

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS EM FERRAMENTAS DE CORTE NO FRESAMENTO DO INCONEL 718 – PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO

Victor Tallis Bazon, victorbazon@ufu.br¹

Gustavo Henrique Nazareno Fernandes, ghnfernandes@gmail.com¹

Álison Rocha Machado, alissonr.machado@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Avenida João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG, 38400-89, Brasil - Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU).

Resumo. Na usinagem de materiais de baixa usinabilidade, como a superliga Inconel 718, os revestimentos aplicados às ferramentas de corte desempenham papel essencial na melhoria do processo. Esses revestimentos contribuem para o aumento da dureza da cunha de corte, redução do atrito e da difusão térmica para a ferramenta, além de retardarem os mecanismos de desgaste, favorecendo o aumento da vida útil das ferramentas e a melhoria do acabamento superficial. No fresamento de topo com ferramentas inteiriças, essas características são especialmente importantes devido às elevadas solicitações mecânicas e térmicas concentradas na região de corte. Com base nesse cenário, esta proposta de dissertação tem como objetivo investigar o desempenho de ferramentas de metal duro fabricadas pela empresa Ceratizit, com diferentes revestimentos comerciais fornecidos pela empresa Oerlikon Balzers – ALCRONA EVO® (AlCrN/AlCrXN), TISAFLEX® (AlTiN/TiSiXN) e LATUMA® (AlTiN) – além de ferramentas não revestidas que servirão de referência – no fresamento de topo predominantemente frontal da superliga Inconel 718. O estudo será conduzido por meio de experimentos controlados, utilizando planejamento fatorial completo, métodos comparativos e análise estatística. Serão avaliadas variáveis como forças de usinagem, temperatura de corte, vida útil das ferramentas, rugosidade da superfície usinada e morfologia dos cavacos. O objetivo é compreender como os diferentes revestimentos influenciam o desempenho térmico, tribológico e mecânico do processo, fornecendo subsídios técnicos para a seleção de ferramentas mais eficientes e adequadas à usinagem de superligas.

Palavras chave: vida útil da ferramenta, revestimentos, fresamento de topo, inconel 718

1. INTRODUÇÃO

A demanda por materiais com elevado desempenho em ambientes severos tem crescido significativamente nos últimos anos, especialmente em setores como aeroespacial, de petróleo e gás, geração de energia e transporte. Para atender a essas exigências, as superligas à base de níquel têm se consolidado como materiais estratégicos, destacando-se pela sua resistência à oxidação, estabilidade térmica, elevada resistência mecânica e boa tenacidade mesmo em altas temperaturas (Mahesh *et al.* 2021). Dentre essas ligas, o Inconel 718 tem se sobressaído como uma das mais utilizadas em aplicações críticas, como discos de turbinas, componentes estruturais de motores aeronáuticos e peças expostas a ambientes corrosivos e termomecanicamente exigentes (Singh *et al.* 2022).

O Inconel 718 é uma liga complexa que combina propriedades físicas e químicas avançadas, tornando-a altamente resistente à deformação plástica em altas temperaturas, com boa soldabilidade e excelente resistência à corrosão intergranular. No entanto, essas mesmas propriedades que o tornam desejável em operação representam desafios significativos para sua usinagem. Sua baixa condutividade térmica faz com que o calor gerado no processo de corte se concentre majoritariamente na ferramenta, elevando a temperatura na zona de corte e intensificando os mecanismos de desgaste (Liang *et al.* 2019). Além disso, a microestrutura do Inconel 718 contém carbonetos e fases endurecidas estáveis, que tornam o material abrasivo e aceleram o desgaste da ferramenta, exigindo maior energia e resistência ao cisalhamento (Bushlya *et al.* 2021).

Durante operações como o fresamento, que envolve entrada e saída constantes da ferramenta no material, ocorrem variações térmicas abruptas, que promovem a propagação de trincas térmicas e aceleram o desgaste da aresta de corte. Entre os principais mecanismos de desgaste/falha observados na usinagem do Inconel 718 estão o desgaste por abrasão, adesão, difusão, oxidação e microlascamentos, além da possibilidade da formação de arestas postiças, que comprometem o acabamento superficial da peça e aumentam as forças de corte (De Bartolomeis *et al.* 2021). Esses fatores contribuem para a redução da durabilidade da ferramenta, aumento dos custos operacionais e baixa produtividade.

