



ANÁLISE COMPARATIVA DO DESGASTE DE FLANCO E DA RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE NO FRESAMENTO DO AÇO HARDOX[®] 450 COM FERRAMENTA DE METAL DURO

GUILHERME FABRÍCIO¹
CRISTIANO DA SILVA²

RESUMO

Este trabalho experimental tem por objetivo avaliar a influência dos parâmetros de corte, como a velocidade de corte e avanço por dente, bem como a influência do método de lubrificação sobre o desgaste de flanco da ferramenta e o acabamento de superfície na usinagem por fresamento do aço Hardox[®] 450, utilizando ferramenta de metal duro. Os ensaios de fresamento foram realizados em um centro de usinagem com três eixos ROMI D600. Foram utilizadas velocidades de corte de 110m/min e 160m/min, avanço por dente de 0,12mm e 0,18mm. Os ensaios foram realizados à seco, com refrigeração via tubo de vortex e lubrificação através de aplicação de fluido contínuo. Os resultados indicam que o fresamento a seco proporcionou maior estabilidade térmica e os menores níveis de desgaste de flanco. Quanto à rugosidade, os valores de Ra variaram entre 0,30 e 1,78 μm , sendo influenciados principalmente pelo avanço por dente e pelas menores velocidades de corte. A análise integrada demonstrou que a velocidade de corte exerce maior influência sobre o desgaste de flanco, enquanto o avanço por dente impacta de forma mais significativa o acabamento superficial. Conclui-se que a seleção criteriosa dos parâmetros e a adoção de estratégias de lubrificação adequadas são determinantes para a melhoria da produtividade e sustentabilidade na usinagem de materiais de alta dureza.

Palavras-chave: fresamento; aço Hardox[®]; desgaste de ferramenta; rugosidade superficial; parâmetros de corte.

¹ Estudante do Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau. E-mail: guilhermefabricio82@gmail.com

² Orientador e Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau. E-mail: cristiano.silva@ifsc.edu.br



COMPARATIVE ANALYSIS OF FLANK WEAR AND SURFACE ROUGHNESS IN MILLING HARDOX[®] 450 STEEL WITH A CARBIDE TOOL

Abstract

This experimental work aims to evaluate the influence of cutting parameters, such as cutting speed and feed per tooth, as well as the influence of the lubrication/cooling method on tool flank wear and surface finish in milling Hardox[®] 450 steel using a carbide tool. Milling tests were performed on a ROMI D600 three-axis machining center. Cutting speeds of 110 m/min and 160 m/min, and feed per tooth of 0.12 mm and 0.18 mm were used. The tests were performed dry, with cooling to the vortex tube and lubrication/cooling through continuous fluid application. The results indicate that dry milling provided greater thermal stability and the lowest levels of flank wear. Regarding roughness, Ra values ranged from 0.30 to 1.78 μm , being mainly influenced by feed per tooth and lower cutting speeds. Integrated analysis demonstrated that cutting speed exerts a greater influence on flank wear, while feed per tooth has a more significant impact on surface finish. It is concluded that the careful selection of parameters and the adoption of appropriate lubrication strategies are crucial for improving productivity and sustainability in the machining of high-hardness materials.

Keywords: milling; Hardox[®] steel; tool wear; surface roughness; cutting parameters.



INTRODUÇÃO

O fresamento é um dos processos de usinagem mais empregados na indústria metalmeccânica, destacando-se por sua elevada produtividade e versatilidade na fabricação de peças simples e complexas (ROSNOK, 2025). Trata-se de um processo de corte interrompido, caracterizado pela formação de cavacos descontínuos e por variações cíclicas de temperatura devido ao engajamento periódico dos dentes da ferramenta (ALTINTAS, 2012).

O fresamento utiliza ferramentas multicortantes, que possuem múltiplas arestas de corte distribuídas ao longo de um eixo rotativo. Enquanto a ferramenta rotaciona, a peça a ser usinada executa um movimento de avanço controlado, permitindo a remoção progressiva de material (GROOVER, 2020). Cada aresta remove uma pequena quantidade de material a cada revolução, gerando um padrão de usinagem descontínuo, o que influencia diretamente as forças de corte e o acabamento superficial (DENKENA e BIERMANN, 2014).

De acordo com Coromant (2025), no fresamento concordante, o movimento de avanço da mesa tem o mesmo sentido da direção da rotação da ferramenta. Já no fresamento discordante, os sentidos de avanço da mesa e rotação da ferramenta de corte são opostos.

Na perspectiva de Araújo et al. (2020), o conceito pode ser descrito da seguinte maneira:

“[...] a fresa pode usinar deslocando-se em duas direções: a direção do fresamento concordante, ou decrescente, quando o volume de material retirado por cada dente reduz a cada passagem do dente [...] e a direção do fresamento discordante, ou crescente, onde cada dente inicia o corte com volume próximo de zero e vai aumentando progressivamente até que sai do material [...]”

Entre os materiais que demandam atenção especial em operações de fresamento, destacam-se os aços de alta dureza e elevada resistência ao desgaste, como o Hardox[®]. Este é um aço estrutural laminado e temperado, cuja combinação de propriedades o tornam adequado para aplicação em condições que requeiram uma boa resistência ao desgaste, (PASSARI, 2019). Entre as propriedades, destaca-se sua elevada dureza e resistência ao desgaste, garantindo que o material suporte cargas elevadas sem sofrer deformações ou falhas. A Tabela 1 apresenta um resumo de algumas de suas propriedades mecânicas.

Tabela 1 - Propriedades Mecânicas do aço Hardox 450[®].

Dureza Brinell (HBW)	Tensão de escoamento típica (MPa)	Resistência ao impacto (Charpy)	Resistência à tração (MPa)
450	1250	50 J / -40°C	1412

Fonte - SSAB (2025).

