

GILBERTO JOÃO PAVANI  
(ORGANIZADOR)

---

*Collection:*

# APPLIED MATERIALS ENGINEERING

---

Atena  
Editora  
Ano 2022

GILBERTO JOÃO PAVANI  
(ORGANIZADOR)

---

*Collection:*

# APPLIED MATERIALS ENGINEERING

---

Atena  
Editora  
Ano 2022

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial**

**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Bruno Oliveira  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizador:** Gilberto João Pavani

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

C697 Collection: applied materials engineering / Organizador  
Gilberto João Pavani. – Ponta Grossa - PR: Atena,  
2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-861-5

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.615222801>

1. Materials engineering. I. Pavani, Gilberto João  
(Organizador). II. Título.

CDD 669

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br



## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

A engenharia dos materiais é o ramo da engenharia que trata dos materiais como metais, cerâmicas, polímeros e compósitos, reunindo estudos científicos e aplicações práticas para a obtenção de novos materiais que são fundamentais para o desenvolvimento da sociedade, pois propiciam maior segurança e a qualidade de vida no uso cotidiano de veículos, máquinas e estruturas como edifícios, pontes e viadutos.

Porém, não basta criar um novo material, há necessidade de compreender suas propriedades como dureza, resistência ao calor e à corrosão que permitem sua aplicação em diversas áreas da indústria, bem como seu processo de produção.

A presente obra “Collection: Applied materials engineering” tem como objetivo a apresentação e a discussão de temas relevantes sobre a aplicação da engenharia de materiais em polímeros descartáveis, manufatura aditiva com aços de baixo carbono de baixa liga, caracterização de filmes de titânio, determinação de coeficientes de fricção em materiais médicos, desfosforação do ferro-gusa, inibidores de corrosão em materiais metálicos, inibidores poliméricos de hidratos de gás, microgeis de acrilamida e amido enxertado como doadores de óxido nítrico e a usinabilidade de ligas refratárias.

Portanto, esta obra apresenta grande potencial para contribuir com o entendimento dos temas apresentados, podendo servir como referência valiosa para novas pesquisas e estudos sobre as questões aqui discutidas.

Agradeço aos autores dos capítulos por suas valiosas contribuições e desejo aos leitores sucesso em seus futuros trabalhos de pesquisa sobre os temas apresentados nesta obra.

Gilberto João Pavani

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

**AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS DO TIPO DE TPE E DO TEOR DE COMPATIBILIZANTE NA PROCESSABILIDADE DE BLENDS DE PLA/TPES EM MISTURADOR DE CÂMARA INTERNA**

Giordano Pierozan Bernardes  
Nathália da Rosa Luiz  
Ruth Marlene Campomanes Santana  
Maria Madalena de Camargo Forte

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6152228011>

### **CAPÍTULO 2..... 14**

**EVALUATION OF HIGH STRENGTH LOW ALLOY CARBON STEEL PRODUCED WITH WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY AND ITS POSSIBLE APPLICATION IN THE OIL AND GAS SECTOR**

Alexis Van Wesemael  
Luciana Iglésias Lourenço Lima  
Ronaldo de Faria Antunes  
Bertrand Maillon  
Xavier Gostiaux  
Laurent Faivre

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6152228012>

### **CAPÍTULO 3..... 27**

**CARACTERIZAÇÃO FOTOCRÔMICA E FOTOCATALÍTICA DE FILMES DE TiO<sub>2</sub> OU DE TiO<sub>2</sub> MISTURADOS A DOIS DIFERENTES PRECURSORES DE TUNGSTÊNIO**

Luana Góes Soares da Silva  
Annelise Kopp Alves

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6152228013>

### **CAPÍTULO 4..... 45**

**DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE FRICCIÓN EN MEDIAS MEDICAS DE COMPRESIÓN**

Elvira Cruz Osorio  
Mónica Cristina Cortés Martínez  
Martínez Estela Flores Gómez  
José Alberto Cortés Martínez  
Laura Patricia Sandoval Florín  
Claudia Hernández Hernández  
Rocío Garrido Adame  
Teresa Ramírez Rodríguez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6152228014>

