COMPORTAMENTO DE REVESTIMENTOS DE FERRAMENTAS DE CORTE NO FRESAMENTO DO INCONEL 718

Victor Tallis Bazon, victorbazon@ufu.br[1]
Álisson Rocha Machado, alissonr.machado@gmail.com[1,2]
Gustavo Henrique Nazareno Fernandes, ghnfernandes@gmail.com[3]

[1]Universidade Federal de Uberlândia - UFU, LEPU - Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia - MG, Brasil. 38400-902
[2]Mechanical Engineering Graduate Program, Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC-PR, Curitiba, PR, Brasil, 80215-901
[3]Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás - UFG – Campus Aparecida de Goiânia - MG, Brasil, 74971-451

Resumo. *O fresamento da superliga de níquel Inconel 718 representa um dos maiores desafios da usinagem moderna, devido às elevadas tensões mecânicas e térmicas envolvidas, que favorecem desgaste acelerado das ferramentas e comprometem a qualidade superficial. Para enfrentar essas limitações, o emprego de revestimentos em ferramentas de corte surge como estratégia fundamental, proporcionando maior resistência ao desgaste, redução do atrito e menor difusão de calor para a matriz da ferramenta. Essas melhorias possibilitam maior vida útil das ferramentas e melhor acabamento das superfícies usinadas. Neste estudo, será realizada uma investigação experimental sobre o desempenho de fresas inteiriças de metal duro da empresa Ceratizit, comparando ferramentas sem revestimento e versões recobertas com três revestimentos comerciais fornecidos pela Oerlikon Balzers: ALCRONA EVO® (AlCrN/AlCrXN), TISAFLEX® (AlTiN/TiSiXN) e LATUMA® (AlTiN). A metodologia proposta envolve um planejamento fatorial completo, permitindo a análise estatística dos resultados obtidos. As variáveis avaliadas incluirão forças de corte, temperatura no processo, desgaste e vida da ferramenta, rugosidade da superfície e morfologia dos cavacos. A pesquisa pretende demonstrar a influência dos diferentes revestimentos no comportamento mecânico, térmico e tribológico do processo, oferecendo informações relevantes para a seleção de ferramentas mais adequadas à usinagem de superligas de níquel.*

Palavras-chave*: Vida útil da ferramenta, Revestimentos, Fresamento de topo, Inconel 718*

Abstract. *The milling of the nickel-based superalloy Inconel 718 is considered one of the greatest challenges in modern machining due to the high mechanical and thermal loads involved, which accelerate tool wear and compromise surface quality. To overcome these limitations, the use of coated cutting tools emerges as a key strategy, providing greater wear resistance, reduced friction, and lower heat diffusion into the tool substrate. These improvements result in extended tool life and enhanced surface finish. In this study, an experimental investigation will be carried out to evaluate the performance of solid carbide end mills manufactured by Ceratizit, comparing uncoated tools with versions coated with three commercial coatings supplied by Oerlikon Balzers: ALCRONA EVO® (AlCrN/AlCrXN), TISAFLEX® (AlTiN/TiSiXN), and LATUMA® (AlTiN). The proposed methodology involves a full factorial design, allowing statistical analysis of the results. The evaluated variables will include cutting forces, cutting temperature, tool wear and tool life, surface roughness, and chip morphology. The research aims to demonstrate the influence of different coatings on the mechanical, thermal, and tribological behavior of the process, providing valuable insights for selecting more efficient tools suitable for machining nickel-based superalloys.*

Keywords: *Tool life, Coatings, End milling, Inconel 718*

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se observado um crescimento significativo na demanda por materiais capazes de manter elevado desempenho em ambientes extremos, especialmente nos setores aeroespacial, de petróleo e gás, geração de energia e transporte. Nesse cenário, as superligas de níquel consolidaram-se como materiais estratégicos, em razão de sua elevada resistência à oxidação, estabilidade térmica, excelente resistência mecânica e boa tenacidade em altas temperaturas (De Bartolomeis et al., 2021). Entre essas ligas, o Inconel 718 se destaca como uma das mais empregadas em aplicações críticas, sendo amplamente utilizado em discos de turbinas, componentes estruturais de motores

aeronáuticos e peças submetidas a ambientes corrosivos e a elevadas solicitações termomecânicas. Estima-se que entre 25% e 45% da produção mundial de ligas de níquel corresponda ao Inconel 718, cuja crescente demanda tem imposto novos desafios às operações de usinagem e manufatura voltadas à fabricação de componentes de alto desempenho e qualidade.(Mahesh et al., 2021; Singh et al., 2022).