O aço Hardox[®] é especialmente projetado para suportar condições abrasivas, como por exemplo nos setores de mineração, construção civil, agrícola e outros segmentos industriais, destacando-se por sua versatilidade em processos de dobra e soldagem. O alto teor de manganês



presente induz ao encruamento, aumentando ainda mais sua dureza e resistência ao desgaste. A Tabela 2 ilustra sua respectiva composição química.

Tabela 2 - Composição Química do aço Hardox® 450 (%p.)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0,26	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,50	0,60	0,005

Fonte - SSAB (2025).

Na usinagem do Hardox® podem ser utilizadas ferramentas de aço rápido ou de metal duro, facilitando sua manipulação em processos industriais (SSAB, 2025). Entretanto, devido à elevada dureza do material e às características típicas do fresamento, especialmente o corte interrompido, o controle térmico e tribológico torna-se determinante para a estabilidade do processo e para a vida útil da ferramenta.

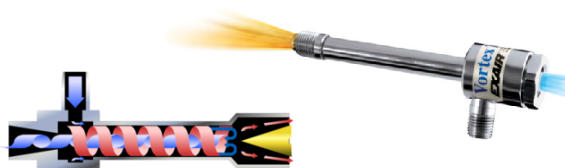
Outra variável relevante no fresamento diz respeito ao emprego de métodos de aplicação de fluido lubrificante-refrigerante. A lubrificação é um fator determinante nos processos de usinagem, influenciando diretamente a vida útil da ferramenta, o acabamento superficial e a eficiência energética do sistema (ZADAFIYA et al., 2021).

A usinagem a seco elimina completamente o uso de fluidos de corte, reduzindo custos com descarte e minimizando os impactos ambientais (PAWANR e GUPTA, 2024). Entretanto, Sreejith e Ngoi (2000) salientam que a ausência de lubrificação pode gerar superaquecimento, acelerando o desgaste da ferramenta e prejudicando o acabamento superficial. Soluções modernas incluem ferramentas revestidas e geometrias otimizadas para operações sem lubrificação (ALVES; OLIVEIRA, 2007).

Os fluidos de corte atuam na refrigeração, lubrificação e remoção de cavacos, sendo essenciais para o acabamento superficial exigido (MACHADO et al, 2009). Sua aplicação varia desde jato convencional até sistemas de alta pressão e micro-lubrificação - MQL (ARAUJO, 2020).

O método Vórtex de resfriamento consiste na aplicação de um fluxo de ar acelerado e controlado, destinado a reduzir a temperatura da peça durante o processo de usinagem. Esse procedimento utiliza vórtices de ar gerados por dispositivos específicos, que direcionam o fluxo para áreas críticas da peça, contribuindo para a diminuição do calor gerado pelo atrito e evitando deformações térmicas indesejadas (HALCSIK; FORMIGONI, 2020; CELENT et al., 2023). A Figura 1, representa o princípio de funcionamento de um tubo de vórtex.

Figura 1 - Princípio de funcionamento de um tubo de vórtex.



Fonte: adaptado de NEW SOLUTIONS BRASIL (2025).

Em estudos recentes sobre usinagem de aços de alta dureza, Duc, Long e Thanh (2020) avaliaram a furação do aço Hardox[®] 500 sob condições de MQCL baseada em tubo de vórtices de Ranque-Hilsch, observando redução da temperatura de corte, melhoria da rugosidade superficial e menor desgaste da ferramenta em comparação ao corte a seco. Esses resultados reforçam o potencial do resfriamento por vórtices em operações com Hardox[®], especialmente em aplicações de alta performance. Dessa forma, o método Vortex se apresenta como uma alternativa eficiente e inovadora para o controle térmico em processos de usinagem de materiais resistentes.

A determinação precisa do fim da vida útil de ferramentas de corte é fundamental para otimizar os processos de usinagem, garantindo qualidade dimensional e evitando custos desnecessários.

Como observado na norma ISO 3685, um dos critérios para substituição da ferramenta é quando o desgaste de flanco máximo (VBb máx) atinge o valor de 0,6 mm, especialmente se o desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco (ABNT NBR ISO 3685, 2017).

Esse valor crítico sinaliza perda de desempenho na usinagem, com degradação do acabamento superficial e aumento das forças de corte (ALTINTAS, 2012). A determinação e a observância do critério de fim de vida são fundamentais para viabilizar a substituição da aresta de corte ou da ferramenta antes que ocorra uma falha catastrófica (COPPINI, 2015).

As falhas ou avarias da ferramenta, como quebra, lascamento ou trincamento, são uma das duas principais causas para a rejeição ou substituição das arestas de corte (ARAUJO, 2020).

Os desgastes ou outras avarias nas ferramentas de corte podem ser medidas periodicamente através de microscopia óptica ou sistemas digitais automatizados, comparando-se com padrões normativos (ARAUJO, 2020). Atingido esse limite, a substituição da ferramenta torna-se obrigatória para evitar defeitos nas peças e riscos operacionais (SANTOS, 2001).

Além do VBb máx, o aumento súbito das forças de usinagem ou a deterioração da rugosidade superficial também funcionam como alertas para substituição (GRZESIK, 2020). Contudo, o VBb máx mantém maior relevância em casos de desgaste assimétrico, comum em operações interrompidas (TOTON, 2015) ou com materiais heterogêneos (KOWALCZYK, 2019).



A rugosidade superficial consiste nas irregularidades micro geométricas presentes na superfície de peças usinadas, originadas do processo de fabricação (AGOSTINHO et al., 2020). Essas imperfeições formam padrões característicos, influenciados pelo avanço da ferramenta, geometria de corte e condições de usinagem (KALPAKJIAN e SCHMID, 2014).

O controle da rugosidade é fundamental para otimização dos processos de usinagem, reduzindo custos e tempo de produção (NGUYEN, 2019). Valores inadequados podem exigir operações adicionais de acabamento, aumentando o custo final do produto (DINIZ et al., 2014). Além disso, a rugosidade afeta propriedades estéticas e de resistência à corrosão em aplicações críticas (MESSINESE et al., 2022).