### **CAPÍTULO 5..... 54**

**ESTUDO DA INFLUENCIA DA MASSA DE ESCÓRIA E DO BANHO NA DESFOSFORAÇÃO**

## DE FERRO GUSA ATRAVÉS DE TERMODINMICA COMPUTACIONAL

Anna Paula Littig Berger  
Daniela Bahiense de Oliveira  
Cynara Christ Klippel  
Camila Santos Scopel  
Felipe Faridn Grillo  
José Roberto de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6152228015>

## **CAPÍTULO 6..... 67**

### INIBIDORES DE CORROSÃO DA LINHA VERDE: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Daniel Víctor Carlos de Noronha  
Jardel Dantas da Cunha  
Andréa Francisca Fernandes Barbosa  
Antônio Robson Gurgel  
Regina Celia de Oliveira Brasil Delgado

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6152228016>

## **CAPÍTULO 7..... 85**

### METODOLOGIA DE TRIAGEM RÁPIDA PARA AVALIAÇÃO DE POTENCIAIS INIBIDORES POLIMÉRICOS DE HIDRATOS DE GÁS

Kelly Cristine da Silveira  
Elizabeth Fernandes Lucas  
Colin D. Wood

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6152228017>

## **CAPÍTULO 8..... 94**

### MICROGEIS DE ACRILAMIDA E AMIDO ENXERTADO COM DOADORE DE NO

Regiane da Silva Gonzalez  
Lucas Toshitaka Yatsugafu Longo  
Mylene Ardenghi de Lima  
Amanda Ardenghi dos Santos  
Giovanna Conrado Quadros  
Thais Oliveira da Silva  
Thais Tiemi Tomiyama  
Lucas Umberto Desante Lopes  
Ana Paula Peron  
Aldo Eloizo Job

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6152228018>

## **CAPÍTULO 9..... 105**

### PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS PARA A BAIXA USINABILIDADE DO INCONEL 718 COM FOCO NO PROCESSO DE FRESAMENTO

Luís Fillipe Lopes Torres  
Gabriel de Paiva Silva  
Geovanna Diniz Mendonça  
Déborah de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6152228019>

<b>SOBRE O ORGANIZADOR.....</b>	<b>116</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>117</b>

## PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS PARA A BAIXA USINABILIDADE DO INCONEL 718 COM FOCO NO PROCESSO DE FRESAMENTO

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 11/10/2021

### Luís Fillipe Lopes Torres

Universidade de Brasília  
Brasília – DF

<http://lattes.cnpq.br/4550131607042372>

### Gabriel de Paiva Silva

Universidade de Brasília  
Brasília – DF

<http://lattes.cnpq.br/9192867487929391>

### Geovanna Diniz Mendonça

Universidade de Brasília  
Brasília – DF

### Déborah de Oliveira

Universidade de Brasília  
Brasília – DF

<http://lattes.cnpq.br/7264334163120189>

**RESUMO:** O Inconel 718 é um material amplamente usado devido às suas ótimas propriedades mecânicas. Porém, essas propriedades dificultam seu fresamento, elevando as forças de corte, vibrações e desgaste da ferramenta. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar as técnicas, parâmetros e ferramentas utilizadas para favorecer esse processo. A partir dos estudos analisados, foi possível observar tendências como: ferramentas de cerâmica, resfriamento criogênico e tratamento térmico das ferramentas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Inconel 718; Fresamento;

Ferramentas de cerâmica; Resfriamento criogênico; Tratamento térmico.

### MAIN FEATURES FOR THE LOW MACHINING OF THE INCONEL 718 WITH FOCUS ON THE MILLING PROCESS

**ABSTRACT:** Inconel 718 is widely used material due to its excellent mechanical properties. However, these properties hinder its milling, causing intense cutting forces, vibration and tool wear. Thus, the objective of this work is to present techniques, parameters and tools used to enhance this process. From the studies carried out, it was possible to notice tendencies such as: ceramic tools, cryogenic cooling and heat treatment of the tools.

**KEYWORDS:** Inconel 718; Milling; Ceramic tools; Cryogenic cooling; Heat treatment.

## 1 | INTRODUÇÃO

As ligas termo resistentes e superligas são oriundas de desenvolvimento metalúrgicos em ligas já existentes, na maioria das vezes, com o objetivo de se obter melhores propriedades mecânicas. Essas ligas possuem elevados valores de resistência mecânica, usualmente maiores do que a maioria das ligas, e que se mantêm mesmo em altas temperaturas. Como características comuns dessas ligas, pode-se citar a baixa condutividade térmica, elementos altamente reativos e grande porcentagem de carbonetos dispersos na microestrutura, conforme pode ser observado na Figura 1

(Machado et al., 2009).