O Inconel 718 é uma superliga de composição complexa, cujas propriedades físicas e químicas avançadas lhe conferem elevada resistência à deformação plástica em altas temperaturas, além de boa soldabilidade e notável resistência à corrosão intergranular. Entretanto, essas mesmas características que o tornam atrativo em aplicações severas também impõem grandes desafios à sua usinagem. Devido à baixa condutividade térmica, o calor gerado durante o corte concentra-se predominantemente na ferramenta, elevando a temperatura na zona de usinagem e acelerando os mecanismos de desgaste (Liang et al., 2019).

Além disso, a microestrutura do Inconel 718 apresenta carbonetos e fases endurecidas estáveis, que conferem caráter abrasivo ao material, acelerando o desgaste da ferramenta e exigindo maior energia e resistência ao cisalhamento. Somado a isso, as tensões mecânicas na aresta de corte podem atingir valores próximos de 450 MPa, enquanto as temperaturas na zona de usinagem podem ultrapassar 1100 °C, fatores que contribuem diretamente para a redução da vida útil das ferramentas e para o aumento dos custos de fabricação (Agmell et al., 2020; Bushlya et al., 2021).

Apesar dos avanços tecnológicos, as elevadas forças de corte na usinagem do Inconel 718, decorrentes de sua elevada dureza a quente, aceleram o desgaste das ferramentas e aumentam o atrito, o consumo de energia e a instabilidade do processo. Por isso, o monitoramento do desgaste é essencial, podendo ser realizado por métodos diretos, como a medição do desgaste de flanco, ou indiretos, por meio da análise de variáveis como forças de corte, vibração, temperatura, emissão acústica e torque. Além dessas, parâmetros como vida útil, rugosidade e consumo de energia também se destacam como indicadores de qualidade do processo e da peça final, auxiliando na definição das condições de corte mais adequadas (Pereira et al., 2022).

No fresamento, devido às entradas e saídas sucessivas da ferramenta no material, surgem variações térmicas intensas que favorecem a formação e propagação de trincas térmicas, acelerando o desgaste da aresta de corte. Entre os principais mecanismos de desgaste e falha associados à usinagem do Inconel 718 destacam-se a abrasão, adesão, difusão, oxidação e microlascamentos, além da ocorrência de arestas postiças, que deterioram a qualidade superficial da peça e elevam as forças de usinagem (De Bartolomeis et al., 2021).

Nesse cenário, o uso de revestimentos duros em ferramentas de corte configura-se como uma alternativa tecnológica eficaz para elevar a resistência ao desgaste, favorecer a dissipação de calor e diminuir o atrito na interface de usinagem. Revestimentos obtidos por técnicas de Deposição Física de Vapor (PVD) ou Deposição Química de Vapor (CVD) têm demonstrado bons resultados, graças à sua elevada dureza, forte aderência ao substrato, resistência à oxidação e estabilidade em altas temperaturas. Ao criar uma camada de proteção entre a ferramenta e o material usinado, esses revestimentos contribuem para mitigar mecanismos de desgaste como difusão, adesão e abrasão (Zhao et al., 2021).

Nesse processo, o substrato de metal duro recebe uma ou mais camadas de materiais com propriedades aprimoradas em aspectos específicos. Assim, torna-se possível reunir em uma única ferramenta de corte características que dificilmente seriam alcançadas de forma isolada, como elevada dureza, boa tenacidade e resistência química. Outro benefício relevante do uso de ferramentas revestidas está ligado ao aumento da produtividade, uma vez que o revestimento permite operar em maiores velocidades de corte, ampliando o volume de material removido durante a usinagem (Diniz et al., 2014; Xavier, 2003).