A avaliação da rugosidade é realizada perpendicularmente às marcas de usinagem, onde os valores são mais representativos (ABNT NBR ISO 4288, 2008). Os principais parâmetros incluem a rugosidade média aritmética (R_a), que quantifica a média dos desvios absolutos em relação à linha média, e a rugosidade total (R_t), que representa a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

Diversos estudos recentes vêm contribuindo significativamente para a compreensão do desempenho de ferramentas na usinagem de aços Hardox®, especialmente sob diferentes estratégias de lubrificação e condições de corte. Lin et al. (2024), descreveram os principais mecanismos de desgaste (adesivo, abrasivo, oxidativo e difusivo) e as falhas mais comuns, como aresta postiça e trincamentos. Passari et al. (2022), em estudo da UFRGS, utilizaram metodologia Box–Behnken para otimizar os parâmetros de fresamento do Hardox® 450, recomendando $v_c=89$ m/min, $f_z=0,1$ mm/dente e $a_p=0,21$ mm.

Essas evidências consolidam a necessidade de abordagem sistemática na análise do desgaste de ferramentas em aços de alta dureza, considerando as estratégias de lubrificação e os parâmetros de corte como fatores críticos para a eficiência e sustentabilidade do processo de usinagem.

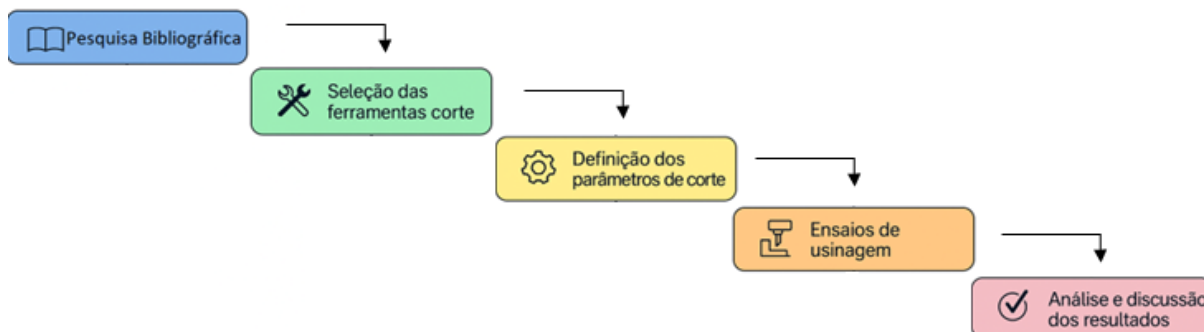
Diante disso, o objetivo geral deste trabalho é avaliar o desgaste de flanco em insertos de metal duro na usinagem do aço Hardox® 450, visando identificar fatores que influenciam esse desgaste e propor recomendações para otimizar o processo de usinagem por fresamento.

Os objetivos específicos são: analisar a influência dos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) no desgaste das ferramentas, avaliar o tipo e o desgaste máximo do flanco principal das ferramentas de corte por microscopia, e propor recomendações para a seleção de ferramentas e parâmetros de usinagem para otimizar a usinagem de materiais duros.

METODOLOGIA

O fluxograma da Figura 2, ilustra o sequenciamento utilizado neste trabalho de pesquisa.

Figura 2 - Fluxograma resumido das etapas do desenvolvimento da pesquisa.



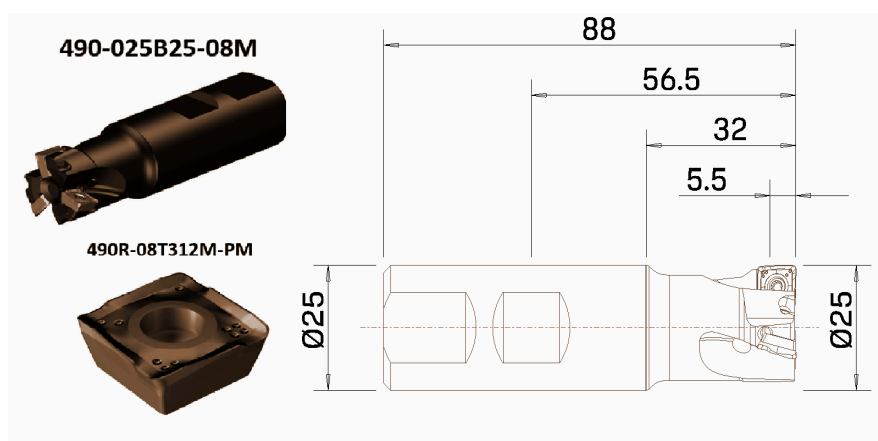
Fonte: O Autor (2025).

Para a usinagem foi empregado um bloco de aço Hardox[®] 450 com as seguintes dimensões: 165x85x50mm (CxLxA).

A seleção das ferramentas de corte baseou-se em recomendações técnicas de fabricantes e em estudos recentes que demonstraram eficácia na usinagem de materiais de alta dureza (Aslan , 2024; Long et al., 2025). Foram utilizados insertos Sandvik[®] código 490R-08T312M-PM 4220 (3 para cada ensaio). Esta classe de insertos é projetada para operações de fresamento de desbaste e semi-acabamento e apresentam revestimento multicamadas (TiCN + Al₂O₃ + TiN), que proporciona excelente resistência ao desgaste abrasivo e térmico.

A Figura 3 apresenta uma visão geral do cabeçote e do inserto utilizado.

Figura 3 - Geometria e codificação das ferramentas de corte utilizadas.



Fonte: Coromant (2025).

A fixação dos cabeçotes no eixo árvore deu-se por meio de mandril porta pinça e pinça ER-40.