Tradicionalmente, a utilização de fluidos de corte é uma prática comum na usinagem de materiais de baixa usinabilidade, como o Inconel 718, sendo fundamental para o controle térmico, redução do atrito e remoção eficiente de cavacos na zona de corte. Essa abordagem pode contribuir significativamente para a melhoria da vida útil da ferramenta e da qualidade superficial da peça, especialmente em processos como o fresamento, que geram elevadas cargas térmicas

intermitentes. No entanto, o uso de fluidos também impõe desafios em termos de custos operacionais, complexidade no manuseio e potenciais impactos ambientais e à saúde ocupacional, devido à presença de aditivos químicos potencialmente tóxicos (Krstev e Knutsson, 2019). Por essa razão, a escolha entre usinagem com ou sem fluido de corte deve considerar não apenas os aspectos técnicos e tribológicos do material, mas também fatores econômicos, ambientais e de viabilidade industrial. Nesta pesquisa, será utilizado um fluido de corte aplicado na forma de jorro para auxiliar na lubri-refrigeração do processo, considerando que o corte a seco é praticamente inviável na usinagem da superliga à base de níquel, Inconel 718, com ferramentas de metal duro.

Nesse contexto, a aplicação de revestimentos duros nas ferramentas de corte surge como uma solução tecnológica para aumentar a resistência ao desgaste, melhorar a dissipação térmica e reduzir o atrito na interface de corte. Os revestimentos aplicados via Deposição Física de Vapor (PVD) e Deposição Química de Vapor (CVD) têm se mostrado eficazes para esse fim, por apresentarem elevada dureza, boa aderência ao substrato, resistência à oxidação e estabilidade térmica (Zhao *et al.* 2021). Ao formar uma barreira entre a ferramenta e o material usinado, o revestimento atua reduzindo os mecanismos de difusão, adesão e abrasão.

Estudos recentes confirmam a eficiência de diversos sistemas de revestimentos na usinagem de materiais de baixa usinabilidade, incluindo o Inconel 718. Sousa *et al.* (2021) demonstraram que ferramentas revestidas com TiAlN e TiAlSiN apresentaram maior resistência ao desgaste e melhor acabamento superficial em aços-ferramenta. Wang *et al.* (2021) observaram que ferramentas com revestimento TiAlN apresentaram desempenho superior ao usinar ligas pesadas, com redução das forças de corte e maior estabilidade dimensional. Uddin *et al.* (2021) destacaram que, além da dureza do revestimento, a adesão ao substrato é um fator determinante para a durabilidade da ferramenta em regimes severos de corte.

Revestimentos têm ganhado destaque por sua capacidade de suportar elevadas temperaturas, mantendo resistência ao desgaste e propriedades tribológicas favoráveis. Grigoriev *et al.* (2021) analisaram o comportamento de ferramentas com diferentes tipos de revestimento em operações de torneamento e identificaram que esses materiais são eficazes na dissipação de calor e na proteção da aresta de corte. Akgün *et al.* (2023) demonstraram que ferramentas revestidas com TiN-PVD e Al₂O₃-CVD apresentam variações substanciais nos indicadores de desempenho, sendo que as ferramentas com revestimento PVD apresentaram menores forças de corte e menor temperatura na zona de contato.

Entretanto, o comportamento operacional real de uma ferramenta revestida depende de uma série de variáveis interdependentes, como a geometria da ferramenta, os parâmetros de corte, a estratégia de refrigeração e as propriedades específicas do revestimento. Yaqoob *et al.* (2024) mostraram que o tipo de revestimento influencia diretamente a vida útil da ferramenta e a rugosidade da superfície usinada em fresamento de alto desempenho. Piorkowski *et al.* (2024) propuseram uma abordagem holística para avaliação do fresamento do Inconel 718, incorporando análise de desgaste, forças de corte, consumo de energia e qualidade superficial como critérios integrados de decisão.

Além disso, é importante ressaltar que, mesmo com a aplicação de revestimentos, a usinagem do Inconel 718 ainda impõe grandes desafios relacionados ao controle térmico e à estabilidade do processo. Assim, torna-se essencial avaliar experimentalmente o comportamento de diferentes sistemas de ferramentas revestidas sob condições realistas de operação, a fim de identificar as soluções mais viáveis técnica e economicamente para a indústria.