O revestimento de ferramentas de metal duro vem ganhando destaque crescente, uma vez que garante desempenho muito superior em relação às ferramentas não revestidas. Estima-se que atualmente mais de 95% do metal duro empregado na indústria receba algum tipo de revestimento, percentual que tende a crescer continuamente. Além disso, esses revestimentos podem ser aplicados a substratos de diferentes classes de metal duro, ampliando de forma significativa o leque de aplicações possíveis (Machado et al., 2015).

Pesquisas recentes têm demonstrado a eficácia de diferentes sistemas de revestimento na usinagem de materiais de difícil usinabilidade, entre eles o Inconel 718. Sousa et al., (2021) verificaram que o uso de revestimentos TiAlN e TiAlSiN em ferramentas de corte resultou em maior resistência ao desgaste e em melhor qualidade superficial ao usinar aços-ferramenta. De acordo com Wang et al., (2021), ferramentas com revestimento TiAlN apresentaram desempenho superior na usinagem de ligas de elevada densidade, proporcionando redução das forças de corte e maior estabilidade dimensional. Já Kim et al., (2021) verificaram que o revestimento AlCrN em brocas PVD melhorou a qualidade da usinagem em compósitos de polímero reforçado com fibra de carbono e liga de titânio, reduzindo desgaste, forças de corte e defeitos geométricos.

Os revestimentos têm recebido destaque por sua capacidade de operar em altas temperaturas, garantindo resistência ao desgaste e propriedades tribológicas favoráveis. Grigoriev et al., (2021) avaliaram ferramentas com diferentes tipos de revestimento em torneamento e constataram que estes contribuem para a dissipação de calor e a proteção da aresta de corte. Já Akgün et al., (2023) verificaram que ferramentas com TiN–PVD e Al_2O_3–CVD apresentaram diferenças significativas de desempenho, sendo que o revestimento PVD resultou em menores forças de corte e temperaturas mais baixas na zona de contato. Entretanto, o desempenho efetivo de uma ferramenta revestida está condicionado a múltiplos fatores interdependentes, como geometria da ferramenta, parâmetros de corte, estratégia de refrigeração e propriedades específicas do revestimento. Nesse contexto, Yaqoob et al., (2024) destacaram que a escolha do revestimento influencia diretamente a vida útil da ferramenta e a rugosidade da superfície obtida em fresamento de alto desempenho.

Adicionalmente, deve-se destacar que, mesmo com o emprego de revestimentos, a usinagem do Inconel 718 ainda apresenta sérias limitações, especialmente no que se refere ao controle térmico e à estabilidade do processo. Dessa forma, torna-se indispensável a avaliação experimental do desempenho de diferentes sistemas de ferramentas revestidas em condições próximas às reais de operação, de modo a identificar alternativas técnica e economicamente mais viáveis para a indústria.

Com base nesse cenário, este estudo propõe uma investigação comparativa do desempenho de fresas inteiriças de metal duro, fabricadas pela empresa Ceratizit, recobertas com diferentes revestimentos comerciais fornecidos pela Oerlikon Balzers — ALCRONA EVO® (AlCrN), TISAFLEX® (AlTiN/TiSiXN) e LATUMA® (AlTiN) —, além de uma ferramenta não revestida utilizada como referência. A análise será conduzida considerando variáveis-chave de desempenho, tais como desgaste da ferramenta, forças de usinagem, temperatura de corte, rugosidade da superfície e morfologia dos cavacos.

Os resultados esperados têm como finalidade ampliar o entendimento sobre a influência dos revestimentos no comportamento mecânico, tribológico e térmico das ferramentas durante a usinagem, fornecendo subsídios técnicos para a otimização do processo e para a escolha de soluções mais eficientes e sustentáveis.

2. METODOLOGIA

O trabalho será desenvolvido no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), com foco na avaliação do desempenho de ferramentas de corte revestidas no fresamento de topo da superliga Inconel 718. As ferramentas utilizadas serão fresas inteiriças de metal duro, nas versões sem revestimento e com revestimentos comerciais aplicados por PVD. Serão investigados três sistemas de revestimento: ALCRONA EVO® (AlCrN), TISAFLEX® (AlTiN/TiSiXN) e LATUMA® (AlTiN), além da condição não revestida, adotada como referência. A Figura 1 apresenta o conjunto de ferramentas selecionadas para a pesquisa, destacando suas principais variações de revestimento consideradas na análise comparativa e a Tabela 1 apresenta as principais propriedades desses revestimentos, evidenciando suas vantagens em aplicações que exigem alta resistência ao desgaste e estabilidade em temperaturas elevadas.