Por isso, as ligas refratárias, com destaque para as ligas de níquel, em condições econômicas de corte, possuem baixa usinabilidade quando comparadas à maioria das ligas metálicas. Essa situação pode ser agravada com a adição de cromo, usualmente utilizado para aumentar a resistência à corrosão, como no caso do Inconel 718 (Machado et al., 2009).

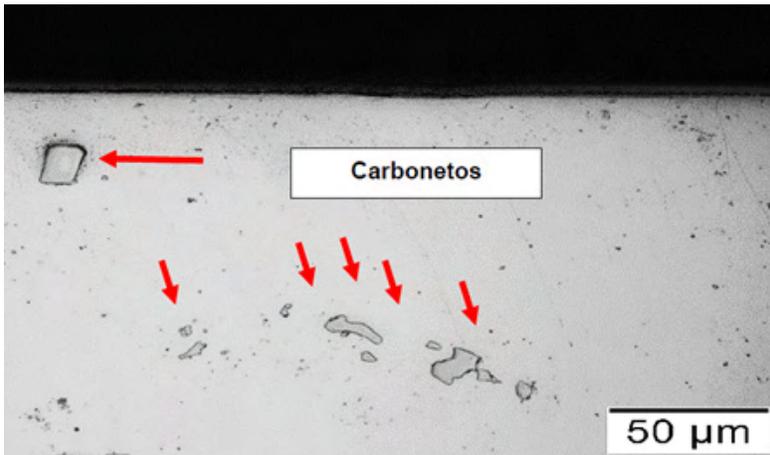


Figura 1. Carbonetos presentes na microestrutura do Inconel 718 (De Oliveira, 2017).

Pelo fato de possuir elevada resistência mecânica, elevada resistência à corrosão, boa resistência à fluência e à fadiga e capacidade de operar em altas temperaturas, o Inconel 718 é muito usado em diferentes indústrias (Sugahara et al., 2009). De acordo com Ezugwu et al. (1999), as ligas à base de níquel como o Inconel 718 são bastantes empregadas em aeronaves, veículos espaciais, motores de foguete e de turbina a gás, reatores nucleares, usinas a vapor, submarinos, entre outros, devido à capacidade de manter suas propriedades mecânicas em elevadas temperaturas.

Considerando as aplicações mencionadas e os ambientes em que peças de Inconel 718 operam, muitas vezes sujeitas a corrosão e/ou elevados esforços mecânicos, é necessário que o resultado da usinagem gere uma peça de elevada qualidade, minimizando defeitos que poderiam levar a falhas. Assim, pode-se sumarizar essas características desejáveis para as peças de Inconel 718 como sendo peças de elevada qualidade superficial.

Segundo Machado et al. (2009), os processos de usinagem convencional envolvem deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e reações químicas, que interferem de diferentes formas na superfície usinada. Isso faz com que o termo “integridade superficial” seja usado para descrever a qualidade da superfície em serviço e das camadas subsequentes.

No entanto, conforme mencionado, a obtenção de uma boa qualidade superficial em peças de Inconel 718, não é trivial. Ezugwu et al. (1999) sumariza as principais características que fazem com que as ligas de níquel tenham baixa usinabilidade:

- i. Sua resistência se mantém durante a usinagem, devido à sua alta resistência mecânica, mesmo em altas temperaturas;
- ii. O encruamento ocorre rapidamente durante a usinagem, o que contribui para o desgaste da ferramenta;
- iii. As ferramentas são sujeitas a altas taxas de desgaste abrasivo, devido aos carbonetos presentes na microestrutura da liga;
- iv. Reações químicas ocorrem devido às altas temperaturas de corte, principalmente quando são utilizadas ferramentas convencionais, o que leva a uma elevada difusão e aumenta a taxa de desgaste;
- v. A adesão das ligas de níquel nas ferramentas de corte é frequente, causando desgaste de entalhe e lascamentos, quando o material se destaca da ferramenta;
- vi. O cavaco gerado é rígido e contínuo, seu controle é complexo, e pode levar a altos desgastes de cratera;
- vii. A baixa condutividade térmica das ligas de níquel gera altas temperaturas na ponta da ferramenta, o que conseqüentemente gera grandes gradientes de temperatura na ferramenta de corte.