Diante desse panorama, o presente trabalho propõe uma análise comparativa do comportamento de ferramentas de corte inteiriças de metal duro, fabricadas pela empresa Ceratizit, com diferentes revestimentos comerciais fornecidos pela Oerlikon Balzers — ALCRONA EVO® (AlCrN), TISAFLEX® (AlTiN/TiSiXN) e LATUMA® (AlTiN) — no fresamento da superliga de níquel, Inconel 718. Será também avaliada uma ferramenta sem revestimento, a qual servirá como referência experimental. A análise será conduzida com base em variáveis críticas de desempenho, como desgaste da ferramenta, forças de corte, temperatura de operação, rugosidade da peça usinada e morfologia dos cavacos.

Os resultados obtidos visam contribuir para a compreensão dos efeitos dos revestimentos no comportamento mecânico, tribológico e térmico da ferramenta durante a usinagem, fornecendo subsídios técnicos para a otimização do processo e para a seleção de soluções mais eficazes e sustentáveis.

2. METODOLOGIA

O estudo será conduzido no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), com o objetivo de avaliar o comportamento de ferramentas de corte revestidas no fresamento de topo da superliga Inconel 718. A metodologia será dividida em diferentes etapas experimentais, permitindo a análise integrada de variáveis mecânicas, térmicas e tribológicas envolvidas no processo. As ferramentas a serem utilizadas são fresas inteiriças de metal duro, com e sem revestimentos comerciais aplicados por PVD. Serão avaliados três tipos de revestimento: ALCRONA EVO® (AlCrN), TISAFLEX® (AlTiN/TiSiXN) e LATUMA® (AlTiN), além de uma ferramenta não revestida, utilizada como referência. A Tabela (1) apresenta as principais propriedades de cada revestimento, destacando suas vantagens específicas, especialmente em aplicações que demandam alta resistência ao desgaste e desempenho em temperaturas elevadas.

O tipo de usinagem adotado será o fresamento de topo predominantemente frontal (onde $a_e > a_p$), conduzido por meio de uma estratégia de passes alternados sobre a superfície do bloco da superliga de Inconel 718. Nessa trajetória

bidirecional, a ferramenta percorre a peça em sentidos opostos sucessivos, o que faz com que a operação ocorra alternadamente de forma concordante e discordante, em função da relação entre o avanço e a rotação da fresa.

Tabela 1. Dados dos revestimentos ALCRONA EVO®, TISAFLEX® e LATUMA® (Oerlikon Balzers, 2025)

Revestimento	AlCrN	AlTiN/TiSiXN	AlTiN
Microdureza (HV)	4487 ± 408	3875 ± 510	3574 ± 306
Tensão de Compressão (GPa)	-3,5 ± 1	-5 ± 1	-3 ± 1
Temperatura Máxima de Serviço (°C)	1100	1100	1000
Temperatura de Revestimento (°C)	< 500	< 600	< 500
Coloração	Cinza Brilhante	Bronze	Cinza
Nome Comercial	ALCRONA EVO®	TISAFLEX®	LATUMA®

O material base para usinagem será um bloco de Inconel 718, apresentado na Fig. (1), com dimensões de 252 mm × 218 mm × 98 mm, previamente fornecido pela empresa Villares Metals S.A., atualmente disponível no LEPU e utilizado em projetos anteriores. O bloco passará por preparação adequada para os testes, incluindo desbaste e divisão das áreas de usinagem. A composição química típica da liga de Inconel 718, de acordo com a especificação API (UNS N07718) é apresentada na Tab. (2), enquanto suas propriedades mecânicas constam na Tab. (3).

Tabela 2. Composição química do Inconel 718 segundo a especificação API (UNS N07718) (API Standard 6A718, 2010)

Elemento	Ni	Cr	Fe	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co
% Peso	50,00	17,00	Bal.	4,75	2,80	0,65	0,20	1,00
	55,00	21,00		5,50	3,30	1,15	0,80	máx
Elemento	C	Mn	Si	P	S	B	Cu	Pb
% Peso	0,08	0,35	0,35	0,015	0,015	0,006	0,30	0,001
	máx	máx	máx	máx	máx	máx	máx	máx

Tabela 3. Propriedades mecânicas da liga de Inconel 718 (Oliveira, 2021)

Resistência ao escoamento	Resistência à tração	Dureza
1070 MPa	1262 MPa	40 HRC/392 HV

Para os ensaios de vida da ferramenta, forças de corte e temperatura no fresamento de topo da superliga à base de níquel Inconel 718 será utilizado o centro de usinagem ROMI Bridgeport Discovery 760, apresentado na Fig. (2), com potência de acionamento do eixo-árvore de 9 kW e rotação com variação contínua de 10 a 10000 rpm, localizado no mesmo laboratório.