O planejamento experimental prevê a coleta e análise de dados, tendo como variantes a velocidade de corte (V_c), o avanço por dente (f_z) e o meio (ambiente) da usinagem, enquanto a profundidade de corte e a largura de corte mantiveram-se constantes. Os meios de lubrificação



testados foram fluido contínuo e sistema vortex (tubo de vortex Mod. SE-WLG08), além da usinagem a seco. A Tabela 3 apresenta as parametrizações utilizadas nas usinagens.

Tabela 3 - Parâmetros de corte utilizados na usinagem por fresamento do aço Hardox® 450.

Parâmetros de corte utilizados nos ensaios								
Ensaio	Vc (m/min)	fz (mm)	Meio	rpm	Vf (mm/min)	ap (mm)	ae (mm)	TC efetivo (min)
1	110	0,18	Seco	1400	756	0,3	20	14,02
2	110	0,18	Vortex	1400	756	0,3	20	14,02
3	110	0,18	Fluido	1400	756	0,3	20	14,02
4	110	0,12	Seco	1400	504	0,3	20	21,03
5	110	0,12	Vortex	1400	504	0,3	20	21,03
6	110	0,12	Fluido	1400	504	0,3	20	21,03
7	160	0,18	Seco	2037	1100	0,3	20	9,64
8	160	0,18	Vortex	2037	1100	0,3	20	9,64
9	160	0,18	Fluido	2037	1100	0,3	20	9,64
10	160	0,12	Seco	2037	733	0,3	20	14,46
11	160	0,12	Vortex	2037	733	0,3	20	14,46
12	160	0,12	Fluido	2037	733	0,3	20	14,46

Fonte: O Autor (2025).

Para cada ensaio, foram realizadas três usinagens. A distância linear total percorrida em cada ensaio foi de 10600 mm. Para avaliar a evolução do desgaste do flanco e da rugosidade superficial, procedeu-se a leitura a cada 1060 mm usinados.

As usinagens foram realizadas no centro de usinagem CNC ROMI D-600 de 3 eixos, com comando FANUC Oi-MC, potência nominal de 30 KVA e rotação máxima do eixo árvore de 7500 rpm. A bomba de injeção de fluido de corte trabalha a uma pressão máxima de 2,5 bar e vazão máxima de 5500 l/h.

A avaliação do desgaste de flanco foi realizada através do estereomicroscópio óptico Stemi 2000-c com câmera acoplada Axiocam ERc 5S. Para medição do desgaste foi utilizado software para aquisição de imagem ZEISS.

A medição da rugosidade foi realizada através do rugosímetro de contato portátil TIME TR210. Foram obtidas no mínimo 5 leituras de rugosidade média (Ra) e rugosidade total (Rt). As medições foram perpendiculares ao sentido do avanço, a cada intervalo de 1060mm de usinagem, com cut-off de 0,8mm.

A análise quantitativa dos dados considerou métricas padronizadas, como o parâmetro VBb máx conforme a norma ABNT NBR ISO 3685 (2017), e rugosidade Ra e Rt, de acordo com a ABNT

NBR ISO 4287 (2002), visando identificar as variáveis de maior impacto na vida útil das ferramentas e na qualidade superficial.

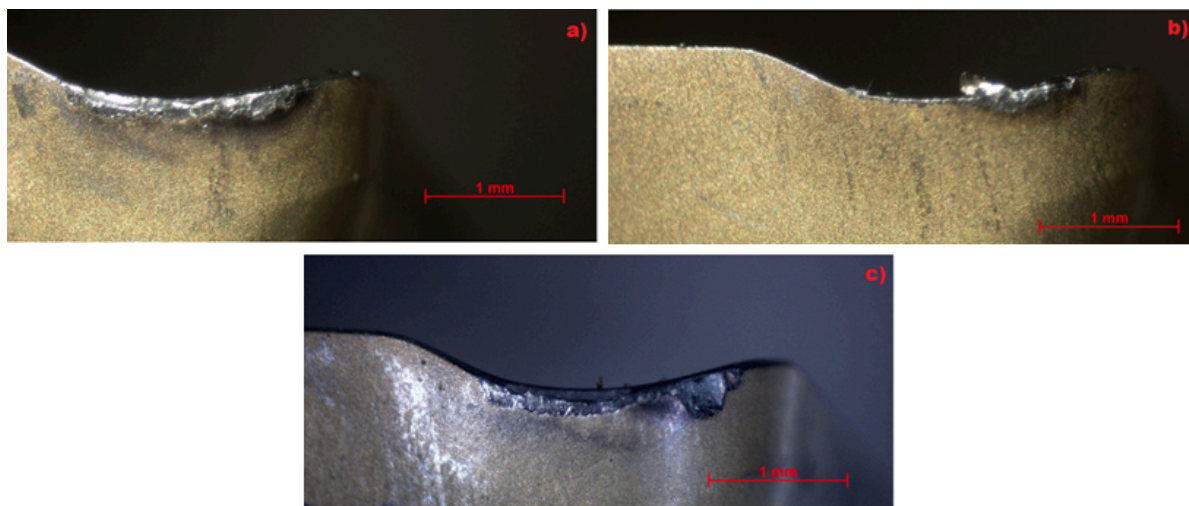
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desgaste das Ferramentas

A análise dos resultados experimentais obtidos na usinagem do aço Hardox[®] 450 permitiu identificar padrões de desgaste das ferramentas e variações significativas na qualidade superficial das peças, em função dos parâmetros de corte aplicados.

As micrografias revelaram principalmente a presença de desgaste por abrasão, a formação da aresta postiça de corte e, em alguns casos, lascamento da aresta de corte, conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Exemplificação dos tipos de desgaste ocorridos nas ferramentas de corte. (a) desgaste por abrasão, (b) desgaste por abrasão + APC, (c) lascamento.