Considerando a geometria diversa das peças de Inconel 718 utilizadas industrialmente, serão apresentados resultados específicos do processo de fresamento, por ser um processo que permite a obtenção de diferentes geometrias. Dentre as diversas características dos processos de usinagem, de acordo com Diniz et al. (2000), são características que diferenciam o fresamento:

- i. A ferramenta de corte, chamada fresa, possui arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo.
- ii. A rotação da fresa ao redor do seu eixo proporciona o movimento de corte.

Ainda segundo Diniz et al. (2000), o fresamento pode ser classificado de acordo com a disposição dos dentes ativos da fresa em dois tipos. O primeiro é chamado de fresamento tangencial, que é uma operação na qual os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta, ou seja, o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada. Já a segunda forma é chamada de fresamento frontal, uma operação na qual os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta, ou seja, o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada.

Assim, pode-se ressaltar que o fresamento é um dos processos de usinagem mais utilizados, devido às suas diferentes formas de operação, que dão a ele a capacidade de usinar diferentes materiais, a enorme variedade de formas que podem ser produzidas, o bom acabamento superficial, a alta taxa de remoção de cavaco e a grande disponibilidade

e variedade de ferramentas.

Desta forma, este artigo tem como objetivo apresentar os principais fatores que dificultam o fresamento do Inconel 718 e as atuais técnicas e ferramentas que estão sendo empregadas para aprimorar esse processo.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando o objetivo de estudar a usinabilidade do Inconel 718, um estudo teórico foi realizado de acordo com a metodologia de Flynn et al. (1990). Para isso foram pesquisados livros e artigos em bases de dados nacionais e internacionais, com termos específicos para busca, Inconel 718, In718, fresamento, milling, usinagem, machining, usinabilidade, machinability, superligas e superalloys. Após o levantamento, foram selecionados os trabalhos representativos e que possuíam tendências e inovações para o fresamento do Inconel 718.

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A usinabilidade descreve o quão fácil um material pode ser cortado na forma desejada e pode ser medida através dos seguintes parâmetros: vida útil da ferramenta, taxa de remoção de metal, forças de usinagem, consumo de energia, integridade superficial e forma dos cavacos. Além disso, a usinabilidade pode ser significativamente afetada pelas propriedades do material usinado, propriedades e geometria da ferramenta de corte, condições de corte utilizadas e diversos outros fatores (Ezugwu, 2005).

Entre as propriedades do material usinado que afetam a usinabilidade está a condutividade térmica. A baixa capacidade de conduzir o calor pelo material usinado faz com que o calor seja concentrado na superfície da peça e na ferramenta de corte, gerando problemas como a adesão da liga na ferramenta, conforme ilustrado na Figura 2, reações químicas entre os materiais e queima superficial da peça (Favero Filho, 2018).

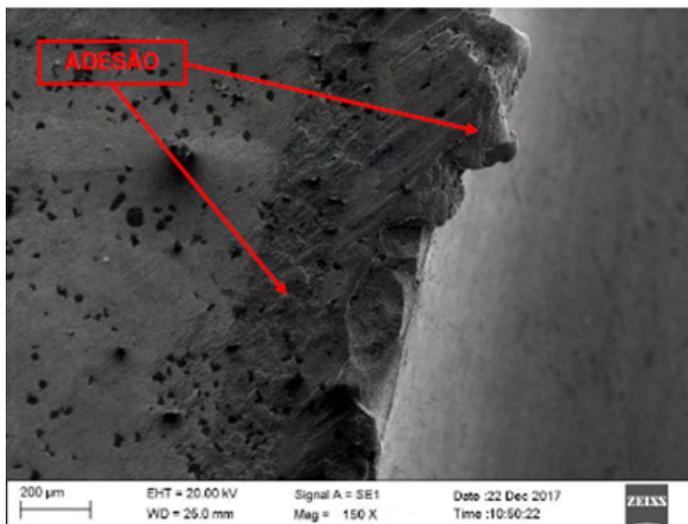


Figura 2. Adesão do Inconel 718 e desgaste da fresa (Favero Filho, 2018).

O Inconel 718 apresenta uma baixa condutividade térmica se comparado com outros metais, sendo um dos fatores responsáveis pela sua baixa usinabilidade. A Tabela 1 contém valores de condutividade térmica para diferentes materiais presentes na indústria metal mecânica, onde é possível notar a baixa condutividade térmica do Inconel.

