

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

CRISTIAN HARDT DOS SANTOS
ROBERTO SCHREINER KRAZOWSKI

**INFLUÊNCIA DA BORETAÇÃO DA SUPERLIGA INCONEL 718 NA RESISTÊNCIA
AO DESGASTE POR DESLIZAMENTO**

Joinville
07/07/2025

CRISTIAN HARDT DOS SANTOS
ROBERTO SCHREINER KRAZOWSKI

**INFLUÊNCIA DA BORETAÇÃO DA SUPERLIGA INCONEL 718 NA RESISTÊNCIA
AO DESGASTE POR DESLIZAMENTO**

Artigo apresentado ao curso
de Bacharelado em
Engenharia Mecânica do
Câmpus Joinville do Instituto
Federal de Santa Catarina
para a obtenção do diploma
de Engenheiro Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Ivandro Bonetti


Joinville
07/07/2025

CRISTIAN HARDT
ROBERTO SCHREINER KRAZOWSKI


INFLUÊNCIA DA BORETAÇÃO NA SUPERLIGA INCONEL 718 NA RESISTÊNCIA
AO DESGASTE POR DESLIZAMENTO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.


Joinville, 04 de julho de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **IVANDRO BONETTI**
Data: 02/07/2025 08:39:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Ivandro Bonetti, Dr.
Orientador
Instituto Federal Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **ANAEL PREMAN KRELLING**
Data: 02/07/2025 14:37:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Anael Premann Krelling, Dr.
Avaliador
Instituto Federal Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 **JEFFERSON LUIZ JERONIMO**
Data: 03/07/2025 20:16:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Jefferson Luiz Jeronimo, Dr.
Avaliador
Instituto Federal Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão à Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) por abrir suas portas e proporcionar o ambiente necessário para o desenvolvimento deste trabalho. A estrutura, o apoio acadêmico e o incentivo à pesquisa foram fundamentais para que pudéssemos seguir com a qualidade em cada etapa do projeto.

Também agradecemos ao Instituto SENAI, pelo apoio técnico e pela disponibilização de seu laboratório, o que nos permitiu realizar ensaios e análises essenciais para a conclusão deste trabalho.

Sem a parceria e a contribuição dessas duas instituições, este trabalho não teria sido possível. Nosso mais profundo agradecimento.

RESUMO

A liga metálica Inconel 718 tem ganhado destaque em diversas aplicações industriais devido às suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. No entanto, sua dureza relativamente baixa pode levar a um desgaste acentuado em certas condições de uso. Para contornar esse problema, este estudo investigou a aplicação do tratamento termoquímico de boretação utilizando uma mistura composta por 90% de B_4C e 10% de KBF_4 , com o objetivo de aumentar a dureza superficial da liga por meio da incorporação de boro. As amostras tratadas foram submetidas ao ensaio pino-disco, e seus desempenhos comparados aos de amostras não tratadas. Os resultados obtidos, analisados por meio de ensaio de perfilometria, demonstraram uma significativa melhora na resistência ao desgaste das amostras boretadas, independentemente das condições de carga e velocidade aplicadas. Além disso, observou-se que o desgaste não ultrapassou a camada superficial modificada pelo tratamento, evidenciando a eficácia do processo de boretação na proteção da Inconel 718. Esse resultado reforça o potencial do tratamento para aplicações industriais que exigem maior durabilidade e resistência ao desgaste.

Palavras-Chave: Inconel 718; Boretação; Resistência ao Desgaste; Coeficiente de Atrito; Pino-Disco.