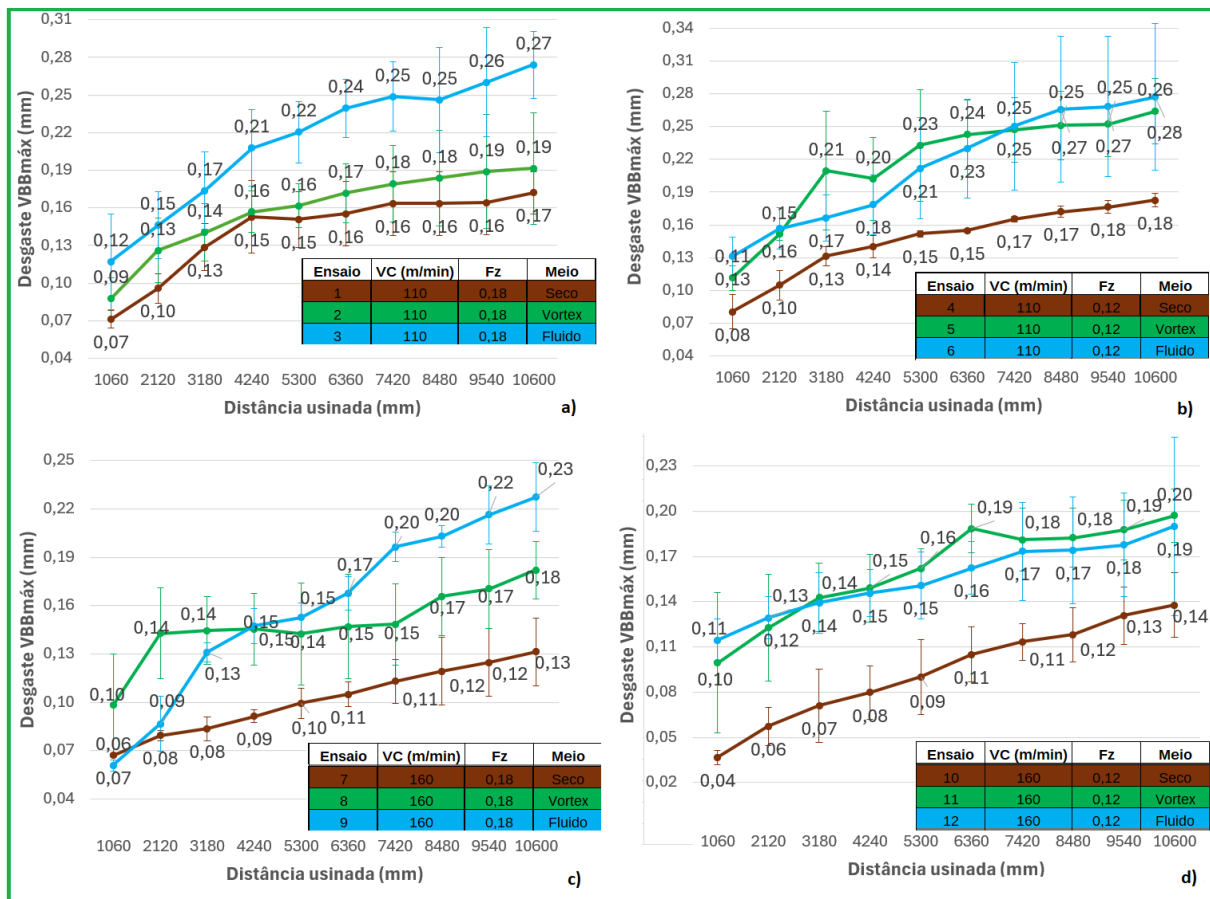


Fonte: O Autor (2025).

De acordo com Trent e Wright (2000) e Machado et al. (2009), a ocorrência de desgaste abrasivo nas ferramentas de metal duro, durante a usinagem do Hardox[®] é ocasionado principalmente devido a microestrutura martensítica e pela presença de carbonetos de dureza elevada. estes carbonetos atuam como partículas abrasivas capazes de arranhar ou até mesmo "arrancar" partículas de WC-Co, o que acelera o desgaste de flanco.

A Figura 5 apresenta os resultados da evolução do desgaste de flanco para todos os ensaios realizados. Os dados indicam que houve um aumento progressivo no desgaste de flanco no decorrer da distância usinada, conforme observado nas medições com microscopia óptica.

Figura 5 - Desgaste de flanco (VBb máx) das fresas de metal duro na usinagem do aço Hardox[®] 450 com diferentes parâmetros de corte. (a) amostras usinadas com VC=110m/min e Fz=0,18mm. (b) amostras usinadas com VC=110m/min e Fz=0,12mm. (c) amostras usinadas com VC=160m/min e Fz=0,18mm e (d) amostras usinadas com VC=160m/min e Fz=0,12mm.



Fonte: O Autor (2025).

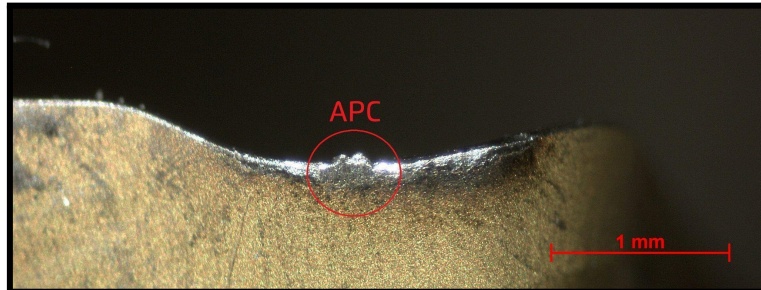
As menores taxas de desgaste foram registradas nas condições do ensaio 7, com velocidade de corte de 160 m/min, avanço de 0,18 mm/dente e na condição a seco.

Assim, o aumento da dureza superficial observado após a usinagem está associado ao encruamento do material na região próxima à superfície, decorrente das elevadas tensões e deformações impostas durante o processo de corte. Esse comportamento é discutido por Shokrani et al. (2012), Jawahir et al. (2011), Sales et al. (2020), Liao et al. (2021), Ren e Liu (2018) e Stipkovic et al. (2017), que relacionam o encruamento à deformação plástica severa da camada superficial durante o corte, destacando seus efeitos sobre a integridade superficial, a formação de tensões residuais e o desempenho em serviço das peças usinadas.

