmetros de corte afetam significativamente o desempenho da ferramenta a estabilidade do processo de usinagem, sendo reconhecidos por influenciar as forças de usinagem e a temperatura de corte, além de ter impacto sobre a vida da ferramenta e a qualidade da superfície usinada. Três formas geométricas fundamentais são comumente empregadas quando se trata da usinagem de materiais endurecidos: arredondadas, afiadas e chanfradas. Com esta abordagem, Bakar *et al.* (2020) estudaram a influência do raio de arredondamento da aresta de corte ( $r_\beta$ ) na rugosidade média ( $R_a$ ) gerada por fresamento HSM a seco e com  $LN_2$  do aço AISI H13 endurecido (52 HRC) utilizando fresas inteiriças de metal-duro. A Tabela (2) mostra o planejamento experimental realizado pelos autores. Inicialmente realizou-se os experimentos 8 com usinagem a seco com velocidade de corte constante em  $vc = 200$  m/min. Em seguida, a lubrificação criogênica com  $LN_2$  foi aplicada nos experimentos 1 e 8, os quais corresponderam aos maiores e menores tempos de vida da ferramenta (Fig. 10).

Experimento N°	Avanço $f_z$ (mm/dente)	Profundidade de corte axial $a_p$ (mm)	Raio de arredondamento de aresta $r_\beta$ (mm)
1*	0,03	0,1	0,03
2	0,03	0,1	0,05
3	0,03	0,2	0,03
4	0,03	0,2	0,05
5	0,06	0,1	0,03
6	0,06	0,1	0,05
7	0,06	0,2	0,03
8*	0,06	0,2	0,05

\*Fresamento com refrigeração criogênica ( $LN_2$ )

Tabela. 2. Planejamento experimental (Bakar *et al.* 2020).

Todos os experimentos de vida da ferramenta (Fig. 10) foram interrompidos quando  $VB_{max} \geq 0,3$  mm. Nota-se que o uso do menor  $r_\beta$  (0,03 mm), combinado com baixos níveis de  $a_p$  e  $f_z$ , gerou a menor taxa de desgaste. A maior vida de ferramenta no corte a seco foi de 4,43 min, enquanto que para aplicação de  $LN_2$ , a vida alcançou 8,65 min (aumento de

95%). Segundo os autores, isso pode ter sido devido à grande redução de temperatura na zona de corte e a diminuição do atrito nas interfaces.

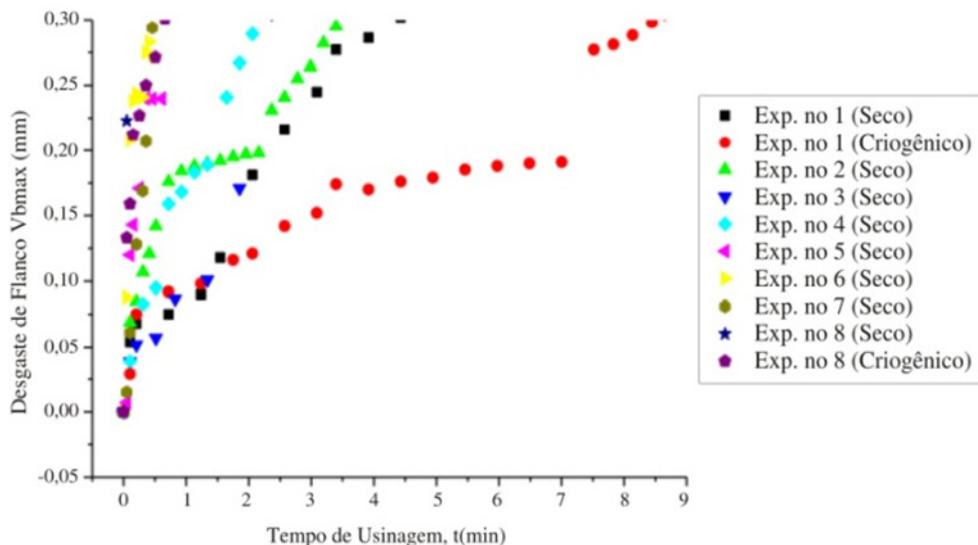


Figura 10. Curva de vida da ferramenta no fresamento do AISI H13 a seco e com LN2 (Bakar *et al.* 2020).