Material	Condutividade térmica (W/m.K)
Inconel 718	12,6
Aço inoxidável AISI 304	16,2
Aço SAE 1045	51,9
Alumínio 7075-T651	146,4

Tabela 1. Condutividade térmica do Inconel 718 e outros metais. Adaptado de Bozhong (2021), GGD (2021), Norton (2011), Shigley et al. (2005).

A Figura 3 contém um gráfico comparativo entre a dureza medida de forma macro, a microdureza medida na matriz e a microdureza medida sobre um precipitado em uma amostra de Inconel 718. Através da Figura 3, é possível notar a grande variação de dureza entre a matriz e os precipitados, o que em alguns casos pode contribuir para quebra da ferramenta.

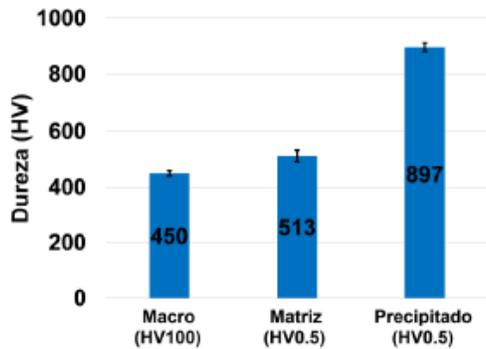


Figura 3. Resultados dos ensaios de dureza do Inconel 718 (Favaro Filho, 2018).

Com isso, é possível perceber que a usinagem do Inconel 718 possui diversos desafios. Conforme comentado, a baixa condutividade térmica, a alta dureza, a presença de carbonetos e a adesão de material são alguns dos fatores que contribuem para a baixa usinabilidade do Inconel 718 quando comparado com outros metais. Neste sentido, Ezugwu (2005) compara a usinabilidade de diferentes materiais, conforme pode ser observado na Figura 4, onde pode-se observar que a usinabilidade do Inconel 718 é aproximadamente 8 vezes menor que a do Alumínio.

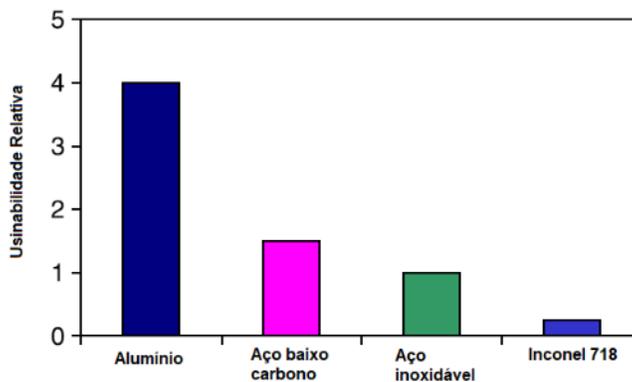


Figura 4. Usinabilidade relativa do Inconel 718 e outros metais (Adaptado de Ezugwu, 2005).

Com o intuito de reduzir estes efeitos causados pelas propriedades do material, as ferramentas de cerâmica vêm sendo utilizadas, principalmente no fresamento de topo, para melhorar a eficiência na usinagem das ligas de níquel. Segundo Finkeldei et al. (2019), as ferramentas de nitreto de silício se destacam por serem mais inertes quimicamente contra átomos de impureza do que as ferramentas de óxido de alumínio. Em seu estudo, Finkeldei et al. (2019) concluíram que as fresas de topo de cerâmica podem aumentar em até 558% o

desempenho do processo, quando comparadas com ferramentas de metal duro, sem afetar a qualidade da superfície.

Çelik et al. (2017) investigaram os mecanismos de desgaste de novas ferramentas de cerâmicas baseadas em SiAlON (um  $\alpha$  /  $\beta$ -SiAlON e seu composto reforçado com TiN) durante a fresagem de alta velocidade do Inconel 718, em um tempo de usinagem total de 36 minutos e uma velocidade de corte de 585 m/min, cerca de 10 vezes maiores do que as ferramentas de metal duro podem ser operadas. A conclusão do estudo foi que as fresas sólidas à base de SiAlON podem ser utilizadas para o fresamento em alta velocidade da liga de Inconel 718 sem qualquer desgaste abrasivo e fratura, sendo a difusão o mecanismo de desgaste dominante das ferramentas (Çelik et al., 2017).