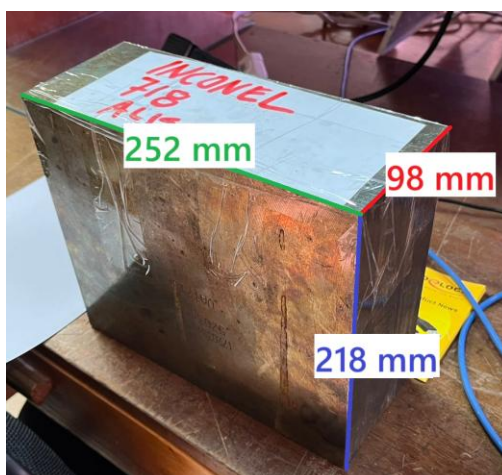


Figura 1. Bloco de Inconel 718



Figura 2. Centro de usinagem ROMI Bridgeport Discovery 760

2.1. Vida da Ferramenta

Os ensaios de vida serão conduzidos com aplicação de fluido de corte em jorro (Vasco 7000 da Blaser, na concentração de 8%), visando simular condições industriais mais favoráveis à usinagem do Inconel 718. A cada intervalo de tempo predeterminado, a ferramenta será inspecionada com o auxílio de microscopia óptica para monitoramento do desgaste. O critério de fim de vida adotado será $VB_{B\max} = 0,6$ mm, conforme norma ISO 8688.

Para a definição das condições de teste, será adotado um planejamento fatorial completo 2^3 , considerando como variáveis quantitativas a velocidade de corte (V_c), o avanço por dente (f_z), cada uma em dois níveis (+ e -), cujos valores serão definidos com base nas recomendações do fabricante da ferramenta. A terceira variável de entrada é o tipo de revestimento da ferramenta, portanto, uma variável qualitativa. Como esta variável terá 4 níveis (R0 – sem revestimento, R1, R2 e R3), o fatorial 2^3 será repetido para contemplar todos eles. As profundidades de corte axial (a_p) e radial (a_e) serão mantidas constantes. A Tabela (4) exemplifica o planejamento, onde o sinal (-) representa o nível inferior e o sinal (+) o nível superior da variável de entrada.

Tabela 4. Planejamento fatorial utilizado para os testes de vida

Experimento	Revestimento	V_c (m/min)	f_z (mm/rot)
1	R0	-	-
2	R0	-	+
3	R0	+	-
4	R0	+	+
5	R1	-	-
6	R1	-	+
7	R1	+	-
8	R1	+	+
9	R2	-	-
10	R2	-	+
11	R2	+	-
12	R2	+	+
13	R3	-	-
14	R3	-	+
15	R3	+	-
16	R3	+	+

Esse delineamento experimental permitirá a análise dos efeitos principais e das interações entre os fatores selecionados sobre a vida útil das ferramentas testadas. As combinações de parâmetros serão testadas para cada tipo de ferramenta (com e sem revestimento), culminando em 16 ensaios. Para melhor análise estatística, os experimentos serão feitos em triplicata, ou seja, com réplica e tréplica de todas as condições, totalizando 48 experimentos. A cada intervalo de tempo predeterminado, a ferramenta será removida para inspeção visual e medição do desgaste, utilizando estereomicroscópio de alta resolução, encerrando-se o ensaio quando o desgaste ultrapassar o limite recomendado pela norma.

O planejamento fatorial e as réplicas, além de fornecerem base estatística sólida, permitirão a comparação entre as ferramentas em termos de desempenho, por meio de análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey, possibilitando a seleção das condições mais favoráveis de corte para os revestimentos avaliados.

Após a conclusão dos testes, algumas ferramentas selecionadas (uma para cada condição testada) serão analisadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da Hitachi, modelo TM3000, para identificar os mecanismos de desgaste predominantes, com o auxílio do EDS da Oxford Instruments, modelo INCAx-act.