A Figura (11) mostra os valores de rugosidade média ( $R_a$ ) obtidos. Observa-se que um menor  $r_\beta$  (0,03 mm) aliado a baixos níveis de  $a_p$  e  $f_z$  geram melhor acabamento na superfície fresada. Além disso, essa rugosidade diminuiu com aplicação de criogenia (até 7,59% menor) pois há uma tendência de que haja menos adesão de material à ferramenta, o que resulta em menos marcas (arranhões) na superfície.

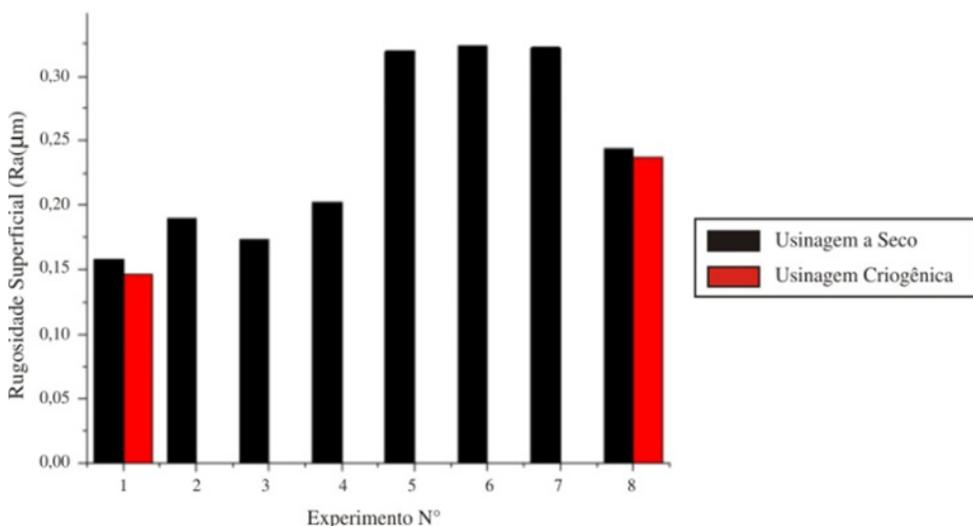


Figura 11. Rugosidade no fresamento do AISI H13 a seco e com LN<sub>2</sub> (Bakar *et al.* 2020).

A Tabela (3) resume estes resultados. Essas técnicas estão se tornando cada vez mais viáveis de serem utilizadas e mais adequadas à usinagem verde. Vale citar o método por mínima quantidade de lubrificação (MQL), o qual se apresenta como mais proeminente em relação aos demais métodos.

Autores	Procedimento de Usinagem	Meio Lubrificante	Resultados
Ghani et al. (2008)	Torneamento	Seco	Os menores desgastes da ferramenta foram encontrados nas condições com menor velocidade de corte devido ao menor calor gerado.
Fallböhmer et al. (2000)	Fresamento	Seco	Todos os insertos de metal-duro tiveram vida superior aos insertos de PCBN. Maior tempo de vida foi encontrado com insertos de metal-duro com revestimento de TiN.
Fox-Rabinovich et al. (2005)	Fresamento	Seco	Os menores valores de desgaste máximo de flanco foram observados nas ferramentas revestidas com TiAlCrN (10/70/20)
Brandão et al. (2011)	Furação	Seco, MQL e Abundância	Os melhores resultados foram encontrados ao utilizar o método de resfriamento por inundação
Mulyadi et al. (2015)	Fresamento	Seco, MQL e Abundância	Maior desgaste da ferramenta na usinagem a seco e maior consumo de potência na usinagem abundante.
Manimaran e Ross (2020)	Fresamento	Seco, MQCL e Abundância	Menores temperaturas e desgaste de flanco foram obtidos com o método MQCL, quando comparados com o corte a seco e a usinagem inundada.
Sharma (2009)	Torneamento	Seco e Ar Comprimido	Na condição a seco ocorreu maior desgaste de flanco, existência de desgaste de cratera e formação de APC, que não foi notada na usinagem refrigerada a ar.
Bakar et al. (2020)	Fresamento	Seco e Criogênico.	Aumento na vida da ferramenta de 95% utilizando LN <sub>2</sub> ao comparar com o fresamento a seco.

Tabela 3. Resumo dos resultados encontrados

## 6 | CONCLUSÃO

O artigo sintetiza estudos promissores de diferentes métodos de lubrificação para a usinagem do aço AISI H13. Conclui-se que essa liga pode se enquadrar como um material de difícil usinagem, o que torna o processo sem aplicação de fluido em abundância bastante desafiador. Entretanto, diversos trabalhos aplicando métodos alternativos de lubrificação foram desenvolvidos e apresentaram resultados satisfatórios com relação à vida das ferramentas, temperaturas de corte, forças de usinagem e qualidades superficiais.