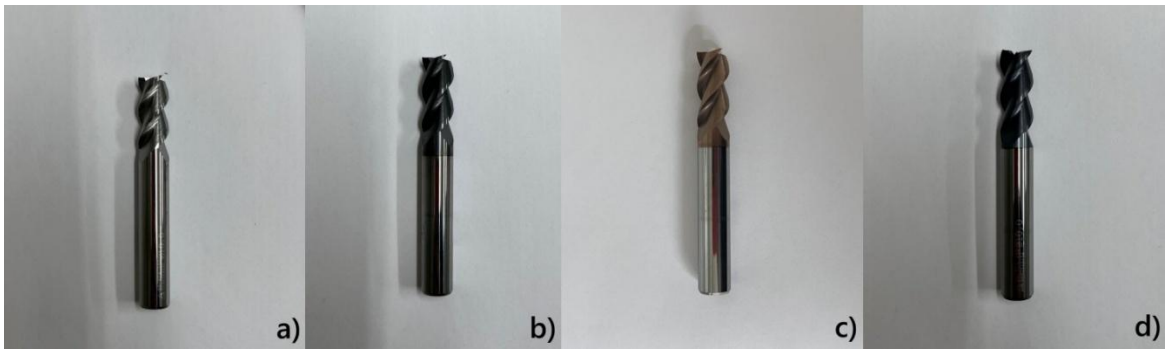


Figura 1 - Fresas com os diferentes revestimentos: a) Sem revestimento; b) AlCrN; c) AlTiN/TiSiXN; d) AlTiN

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®

A estratégia de usinagem selecionada consiste no fresamento de topo predominantemente frontal (condição em que a largura de corte a_e é superior à profundidade de corte a_p), realizada por meio de passes alternados sobre a superfície do bloco de Inconel 718. Nessa trajetória bidirecional, a ferramenta avança em sentidos opostos de forma sucessiva, de modo que o processo ocorre alternadamente em regime concordante e discordante, dependendo da relação entre o avanço e a rotação da fresa.

O material a ser usinado consiste em um bloco de Inconel 718, ilustrado na Figura 2, com dimensões de 252 mm × 218 mm × 98 mm. Esse bloco foi fornecido pela empresa Villares Metals S.A., encontra-se atualmente disponível no LEPU e já foi empregado em projetos anteriores. Antes da realização dos ensaios, a peça passará por preparação adequada, envolvendo operações de desbaste e a divisão das regiões destinadas à usinagem. A composição química típica do Inconel

718, conforme especificação API (UNS N07718), é apresentada na Tabela 2, enquanto suas principais propriedades mecânicas estão listadas na Tabela 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 55,00	17,00 21,00	Bal.	4,75 5,50	2,80 3,30	0,65 1,15	0,20 0,80	1,00 máx
Elemento	**C**	**Mn**	**Si**	**P**	**S**	**B**	**Cu**	**Pb**
% Peso	0,08 máx	0,35 máx	0,35 máx	0,015 máx	0,015 máx	0,006 máx	0,30 máx	0,001 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, mostrado na Figura 3, que possui potência de acionamento do eixo-árvore de 9 kW e rotação com variação contínua de 10 a 10 000 rpm, localizado no mesmo laboratório. O fluido de corte empregado será o Blaser Swisslube Vasco 7000, adequado para ligas de níquel e outros materiais de difícil usinabilidade.

Este fluido será utilizado apenas no ensaio de vida da ferramenta, enquanto nos ensaios de forças, temperatura e rugosidade não será aplicado. A razão é que a medição de temperatura será feita por meio de câmera térmica, cuja visibilidade da zona de corte pode ser comprometida pela presença do fluido. Dessa forma, para cada conjunto de variáveis medido simultaneamente (força, temperatura, rugosidade), o uso do fluido seria um fator de interferência, por isso será eliminado nesses casos específicos.