Além da opção pelo uso de ferramentas de cerâmica, que resiste às altas temperaturas do processo, outro método comumente utilizado e estudado é a refrigeração e a lubrificação do corte. Um dos métodos que tem apresentado bons resultados é o da refrigeração criogênica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). De acordo com Halim et al. (2019), o sistema de resfriamento criogênico de CO<sub>2</sub> conseguiu reduzir a temperatura de corte em 80% e, conseqüentemente, prolongar a vida útil da ferramenta em até 70,8%, ambos em relação ao corte a seco.

Neste mesmo sentido, Pereira et al. (2009) compararam as forças de corte e o desgaste da ferramenta entre os processos com refrigeração criogênica de CO<sub>2</sub>, mínima quantidade de lubrificante (MQL), refrigeração criogênica de CO<sub>2</sub> + MQL, usinagem a úmido e corte seco. A combinação da refrigeração criogênica de CO<sub>2</sub> com MQL conseguiu reduzir as forças de corte em aproximadamente 21% e aumentar a vida útil da ferramenta em torno de 57% quando comparado somente com MQL. Embora os resultados da combinação sejam um pouco piores se comparados com a usinagem úmida, a utilização da refrigeração criogênica de CO<sub>2</sub> com MQL é mais ecológica, tornando-se a melhor alternativa a ser aplicada (Pereira et al., 2020).

Em outro trabalho, Shokrani e Newman (2018) compararam o desgaste de uma ferramenta de carboneto de tungstênio entre o fresamento por inundação convencional, MQL de óleo vegetal, resfriamento criogênico de LN<sub>2</sub> e resfriamento híbrido (criogênico LN<sub>2</sub> e MQL). Os resultados mostraram que o resfriamento híbrido pode prolongar a vida útil da ferramenta em até 77% quando comparado ao resfriamento por inundação, figura 5, fazendo com que o fresamento em alta velocidade com ferramentas de carboneto de tungstênio seja viável (Shokrani e Newman, 2018).

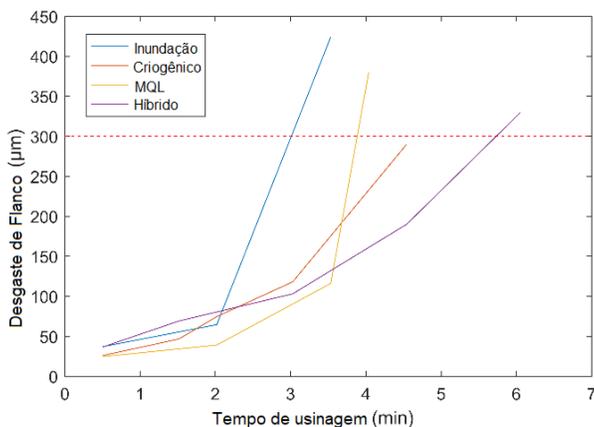


Figura 5. Desgaste de flanco por tempo de usinagem em fresamento de alta velocidade do Inconel 718 (Adaptado de Shokrani e Newman, 2018).

Um método um pouco menos difundido que o uso de lubri-refrigeração é o tratamento térmico criogênico de ferramentas de corte. Os tratamentos térmicos, na maioria das vezes, têm como finalidade melhorar as propriedades mecânicas do material. É comum a realização de tratamentos térmicos nas ferramentas de corte em busca de aumentar a vida útil da ferramenta. Kursuncu (2020) analisou o efeito do tratamento térmico criogênico, aplicado-o em diferentes temperaturas (-145 °C e -196 °C) e diferentes períodos de imersão (24 e 36 horas), na ferramenta de corte de metal duro, com uma taxa de resfriamento de 2 °C / min. A ferramenta CT-1 foi submetida ao tratamento térmico criogênico a -145 °C por 24 horas, CT-2 a -196 °C por 24 horas, CT-3 a 145 °C por 36 horas e CT-4 a -196 °C por 36 horas.

Os resultados obtidos por Kursuncu (2020) mostraram que as ferramentas com tratamento térmico criogênico obtiveram um aumento da resistência ao desgaste, associado ao aumento da dureza, conforme pode ser observado na Figura 6, em todos os parâmetros de corte e uma diminuição nos valores de rugosidade superficial da peça usinada. A amostra CT-1 obteve a menor força de corte e a superfície mais lisa, com uma velocidade de corte de 30 m/min. A amostra CT-2 conseguiu a superfície mais lisa para uma velocidade de corte de 5 m/min e a amostra CT-4 teve o maior aumento da resistência ao desgaste para ambas velocidades de corte (Kursuncu, 2020).