Dessa forma é possível afirmar que a usinagem de AISI H13 é possível de ser realizada com métodos alternativos de aplicação de fluido lubrificante em detrimento a utilização de fluido abundante e que existe uma tendência de que esses métodos sejam ainda aprimorados. Demonstra que outros materiais de difícil usinagem possam ser submetidos a condições semelhantes.

Analisando os estudos revisados, percebe-se que ainda existe campo para estudo no que se refere a métodos de lubrificantes mais amigáveis para usinagem de AISI H13, principalmente furação profunda e processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida. Além disso, há oportunidades de estudos em fluidos de corte de base vegetal em substituição a fluidos de base mineral, que são potencialmente mais agressivos.

## REFERÊNCIAS

- Bakar, H. N. A., Ghani, J. A., Haron, C. H. C., 2020. "Influence of rounded cutting-edge radius and machining parameters on surface roughness and tool wear in milling AISI H13 steel under dry and cryogenic machining", *Jurnal Tribologi*, v. 24, p. 52-64.
- Brandão, L. C., Coelho, R. T., Lauro, C. H., 2011. "Contribution to dynamic characteristics of the cutting temperature in the drilling process considering one dimension heat flow" *Applied Thermal Engineering*, Volume 31, Issues 17–18, 2011. p. 3806-3813,
- Dixit, U. S., Sarma, D. K., Davim, P. J., 2012. *Environmentally friendly machining*, Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2308-9>.
- Cardarelli, F., 2008. *Materials Handbook 2ª ed.*, Tucson: Springer, 1365p.
- Fallböhmer, P., Rodríguez, C. A., Özel, T., Altan, T., 2000. "High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 98, p. 104-115.
- Fox-Rabinovich, G. S., Yamamoto, K., Veldhuis, S. C., Kovalev, A. I., Dosbaeva, G. K., 2005. "Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions", *Surface & Coatings Technology*, v. 200, p. 1804-1813.
- Ghani, M. U., Abukhshim, N. A., Sheikh, M. A., 2008. "An investigation of heat partition and tool wear in hard turning of H13 tool steel with CBN cutting tools", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.39, p. 874-888.
- Goindi, G. S., Sarkar, P., 2017. "Dry machining: A step towards sustainable machining e Challenges and future directions", *Journal of Cleaner Production*, v. 165, p. 1556-1571.
- Klocke, F., 2011. "Manufacturing Processes 1: Cutting". RWTH Edition, Springer, New York.
- Kumar, P., Chauhan, S. R., 2015. "Machinability Study on Finish Turning of AISI H13 Hot Working Die Tool Steel With Cubic Boron Nitride (CBN) Cutting Tool Inserts Using Response Surface Methodology (RSM)", *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 40, p. 1471-1485.
- Manimaran, G., Ross, K. N. S., 2020. "Surface Behavior of AISI H13 Alloy Steel Machining under Environmentally Friendly Cryogenic MQL with PVD-Coated Tool," *Journal of Testing and Evaluation* 48, no. 4 (July/August 2020): 3269–3280. <https://doi.org/10.1520/JTE20180130>

Mulyadi, I. H., Balogun, V. A., Mativenga, P. T., 2015. "Environmental performance evaluation of different cutting environments when milling H13 tool steel", *Journal of Cleaner Production*, v.108, p. 110-120.

Sharma, V. S., Singh, G., Sorby, K., 2015. "A Review on Minimum Quantity Lubrication for Machining Processes", *Materials and Manufacturing Processes*, v. 30, p. 935-953.

Sarma, D. K., 2009, "Experimental study, neural network modelling and optimization of environment – friendly air-cooled and dry turning process", Guwahati/India, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Guwahati, 237p.

Shokrani, A., Dhokia, V., Muñoz-Escalona, P., Newman, S.T., 2013. "State-of-the-art cryogenic machining and processing", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 7, p. 616-648.

Umbrello, D., Rizzuti, S., Outeiro, J.C., Shivpuri, R., M'Saoubi, R., 2008. "Hardness-based flow stress for numerical simulation of hard machining AISI H13 tool steel", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 199, p. 64-73.

Wang, J. J., Zheng, M. Y., 2003. "On the machining characteristics of H13 tool steel in different hardness states in ball end milling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 22, p. 855-86.