2.2. Forças de Corte

Para a determinação das forças de corte no fresamento do Inconel 718, será utilizado um dinamômetro rotativo Kistler, modelo 9123C, acoplado a um amplificador de sinais da mesma marca, ambos disponíveis no laboratório. Durante os testes, o dinamômetro registrará as componentes da força de usinagem atuantes no processo em tempo real, cuja frequência de aquisição de dados e o tempo de ensaio serão definidos posteriormente, permitindo a análise da influência dos parâmetros de corte, do tipo de revestimento das ferramentas e das condições de usinagem. Esses dados serão essenciais para avaliar o desempenho dos revestimentos testados, identificando possíveis alterações no esforço de corte. O experimento será conduzido utilizando o método de variação de um único parâmetro por vez (*one variable at a time*), no qual cada variável de entrada (V_c e f_z) será ajustada individualmente, enquanto a outra permanece constante. A análise dos resultados será facilitada por meio de gráficos comparativos. As variáveis de resposta consideradas incluem:

- Força de corte (F_x);
- Força de avanço (F_y);
- Força passiva (F_z);
- Torque (M_z).

Esses ensaios ocorrerão a seco, em condição específica para mensuração térmica simultânea, conforme descrito no próximo item.

2.3. Temperatura

A avaliação da temperatura durante o processo de usinagem será realizada por meio do método termográfico, utilizando uma câmera infravermelha da marca FLIR, modelo SC620, para monitoramento em tempo real. Esse ensaio será conduzido a seco, sem a aplicação de fluido de corte, a fim de garantir melhor captação das imagens térmicas pela câmera, uma vez que o uso de fluido em jorro comprometeria a visibilidade da zona de corte. Conseqüentemente, os testes de medição das forças de usinagem, que serão realizados simultaneamente, também ocorrerão em condição a seco, permitindo uma análise integrada das condições térmicas e mecânicas envolvidas.

A câmera infravermelha gera registros em vídeo, possibilitando a análise de temperatura por meio de frames com alta densidade de pixels. A emissividade térmica será ajustada adequadamente na câmera, considerando os materiais envolvidos. Um script desenvolvido em Matlab será utilizado para identificar, em cada *frame*, a maior temperatura registrada na região de interesse. A média dessas temperaturas máximas ao longo de cada teste será utilizada como referência comparativa entre as condições ensaiadas.

2.4. Integridade Superficial

A rugosidade da superfície usinada será medida com um rugosímetro de contato após cada passe de usinagem. Os parâmetros analisados serão R_a (rugosidade média aritmética), R_t (rugosidade total), R_p (rugosidade máxima de pico) e R_v (rugosidade máxima do vale). As medições serão feitas em pelo menos três regiões distintas da peça usinada, sendo a média dos valores considerada representativa para cada condição testada. O equipamento utilizado para realizar as medições será o rugosímetro da Mitutoyo, modelo SJ-201.

2.5. Morfologia do Cavaco

A morfologia dos cavacos será avaliada qualitativamente por meio de imagens obtidas com o auxílio de estereomicroscópio digital. Serão analisados aspectos como forma, continuidade, coloração e presença de aderências ou trincas, os quais podem indicar instabilidade térmica ou adesiva no processo. Embora não seja o foco principal da

pesquisa, essa análise fornecerá subsídios complementares sobre a eficiência do corte e as condições de escoamento dos cavacos.

3. RESULTADOS ESPERADOS

Com base nas propriedades físico-químicas do Inconel 718 e nas características técnicas dos revestimentos selecionados, espera-se que as ferramentas de corte revestidas apresentem desempenho superior em relação às não revestidas nas condições de fresamento propostas. Os principais benefícios esperados envolvem maior vida útil da ferramenta, redução do desgaste e da temperatura na zona de corte, forças de usinagem mais estáveis e melhora na qualidade superficial da peça usinada.

Estudos recentes, como o de Zhao e Liu (2020), mostraram que ferramentas com revestimento TiAlN podem proporcionar significativa redução na transferência térmica para o substrato, o que contribui para menor degradação da aresta de corte. Resultados semelhantes foram observados por Szablewski *et al.* (2025), que demonstraram que a aplicação de revestimentos cerâmicos e metálicos influenciou diretamente a topografia da superfície usinada e o modo de desgaste da ferramenta, com menor formação de crateras e maior regularidade dimensional.