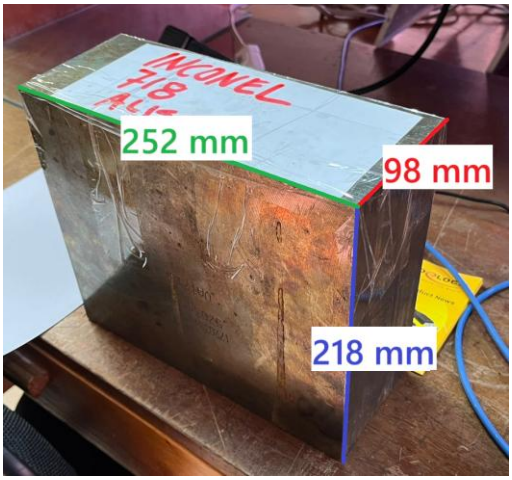


Figura 2: Bloco de Inconel 718



Figura 3: centro de usinagem ROMI Bridgeport Discovery 760

2.1. Vida da Ferramenta

Os ensaios de vida da ferramenta serão realizados com aplicação de fluido de corte em jorro (Vasco 7000, da Blaser, na concentração de 8%), de modo a reproduzir condições industriais mais adequadas para a usinagem do Inconel 718. Em intervalos de tempo previamente estabelecidos, as ferramentas serão inspecionadas por meio de microscopia óptica para acompanhamento do desgaste. O fim de vida será definido quando o desgaste de flanco atingir $VB_{Bmáx}$ = 0,6 mm, em conformidade com a norma ISO 8688.

Para a definição das condições experimentais, será adotado um planejamento fatorial completo do tipo 2^3. As variáveis quantitativas consideradas serão a velocidade de corte (V_c) e o avanço por dente (f_z), cada uma em dois níveis (+ e −), com valores estabelecidos a partir das recomendações do fabricante da ferramenta. A terceira variável corresponde ao revestimento, caracterizada como qualitativa, com quatro níveis de análise: R0 (sem revestimento), R1, R2 e R3. Assim, o fatorial 2^3 será repetido para contemplar todas as condições. As profundidades de corte axial (a_p) e radial (a_e) permanecerão constantes ao longo dos testes. A Tabela 4 apresenta a estrutura do planejamento experimental, em que os sinais (+) e (−) indicam, respectivamente, os níveis superior e inferior de cada 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 possibilitará avaliar tanto os efeitos principais quanto as interações entre os fatores escolhidos sobre a vida útil das ferramentas. As combinações de parâmetros serão aplicadas em cada condição de ferramenta (com e sem revestimento), resultando em 16 ensaios. Para garantir robustez estatística, cada condição será repetida três vezes (ensaio original, réplica e tréplica), totalizando 48 experimentos. Em intervalos de tempo previamente definidos, as ferramentas serão retiradas da máquina para inspeção visual e medição do desgaste em estereomicroscópio de alta resolução, encerrando-se o ensaio quando o desgaste exceder o limite estabelecido pela norma.

A estrutura fatorial adotada, aliada às repetições, fornecerá base consistente para análises comparativas entre as diferentes ferramentas. Para isso, serão empregados métodos estatísticos como análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey, de modo a identificar as condições de corte mais favoráveis para os revestimentos avaliados.

Além disso, após a conclusão dos testes, algumas ferramentas representativas (uma de cada condição avaliada) serão submetidas a análises em microscópio eletrônico de varredura (MEV, Hitachi TM3000). Com o apoio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS, Oxford Instruments INCAx-act), será possível investigar em detalhe os mecanismos de desgaste predominantes em cada situação.

2.2. Forças de Corte

A medição das forças de corte no fresamento do Inconel 718 será realizada por meio de um dinamômetro rotativo Kistler, modelo 9123C, conectado a um amplificador de sinais da mesma marca, ambos disponíveis no laboratório. Durante os ensaios, o sistema registrará em tempo real as componentes das forças atuantes no processo. A frequência de aquisição e o tempo de coleta de dados serão definidos previamente, de forma a permitir a análise da influência dos parâmetros de corte, do tipo de revestimento e das condições de usinagem. Essas informações serão fundamentais para avaliar o desempenho dos revestimentos, identificando possíveis variações no esforço de corte.