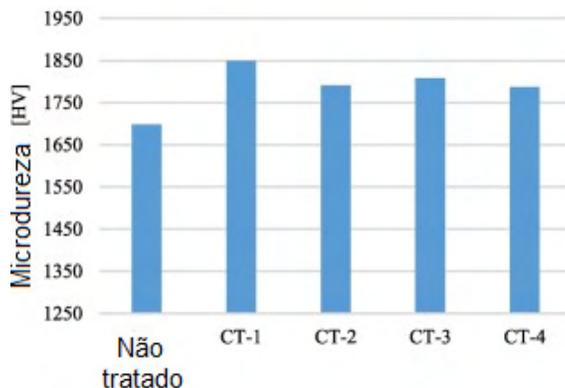


Figura 6. Microdureza das ferramentas não tratada e tratadas termicamente (Adaptado de Kursuncu, 2020).

## 4 | CONCLUSÃO

Através da análise da literatura, pôde-se obter as seguintes conclusões:

- i. O Inconel 718 possui características específicas que contribuem para sua baixa usinabilidade relativa em relação a outros metais, como a baixa condutividade térmica e a presença de carbonetos e precipitados em sua microestrutura.
- ii. As ferramentas de cerâmica podem ser utilizadas no fresamento em alta velocidade do Inconel 718, obtendo um melhor desempenho e menor desgaste em comparação as ferramentas de metal duro.
- iii. A refrigeração criogênica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no fresamento de Inconel 718 conseguiu reduzir a temperatura de corte e aumentar a vida útil da ferramenta em comparação ao corte a seco.
- iv. O resfriamento híbrido (criogênico + MQL) conseguiu reduzir as forças de corte e aumentar a durabilidade da ferramenta em relação ao corte a seco, a MQL e a refrigeração criogênica, além de ser menos prejudicial ao meio ambiente do que o resfriamento por inundação, viabilizando o fresamento em alta velocidade do Inconel 718.
- v. O tratamento térmico criogênico aplicado nas ferramentas de corte obteve um resultado superior em relação à ferramenta não tratada, aumentando a dureza, a resistência ao desgaste e diminuindo a rugosidade superficial.

## REFERÊNCIAS

Bozhong Metal Group. **Inconel 718/UNS N07718 Sheet/bar/pipe**. <[http://www.bzmetal.com/product\\_detail/inconel-718/uns-n07718-sheet/bar/pipe-15106279669339980.html](http://www.bzmetal.com/product_detail/inconel-718/uns-n07718-sheet/bar/pipe-15106279669339980.html)>. Acesso em junho de 2021.

Çelik, A., Alağaç, M. S., Turan, S., Kara, A., Kara, F. **Wear behavior of solid SiAlON milling tools during high speed milling of Inconel 718**. *Wear*, v. 378-379, pp. 58-67, 2017.

De Oliveira, D. **Retificação de Inconel 718 com Multicamadas de Grafeno Dispersas em Fluido de Corte Aplicado via Técnica MQL**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – MG, 2017.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Mm Editora, São Paulo, 2000.

Ezugwu, E. O., Whang, Z. Machado, A. R. **The machinability of nickel-based alloys: a review**. Journal of Materials Processing Technology, v. 86, pp. 1-16, 1999.

Ezugwu, E. O. **Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 45, pp. 1353-1367, 2005.

Favaro Filho, A. **Fresamento de topo do Inconel 718 com ferramentas de metal duro microgrãos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – MG, 2018.

Finkeldei, D., Sexuauer, M., Bleicher, F. **End milling of Inconel 718 using solid Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic cutting tools**. Procedia CIRP, v. 81, pp. 1131-1135, 2019.

Flynn, B.B., Sakakibara, S., Schroeder, R.G., Bates, K.A., Flynn, E.J. **Empirical research methods in operations management**. Journal of operations management v. 9, pp. 250-284. 1990.

GGD Metals. **Alumínio 7075-T651**. <<https://www.ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2020/07/GGD-7075-t651-Alum%C3%ADnio.pdf>>. Acesso em junho de 2021.