Observa-se também um aumento repentino no desgaste de flanco ocorrido no ensaio 11, no comprimento usinado de 6 300mm. Este aumento ocorreu devido a formação de uma aresta

postiça de corte (APC) devido a aderência de material na aresta de corte, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 - Formação de aresta postiça de corte (APC) ocorrida no ensaio 11 ($V_c=160\text{m/min}$ e $f_z=0,12\text{mm/dente}$, refrigeração por vortex).

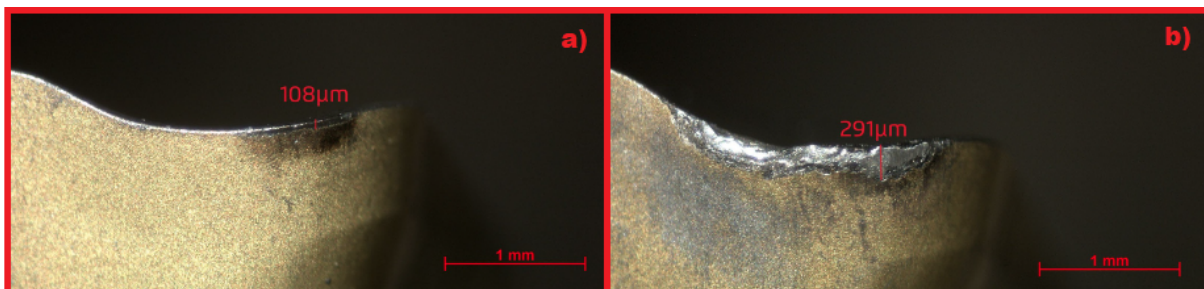


Fonte: O Autor (2025).

O tubo de vortex reduz a temperatura na interface peça/ferramenta para valores que podem ser críticos para a formação de APC. Machado et al. (2009) explicam que faixas de temperatura intermediárias estimulam a formação e crescimento da APC. Além disto, o vortex promove uma instabilidade térmica sobre a aresta da ferramenta, o que contribui também para a formação de APC (KALPAKJIAN e SCHMID, 2014).

A Figura 7 ilustra a medição do desgaste de flanco (VB_b máx) em dois ensaios distintos, exemplificando o menor e o maior desgaste encontrado após os ensaios de usinagem.

Figura 7 - Desgaste de flanco (VB_b máx) após usinagem do aço Hardox® 450. (a) ensaio 7 ($V_C=110\text{m/min}$, $f_z=0,18\text{mm}$, à seco e (b) ensaio 3 ($V_C=160\text{m/min}$, $f_z=0,18\text{mm}$, com utilização de fluido contínuo).



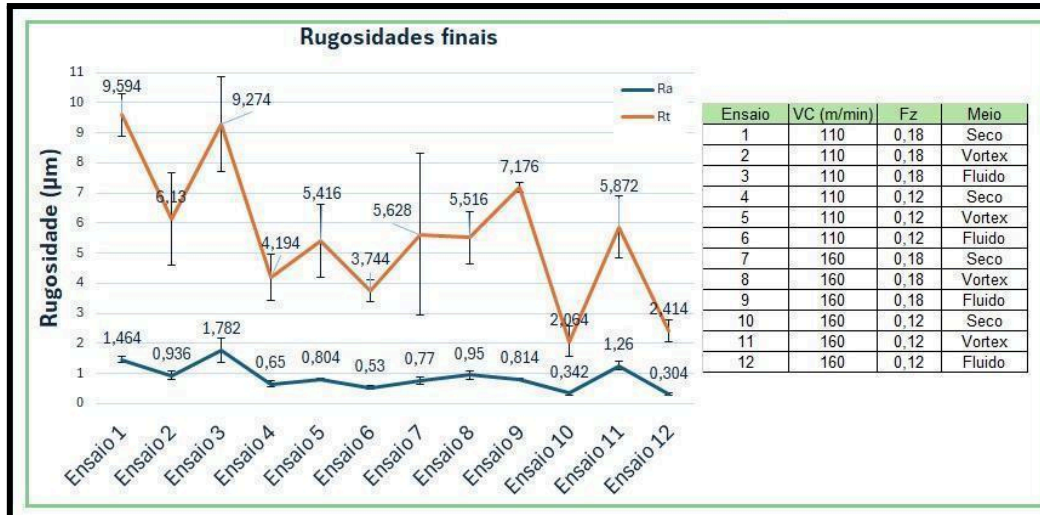
Fonte: O Autor (2025).

De acordo com Shaw (2005), o choque térmico gerado pela aplicação do fluido de corte e as vibrações geradas pelo cavaco segmentado podem causar microtrincas e lascamento da ferramenta de metal duro.

Rugosidade Superficial

A Figura 8 apresenta os resultados das rugosidades médias e totais para todo o conjunto de ensaios.

Figura 8 - Rugosidades Ra e Rt após usinagem por 10 600mm.



Fonte: O Autor (2025).

O gráfico apresenta os valores de Ra e Rt para 12 ensaios, variando apenas o meio de refrigeração e a velocidade de corte, enquanto o avanço por dente permanece constante.

Os valores médios de Ra variaram entre 0,30 e 1,78 μm , sendo mais elevados nas condições de maior fz e menor velocidade de corte. A menor Ra foi alcançada em condições de fz= 0,12 mm/dente, Vc= 160 m/min e com lubrificação de fluido contínuo..

Essa relação entre variáveis também confirma o papel crítico da velocidade de corte na geração de calor e tensões mecânicas. Velocidades mais altas tendem a acelerar o desgaste por mecanismos como adesão e difusão, comprometendo a eficiência do processo ao longo do tempo. No entanto, quando associada à refrigeração, a alta velocidade pode reduzir o atrito na zona de corte e contribuir para melhor acabamento superficial.