Quanto às forças de corte, espera-se que os revestimentos testados promovam redução tanto dos valores médios quanto dos picos de força, especialmente nos estágios iniciais do desgaste. De acordo com Zhang *et al.* (2023), o controle da formação de cavacos segmentados tem impacto direto na estabilidade do corte e na variação das forças, sendo que revestimentos eficientes ajudam a amenizar essas oscilações, prolongando a integridade da ferramenta.

No que se refere ao acabamento superficial, espera-se que as superfícies usinadas com ferramentas revestidas com AlCrN, TiAlN e TiSiXN apresentem maior regularidade, resultando em menor rugosidade média. Isso está em consonância com os achados de Jeyapandiarajan *et al.* (2021), que relatam redução significativa na rugosidade superficial com o uso de insertos revestidos com AlCrN (PVD) em comparação com ferramentas não revestidas, especialmente em materiais de baixa usinabilidade como o Inconel 718.

Além disso, a morfologia dos cavacos será observada como um indicativo do comportamento tribológico da interface ferramenta-peça. Conforme demonstrado por Sebbe *et al.* (2024), ferramentas revestidas com TiAlN apresentaram menor adesão de material e melhor formação de cavacos, o que colaborou para a redução da temperatura na aresta de corte e melhoria do controle dimensional.

Os dados obtidos serão avaliados por meio de técnicas estatísticas apropriadas, como a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey, para identificar a significância dos fatores de entrada (revestimento, avanço e velocidade de corte) sobre as variáveis de resposta (desgaste, força, temperatura e rugosidade). Gráficos de superfície de resposta e diagramas de Pareto serão utilizados para visualizar os efeitos principais e as interações, enquanto gráficos de tendência e dispersão possibilitarão o acompanhamento da evolução das respostas ao longo do tempo.

Dessa forma, espera-se que os resultados obtidos ao longo dos testes ofereçam subsídios técnicos para a identificação dos revestimentos mais eficientes no fresamento da superliga Inconel 718, auxiliando no desenvolvimento de soluções mais eficazes e sustentáveis para aplicações industriais de alta exigência mecânica.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo propõe uma análise experimental do desempenho de diferentes revestimentos aplicados por PVD em ferramentas de corte utilizadas no fresamento da superliga Inconel 718. A metodologia adotada contempla uma abordagem abrangente, que avalia simultaneamente o desgaste, as forças de corte, a temperatura e a rugosidade, permitindo uma compreensão aprofundada das interações térmicas e tribológicas no processo de usinagem. Os resultados esperados incluem:

- Melhora significativa na vida útil das ferramentas revestidas em comparação à ferramenta não revestida;
- Redução das forças de corte e da temperatura de usinagem nos revestimentos com melhor estabilidade térmica e menor atrito;
- Superfícies usinadas com menor rugosidade quando utilizadas ferramentas com maior integridade de aresta;
- Desempenho superior dos revestimentos, especialmente sob condições de corte intermediárias e severas;
- Identificação do melhor revestimento entre os três investigados para cada variável de resposta avaliada.

5. REFERÊNCIAS

- Akgün, M., Özlü, B., & Kara, F., 2023. Effect of PVD-TiN and CVD-Al₂O₃ coatings on cutting force, surface roughness, cutting power, and temperature in hard turning of AISI H13 steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(3), 1390–1401.
- API Standard 6A718., 2010. Nickel Base Alloy 718 (UNS N07718) for Oil and Gas Drilling and Production Equipment.
- Bushlya, V., Lenrick, F., Bjerke, A., Aboufádl, H., Thuvander, M., Stáhl, J.-E., & M'Saoubi, R., 2021. Tool wear mechanisms of PcBN in machining Inconel 718: Analysis across multiple length scale. *CIRP Annals*, 70(1), 73–78.