O planejamento experimental será baseado no método de variação de um único fator por vez (*one variable at a time*), em que as variáveis de entrada, velocidade de corte (V_c) e avanço por dente (f_z), serão ajustadas individualmente, mantendo-se a outra constante. A interpretação dos resultados será apoiada na construção 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

O monitoramento da temperatura no processo de usinagem será realizado por meio de termografia infravermelha, utilizando uma câmera FLIR, modelo SC620, para registro em tempo real. Os ensaios serão conduzidos a seco, sem aplicação de fluido de corte, de modo a assegurar a visibilidade da região de corte, já que o uso de fluido em jorro prejudicaria a captura das imagens térmicas. Dessa forma, os testes de medição das forças de usinagem, realizados em paralelo, também ocorrerão em condição a seco, viabilizando uma análise integrada dos aspectos térmicos e mecânicos do processo.

A câmera infravermelha gera vídeos com elevada resolução espacial, a partir dos quais será possível extrair frames para análise detalhada. A emissividade será configurada de acordo com os materiais presentes, garantindo a confiabilidade das medições. Para o processamento dos dados, será utilizado um script desenvolvido em Matlab, capaz de identificar, em cada frame, o valor máximo de temperatura na região de interesse. A média desses valores máximos ao longo de cada ensaio servirá como parâmetro de comparação entre as condições avaliadas.

2.4. Integridade Superficial

A avaliação da rugosidade das superfícies usinadas será realizada por meio de um rugosímetro de contato, após cada passe de usinagem. Serão determinados os parâmetros Ra (rugosidade média aritmética), Rt (rugosidade total), Rp (altura máxima de pico) e Rv (profundidade máxima de vale). Para cada condição, as medições serão efetuadas em no mínimo três regiões distintas da peça, adotando-se a média dos resultados como valor representativo. O equipamento utilizado será um rugosímetro Mitutoyo, modelo SJ-201.

2.5. Morfologia do Cavaco

A caracterização da morfologia dos cavacos será realizada qualitativamente, por meio de imagens obtidas em estereomicroscópio digital. Serão observados parâmetros como formato, continuidade, coloração e ocorrência de aderências ou trincas, que podem evidenciar instabilidades térmicas ou de adesão durante o processo de usinagem. Apesar de não constituir o objetivo central do estudo, essa análise contribuirá com informações adicionais sobre a eficiência do corte e o comportamento do escoamento dos cavacos.

3. RESULTADOS ESPERADOS

Considerando as propriedades físico-químicas do Inconel 718 e as especificidades técnicas dos revestimentos escolhidos, espera-se que as ferramentas revestidas apresentem desempenho superior às não revestidas nas condições de fresamento avaliadas. Entre os benefícios esperados estão o aumento da vida útil da ferramenta, a redução dos mecanismos de desgaste e da temperatura na zona de corte, maior estabilidade das forças de usinagem e a melhoria da qualidade superficial das peças produzidas.

Pesquisas recentes, como a de Zhao e Liu, (2020), evidenciam que o uso de revestimentos TiAlN em ferramentas de corte pode reduzir de forma expressiva a transferência de calor para o substrato, favorecendo a preservação da aresta de corte. De maneira semelhante, Szablewski et al., (2025) verificaram que a aplicação de revestimentos cerâmicos e metálicos exerce influência direta tanto na topografia da superfície usinada quanto no mecanismo de desgaste da ferramenta, resultando em menor ocorrência de crateras e em maior uniformidade dimensional.

No que se refere às forças de usinagem, prevê-se que os revestimentos avaliados contribuam para a diminuição tanto dos valores médios quanto dos picos registrados, sobretudo nas fases iniciais do desgaste da ferramenta. Zhang et al., (2023) destacam que o controle da segmentação dos cavacos influencia diretamente a estabilidade do processo e a flutuação das forças de corte, de modo que revestimentos mais eficazes podem reduzir essas variações e, consequentemente, preservar a integridade da aresta por mais tempo.

Em relação ao acabamento da peça, projeta-se que o uso de ferramentas revestidas com AlCrN, TiAlN e TiSiXN proporcione superfícies mais uniformes, com valores inferiores de rugosidade média. Esse comportamento corrobora os resultados de Jeyapandiarajan et al., (2021), que observaram redução expressiva da rugosidade ao empregar insertos com revestimento AlCrN (via PVD), em comparação às ferramentas sem revestimento, sobretudo na usinagem de ligas de difícil corte como o Inconel 718.