Halim, N. H. A., Haron, C. H. C., Ghani, J. A., Azhar, M. F. **Tool wear and chip morphology in high-speed milling of hardened Inconel 718 under dry and cryogenic CO<sub>2</sub> conditions**. Wear, v. 426-427, pp. 1683-1690, 2019.

Kursuncu, B. **Influence of cryogenic heat-treatment soaking period and temperature on performance of sintered carbide cutting tools in milling of Inconel 718**. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 92, pp. 105323, 2020.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Da Silva, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Editora Blucher, São Paulo, 2009.

Norton, R. L. **Projeto de Máquinas**. Bookman Editora, Porto Alegre, 2011.

Pereira, O., Celaya, A., Urbikaín, G., Rodríguez, A., Fernández-Valdivielso, A., De Lacalle, L. N. L. **CO<sub>2</sub> cryogenic milling of Inconel 718: cutting forces and tool wear**. Journal of Materials Research and Technology, v. 9, pp. 8459-8468, 2020.

Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. Bookman Editora, Porto Alegre, 2005.

Shokrani, A., Newman, S. T. **Hybrid cooling and lubricating technology for CNC milling of Inconel 718 nickel alloy**. Procedia CIRP, v. 77, pp. 215-218, 2018.

Sugahra T., Neto C. M., Reis D. A. P., Hirschmann A. C. O., Piorino Neto F. **Estudo do comportamento em fluência da superliga Inconel 718**. Anais do 15° Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XV ENCITA, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 2009.

## **SOBRE O ORGANIZADOR**

**GILBERTO JOÃO PAVANI** - Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1991), especialização em Análise de Sistemas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (1994), licenciatura em Informática pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (1996), especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Unisinos (2001), mestrado em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2003) e doutorado em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (em andamento). Atualmente é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS). Tem experiência em informática, engenharia mecânica, segurança do trabalho, materiais compósitos e poliméricos e participando dos grupos de pesquisa Programas Especiais em Saúde (IPA/RS) e Pesquisa em Polímeros Avançados (IFRS), além de ter publicado vários artigos científicos e livros na área de Engenharia Mecânica.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Aço carbono de baixa liga 14  
Aço carbono de baixa liga e alta resistência 14  
Agente compatibilizante 3, 10

### B

Blenda polimérica 3

### C

Citotoxicidade 95, 96, 103  
Corrosão 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 106

### D

Desfosforação 54, 55, 56, 57, 59, 62, 63, 64, 65, 66  
Doadores de óxido nítrico 94, 96, 101

### E

Elastômero termoplástico 4  
Extratos vegetais 67, 69, 70, 75, 79, 80

### F

Ferramentas de cerâmica 105, 110, 111, 113  
Ferro-gusa 54, 55, 56, 57, 58, 59, 62, 66  
Filme de óxido de Titânio - TiO<sub>2</sub> 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 59  
Fotocatálise 27, 32, 39, 41  
Fotocromismo 27  
Fresamento 105, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 114

### H

Hidratos de gás 85, 86, 91

### I

Inconel 718 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115  
Inibidores da linha verde 67, 69  
Inibidores de corrosão 67, 69, 70, 74, 75, 76, 79, 81, 82  
Inibidores de hidratos de gás 85

Inibidores poliméricos 85, 87

Inibidores sintéticos 67

## **M**

Manufatura aditiva 14, 15

Manufatura aditiva por arco elétrico - WAAM 14

## **O**

Óxido nítrico 94, 95, 96, 97, 100, 101, 102, 103, 104

## **P**

Poli (ácido láctico) - PLA 1, 2, 4

Poliuretano termoplástico 1, 3, 4

Pré-tratamento de ferro-gusa 55, 56

Propriedades mecânicas 11, 15, 68, 73, 105, 106, 112

Protocolo de alto rendimento 85

## **R**

Resfriamento criogênico 105, 111

## **S**

Spin-coating 27, 28, 30, 31

## **T**

Termodinâmica computacional 54, 57, 63, 66

Testes não destrutivos 15

Tratamento térmico 15, 29, 33, 34, 35, 41, 42, 73, 105, 112, 113

Trióxido de Tungstênio - WO<sub>3</sub> 27

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

*Collection:*

# APPLIED MATERIALS ENGINEERING

  
Ano 2022

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

*Collection:*

# APPLIED MATERIALS ENGINEERING

  
Ano 2022