- De Bartolomeis, A., Newman, S. T., Jawahir, I. S., Biermann, D., & Shokrani, A., 2021. Future research directions in the machining of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 297, 117260.
- Grigoriev, S., Vereschaka, A., Milovich, F., Migranov, M., Andreev, N., Bublikov, J., Sitnikov, N., & Oganyan, G., 2021. Investigation of the tribological properties of Ti-TiN-(Ti, Al, Nb, Zr) N composite coating and its efficiency in increasing wear resistance of metal cutting tools. *Tribology International*, 164, 107236.
- Jeyapandiarajan, P., Xavier, M. A., & Anbalagan, A., 2021. Performance evaluation of (AlCrN) PVD-coated CBN inserts on machining of Inconel 718. *MM Science Journal*, 2021(November), 5219–5227.
- Krstev, S., & Knutsson, A., 2019. Occupational risk factors for prostate cancer: a meta-analysis. *Journal of Cancer Prevention*, 24(2), 91.
- Liang, X., Liu, Z., & Wang, B., 2019. State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A review. *Measurement*, 132, 150–181.
- Mahesh, K., Philip, J. T., Joshi, S. N., & Kuriachen, B., 2021. Machinability of Inconel 718: A critical review on the impact of cutting temperatures. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(7), 753–791.
- Oerlikon Balzers., 2025. BALINIT Coatings for Cutting Tools. <https://www.oerlikon.com/balzers/pt/pt/infopoint/downloads-e-documentos/#554164-1>
- Oliveira, A. R. de F., 2021. Integridade superficial de Inconel 718 fresado com ferramenta de metal duro em diferentes condições de corte.
- Piorkowski, P., Borkowski, W., & Skoczynski, W., 2024. Comprehensive evaluation method for high-performance milling of Inconel 718 Alloy. *Applied Sciences*, 14(19), 9023.
- Sebbe, N. P. V, Fernandes, F., Silva, F. J. G., Pedroso, A. F. V, Sales-Contini, R. C. M., Barbosa, M. L. S., Durão, L. M., & Magalhães, L. L., 2024. Wear behavior of TiAlVN-coated tools in milling operations of INCONEL® 718. *Coatings*, 14(3), 311.
- Singh, A., Ghosh, S., & Aravindan, S., 2022. State of art for sustainable machining of nickel-based alloys using coated and uncoated tools and machining of high strength materials using surface modified cutting tools. *Tribology International*, 170, 107517.
- Sousa, V. F. C., Silva, F. J. G., Alexandre, R., Fecheira, J. S., & Silva, F. P. N., 2021. Study of the wear behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD coated tools on milling operations of pre-hardened tool steel. *Wear*, 476, 203695.
- Szablewski, P., Legutko, S., Ungureanu, N., Petru, J., Smak, K., & Krawczyk, B., 2025. Comparative Assessment of Tool Wear and Surface Topography After Superfinish Turning of Inconel 718 with Carbide and Ceramic Inserts. *Applied Sciences*, 15(8), 4265.
- Uddin, G. M., Joyia, F. M., Ghufran, M., Khan, S. A., Raza, M. A., Faisal, M., Arafat, S. M., Zubair, S. W. H., Jawad, M., & Zafar, M. Q., 2021. Comparative performance analysis of cemented carbide, TiN, TiAlN, and PCD coated inserts in dry machining of Al 2024 alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 1461–1481.
- Wang, Q., Jin, Z., Zhao, Y., Niu, L., & Guo, J., 2021. A comparative study on tool life and wear of uncoated and coated cutting tools in turning of tungsten heavy alloys. *Wear*, 482, 203929.
- Yaqoob, S., Ghani, J. A., Jouini, N., & Juri, A. Z., 2024. Performance Evaluation of PVD and CVD Multilayer-Coated Tools in Machining High-Strength Steel. *Coatings (2079-6412)*, 14(7).
- Zhang, G., Zhang, J., Fan, G., Xu, C., & Du, J., 2023. The effect of chip formation on the cutting force and tool wear in high-speed milling Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(1), 335–348.
- Zhao, J., & Liu, Z., 2020. Influences of coating thickness on cutting temperature for dry hard turning Inconel 718 with PVD TiAlN coated carbide tools in initial tool wear stage. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1155–1165.
- Zhao, J., Liu, Z., Wang, B., Hu, J., & Wan, Y., 2021. Tool coating effects on cutting temperature during metal cutting processes: Comprehensive review and future research directions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 150, 107302.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), pelo suporte acadêmico e institucional. Agradecem também ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho. Por fim, agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio da concessão de bolsas e fomento à pesquisa, bem como às empresas parceiras envolvidas neste projeto, pelo fornecimento de materiais, ferramentas e pelo suporte técnico essencial ao desenvolvimento do estudo.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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