Adicionalmente, a análise da morfologia dos cavacos será utilizada como parâmetro para compreender o comportamento tribológico na interface ferramenta–peça. De acordo com Sebbe et al., (2024), o emprego de revestimentos TiAlN resultou em menor aderência de material à ferramenta e em uma formação de cavacos mais estável, contribuindo tanto para a diminuição da temperatura na aresta de corte quanto para o aprimoramento do controle dimensional.

Os resultados experimentais serão tratados por meio de métodos estatísticos adequados, incluindo a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey, a fim de verificar a relevância dos fatores de entrada (revestimento, avanço e velocidade de corte) sobre as variáveis de saída, como desgaste, forças, temperatura e rugosidade. Para melhor interpretação, serão empregados gráficos de superfície de resposta e diagramas de Pareto, que permitem visualizar os efeitos principais e suas interações, além de gráficos de tendência e dispersão para acompanhar a evolução das respostas ao longo do tempo.

Com esse tratamento, espera-se que os testes forneçam informações relevantes para a seleção dos revestimentos mais adequados ao fresamento do Inconel 718, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas mais eficazes e sustentáveis voltadas a aplicações industriais de elevada demanda mecânica.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma investigação experimental sobre o desempenho de diferentes revestimentos aplicados por PVD em ferramentas de corte utilizadas no fresamento da superliga Inconel 718. A metodologia proposta envolve uma abordagem integrada, contemplando a análise de desgaste, forças de usinagem, temperatura e rugosidade, de modo a proporcionar uma visão abrangente das interações térmicas e tribológicas que ocorrem durante o processo. Entre os resultados esperados destacam-se:

- Aumento expressivo da vida útil das ferramentas revestidas em relação à condição sem revestimento;
- Redução das forças de usinagem e da temperatura na zona de corte, sobretudo para revestimentos com maior estabilidade térmica e menor coeficiente de atrito;
- Produção de superfícies com menor rugosidade quando utilizadas ferramentas que mantêm melhor integridade de aresta;
- Melhor desempenho dos revestimentos sob condições intermediárias e severas de corte;
- Determinação do revestimento mais eficiente entre os três avaliados, considerando cada variável de resposta.

5. REFERÊNCIAS

Agmell, M., Bushlya, V., M'Saoubi, R., Gutnichenko, O., Zaporozhets, O., Laakso, S. V. A., & Ståhl, J.-E. 2020. Investigation of mechanical and thermal loads in pcBN tooling during machining of Inconel 718. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107(3), 1451–1462.

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 Standart 6A718. 2010. Nickel Base Alloy 718 (UNS N07718) for Oil and Gas Drilling and Production Equipament.

Bushlya, V., Lenrick, F., Bjerke, A., Aboulfadl, H., Thuvander, M., Ståhl, 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.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., & Coppini, N. L. 2014. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. Artliber.

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., Xavior, 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.

Kim, D., Swan, S. R., He, B., Khominich, V., Bell, E., Lee, S.-W., & Kim, T.-G. 2021. A study on the machinability of advanced arc PVD AlCrN-coated tungsten carbide tools in drilling of CFRP/titanium alloy stacks. Carbon Letters, 31(3), 497–507.

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.
Machado, Á. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., & da Silva, M. B. 2015. Teoria da Usinagem dos Materiais. Editora Blucher.
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.
Pereira Guimaraes, B. M., da Silva Fernandes, C. M., Amaral de Figueiredo, D., Correia Pereira da Silva, F. S., & Macedo Miranda, M. G. 2022. Cutting temperature measurement and prediction in machining processes: comprehensive review and future perspectives. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 120(5), 2849–2878.
Sebbe, N. P. V, Albuquerque, J., Sousa, V. F. C., Fernandes, F., Silva, F. J. G., Sales-Contini, R. C. M., Pedroso, A. F. V, & Martinho, R. 2024. Investigations on Tool Wear Behavior of TiAlVN and TiAlN/TiAlVN Coated Tools in the Milling Inconel 718. Journal of Tribology, 146(12), 121402.
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.
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.
Xavier, F. A. 2003. Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN.
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.