Já os valores da rugosidade total sofreram variações mais significativas, pelo fato da Rt ser mais sensível a vibrações, instabilidades do processo e formação de APC.

As observações indicam uma tendência de correlação inversa entre velocidade de corte e rugosidade, como sugerido por Usca *et al.* (2022), reforçando que velocidades elevadas contribuem para cavacos mais estáveis e menores irregularidades na superfície usinada.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo avaliar o desgaste de flanco e a rugosidade superficial durante a usinagem do aço Hardox[®] 450 com ferramentas de metal duro, sob diferentes parâmetros de corte e estratégias de lubrificação. Os resultados mostraram que:

- O fresamento a seco proporcionou maior estabilidade térmica e menor desgaste de flanco.
- O menor valor de desgaste de flanco (23 μm) foi obtido no ensaio 7, com V_c de 160m/min, f_z de 0,18mm à seco.
- O maior valor de desgaste de flanco (27 μm) foi obtido no ensaio 3, com V_c de 110m/min, f_z de 0,18mm e com a utilização de fluido de corte..
- De maneira geral, o uso contínuo de fluido de corte gerou maiores valores de desgaste de flanco.
- A utilização do tubo de vortex promoveu a formação de APC, sobre a aresta principal de corte da ferramenta.
- Os valores médios de R_a variaram entre 0,30 e 1,78 μm , sendo mais elevados nas condições de maior f_z e menor velocidade de corte.
- A velocidade de corte apresentou maior influência sobre o desgaste de flanco, enquanto o avanço por dente impactou de forma mais significativa a rugosidade superficial. Essa diferenciação orienta a seleção dos parâmetros de usinagem conforme o objetivo do processo, seja na durabilidade da ferramenta ou na qualidade do acabamento.
- Os melhores resultados ocorreram com $f_z = 0,18$ mm/dente e $V_c = 160$ m/min a seco, para reduzir o desgaste, e com $f_z = 0,12$ mm/dente e $v_c = 160$ m/min com injeção de fluido, para melhorar o acabamento.

A definição de parâmetros ideais de usinagem requer uma análise integrada de fatores térmicos, tribológicos e estruturais. A principal contribuição deste trabalho reside justamente na validação experimental de combinações que equilibram desempenho e acabamento superficial, fornecendo uma base técnica para aprimorar os processos de usinagem em aços de alta resistência ao desgaste.

Os resultados indicam que não há uma solução única, e a escolha das condições ideais deve equilibrar a vida útil da ferramenta com a qualidade do acabamento superficial da peça, de acordo com as especificidades de projeto.



REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, Oswaldo Luiz *et al.* Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões: Princípios de engenharia de fabricação mecânica. São Paulo: Edgar Blücher, 2020.

ALTINTAS, Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

ALVES, Salete Martins; OLIVEIRA, João Fernando Gomes de. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. *Production*, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 129-138, abr. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-65132007000100009>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ARAUJO, Anna Carla; MOUGO, Adriane Lopes; CAMPOS, Fábio de Oliveira. *Usinagem para engenharia: um curso de mecânica do corte*. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2020. 360 p. ISBN 978-65-8706-504-5.

ASLAN, Abdullah. Machine learning models and machinability analysis for comparison of various cooling and lubricating mediums during milling of Hardox 400 steel. *Tribology International*, v. 198, 109860, 2024. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109860. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109860>. Acesso em: 10 nov. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 3685: Ensaio de vida da ferramenta de ponta unica para torneamento. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 4288: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL, New Solution. Disponível em: <https://newsolutionsbr.com.br/tubo-de-vortice-exair>. Acesso em: 08 nov 2025.

CELENT, Luka; BAJIĆ, Dražen; JOZIĆ, Sonja; MLADINEO, Marko. Hard milling process based on compressed cold air-cooling using vortex tube for sustainable and smart manufacturing. *Machines*, Basel, v. 11, n. 2, art. 264, 2023. <https://doi.org/10.3390/machines11020264>.

COPPINI, Nivaldo Lemos. *Usinagem enxuta: gestão do processo*. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2015. 136 p.

COROMANT, Sandvik. Disponível em: [Fresamento concordante vs. fresamento discordante](#). Acesso em: 08 ago. 2025.

COROMANT, Sandvik. Disponível em: [Sandvik Coromant](#). Acesso em: 08 ago. 2025.

COROMANT, Sandvik. *Fresamento sem refrigeração ou com fluido de corte*. Disponível em: [Fresamento sem refrigeração ou com fluido de corte](#). Acesso em: 08 ago. 2025.



DENKENA, B.; BIERMANN, D. Cutting edge geometries. *CIRP Annals*, v. 63, n. 2, p. 631–653, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009>. Acesso em: 19 out.. 2025.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014. 272 p.

DUC, Tran Minh; LONG, Tran The; THANH, Dang Van. Evaluation of minimum quantity lubrication and minimum quantity cooling lubrication performance in hard drilling of Hardox 500 steel using Al₂O₃ nanofluid. *Advances in Mechanical Engineering*, [S.l.], v. 12, n. 2, 2020. Art. 1687814019888404. DOI: 10.1177/1687814019888404. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1687814019888404>. Acesso em: 18 set. 2025.

EZUGWU, E. O. High speed machining of difficult-to-machine materials. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 64, p. 1–6, 1997.

GROOVER, M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 6. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

GRZESIK, W. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2020.

HALCSIK, Vitor Marcelo Costa; FORMIGONI, Alexandre. Métodos de refrigeração no torneamento: uma análise bibliométrica. *South American Development Society Journal*, [S. l.], v. 6, n. 18, p. 350-364, 2020. <https://doi.org/10.24325/issn.2446-5763.v6i18p350-364>.

JAWAHIR, I. S.; BRINKSMEIER, E.; M'SAOUBI, R.; ASPINWALL, D. K.; OUTEIRO, J. C.; MEYER, D.; UMBRELLO, D.; JAYAL, A. D. Surface integrity in material removal processes: recent advances. *CIRP Annals*, v. 60, n. 2, p. 603–626, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.002>. Acesso em: 30 nov. 2025.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. *Manufacturing Engineering and Technology*. 7. ed. Boston: Pearson, 2014.

KOWALCZYK, Joanna; MADEJ, Monika; MILEWSKI, Krystian; NOWAKOWSKI, Lukasz; OZIMINA, Dariusz. The influence of cutting fluid and diamond-like carbon coating on cutting tool wear. *Journal of Machine Construction and Maintenance-Problemy Eksploatacji*, 2019. <https://doi.org/10.12783/DTCSE/FE2019/30679>. Acesso em: 28 out. 2025.

LIAO, Z.; LA MONACA, A.; MURRAY, J.; SPEIDEL, A.; USHMAEV, D.; CLARE, A.; AXINTE, D.; M'SAOUBI, R. Surface integrity in metal machining – Part I: fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 162, art. 103687, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2020.103687>. Acesso em: 30 nov. 2025.

LIN, G.; SHI, H.; LIU, X.; WANG, Z.; ZHANG, H.; ZHANG, J. Tool wear on machining of difficult-to-machine materials: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 134, p. 989–1014, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14193-4>. Acesso em: 05 nov. 2025.

LONG, Tran The. Experimental investigation on cutting forces in sustainable hard milling of Hardox 500 steel under Al₂O₃/MoS₂ hybrid nanofluid MQCL environment. *Lubricants*, Basel, v. 13, n. 6, art. 240, 2025. DOI: 10.3390/lubricants13060240. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/lubricants13060240>. Acesso em: 09 nov. 2025.



MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Afonso Márcio; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Marcelo Barrozo da. Teoria da usinagem dos materiais. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2009. 397 p.

MESSINESE, E.; CASANOVA, L.; PATERLINI, L.; CAPELLI, F.; BOLZONI, F.; ORMELLESE, M.; BRENNNA, A. A comprehensive investigation on the effects of surface finishing on the resistance of stainless steel to localized corrosion. *Metals*, v. 12, p. 1751, 2022. <https://doi.org/10.3390/met12101751>. Acesso em: 25 out. 2025.

NGUYEN, T.-T. Prediction and optimization of machining energy, surface roughness, and production rate in SKD61 milling. *Measurement*, v. 136, p. 525-544, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.009>. Acesso em: 21 out. 2025.

PASSARI, É. S. Otimização dos parâmetros de fresamento frontal em aço Hardox 450 baseada na rugosidade e na força resultante. 2019. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

PASSARI, Émerson dos Santos; AMORIM, Heraldo José; SOUZA, André João de. Multi-objective optimization of cutting parameters for finishing end milling Hardox® 450. *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications (ITEGAM-JETIA)*, Manaus, v. 8, n. 34, p. 20-28, mar./abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/jetia.v8i34.805>. Acesso em: 05 nov. 2025.

PAWANR, S.; GUPTA, K. Dry machining techniques for sustainability in metal cutting: a review. *Processes*, Basel, v. 12, n. 2, p. 417, 2024. DOI: 10.3390/pr12020417. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr12020417>. Acesso em: 20 nov. 2025.

REN, X. P.; LIU, Z. Q. Microstructure refinement and work hardening in a machined surface layer induced by turning Inconel 718 super alloy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, v. 25, p. 937-949, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1643-2>. Acesso em: 30 nov. 2025.

ROSNOK, Cnc Machine. Disponível em: https://rosnokmachine.com/pt/types-of-machining-processes/#elementor-toc_heading-anchor-2. Acesso em 08 nov. 2025.

SALES, W. F.; SCHOOP, J.; SILVA, L. R. R. da; MACHADO, Á. R.; JAWAHIR, I. S. A review of surface integrity in machining of hardened steels. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 58, p. 136-162, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.040>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SANTOS, André Luis Beloni dos. Metodologia via redes neurais para a estimativa da rugosidade e do desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento frontal. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

SHAW, M. C. *Metal cutting principles*. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2005.

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 57, p. 83-101, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.02.002>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SREEJITH, P.S; NGOI, B.K.A. Dry machining: machining of the future. *Journal Of Materials Processing Technology*, [S.L.], v. 101, n. 1-3, p. 287-291, abr. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00445-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00445-3). Acesso em: 10 jul. 2025.



SSAB. Hardox® 450 – Ficha técnica. Disponível em: <https://www.ssab.com>. Acesso em: 17 fev. 2025.

SSAB. Recomendações de usinagem para o Hardox®. Disponível em: <https://www.ssab.com>. Acesso em: 17 fev. 2025.

STIPKOVIC, M. A.; BORDINASSI, É. C.; FARIAS, A.; DELIJAICOV, S. Surface integrity analysis in machining of hardened AISI 4140 steel. *Materials Research*, v. 20, n. 2, p. 387–394, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0420>. Acesso em: 30 nov. 2025.

TOTON, Jimmy. *The design, characterisation and application of an accelerated drill test for cutting tool development*. 2015. Thesis (PhD) – RMIT University, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.25439/rmt.27579657>. Acesso em: 18 set. 2025.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. *Metal Cutting*. 4. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.

USCA, Üsame Ali; UZUN, Mahir; ŞAP, Serhat; KUNTOĞLU, Mustafa; GIASIN, Khaled; PIMENOV, Danil Yu; WOJCIECHOWSKI, Szymon. Tool wear, surface roughness, cutting temperature and chips morphology evaluation of Al/TiN coated carbide cutting tools in milling of Cu–B–CrC based ceramic matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. 1243-1259 p. v. 16. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.063>. Acesso em: 18 set. 2025.

ZADAFIYA, K.; SHAH, P.; SHOKRANI, A.; KHANNA, N. Recent advancements in nano-lubrication strategies for machining processes considering their health and environmental impacts. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 68, p. 481-511, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.056>. Acesso em: 08 abr. 2025.