ABSTRACT

The Inconel 718 alloy has gained prominence in various industrial applications due to its mechanical properties and corrosion resistance. However, its relatively low hardness can lead to significant wear under certain conditions. To address this issue, this study investigated the application of a thermochemical boriding treatment using a mixture of 90% B₄C and 10% KBF₄, aiming to increase the surface hardness of the alloy through boron diffusion. Treated samples were subjected to a pin-on-disk wear test, and their performance was compared to that of untreated samples. The results, analyzed through profilometry testing, showed a significant improvement in the wear resistance of the borided samples, regardless of the applied load and speed conditions. Additionally, it was observed that the wear did not surpass the modified surface layer created by the treatment, highlighting the effectiveness of the boriding process in protecting Inconel 718. These results reinforce the potential of this surface treatment for industrial applications that demand higher durability and wear resistance.

Keywords: Inconel 718, Boriding, Wear Resistance, Coefficient of Friction, Pin-on-Disk

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Coeficiente de Atrito por Condição	15
Figura 2 - Gráficos Coeficiente de Atrito X Distância	16
Figura 3 - Perfilometria Amostra 17A	18
Figura 4 - Perfilometria Amostra 5B	18
Figura 5 - Gráfico Volume Removido por Condição	19
Figura 6 - Profundidade da Camada evidenciada através da Dureza	20
Figura 7 - Profundidade do Desgaste para as Amostras Boretadas	21
Figura 8 - Esfera e Amostras para Condições Não Boretada	22
Figura 9 - Gráfico de Pareto - Interação Velocidade e Carga	23
Figura 10 - Gráfico - Interação Tratamento e Carga	24

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Denominação das Amostras por Variação de Ensaio

12

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al_2O_3 - Óxido de alumínio

B_4C - Carbetto de Boro

DOE - Design of Experiments (Design de Experimentos)

KBF_4 - Fluorborato de potássio

m/s - Metros por segundo

mm - Milímetros

mm^3 - Milímetros cúbicos

N - Newton

μm - Micrômetro

μm^2 - Micrômetro quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	METODOLOGIA	12
2.1	TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE BORETAÇÃO	13
2.2	ENSAIO DE DESGASTE	13
2.3	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	14
2.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA	14
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	15
3.1	COEFICIENTE DE ATRITO	15
3.2	DESGASTE	17
3.2.1	Perfilometria	17
3.2.2	Volume de Material Desgastado	18
3.2.3	Profundidade do Desgaste	20
3.2.4	Irregularidades nos Ensaios de Desgaste	21
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	22
3.3.1	Interação entre Velocidade e Carga nas Amostras Boretadas	23
3.3.2	Interação entre Tratamento e Carga para Velocidade de 0,1 m/s	23
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
	REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por materiais com propriedades mecânicas otimizadas e elevada durabilidade tem impulsionado o desenvolvimento de ligas metálicas de alto desempenho. Dentre essas, as superligas de níquel, como a família Inconel, destacam-se por apresentarem excelente resistência à fadiga, boa soldabilidade, alta tenacidade e notável resistência à corrosão e à oxidação, especialmente em ambientes de temperaturas elevadas (RAMOS, 2018), sendo amplamente utilizada em setores industriais diversos, como turbinas a gás, reatores nucleares, componentes aeroespaciais e equipamentos petroquímicos (JERONIMO et al., 2022). Em especial, a liga Inconel 718 é recorrente em componentes de motores aeronáuticos, como discos forjados, pás fundidas e carcaças (MORÓN et al., 2023).

Apesar de suas propriedades vantajosas, a Inconel 718 apresenta dureza superficial relativamente baixa, comprometendo sua resistência ao desgaste e, conseqüentemente, sua vida útil sob condições de operação severas. Essas falhas podem ocorrer por erosão, corrosão a quente ou oxidação em altas temperaturas (MORÓN et al., 2023). Como solução, destacam-se os processos termoquímicos de modificação superficial por difusão, os quais são amplamente aplicados devido à viabilidade de produção em larga escala e à alta qualidade das camadas formadas (WU et al., 2025).

Entre esses processos, a cementação e a nitretação têm eficácia limitada em ligas de níquel devido à baixa solubilidade do carbono e do nitrogênio no estado sólido. Nesse contexto, a boretação surge como uma alternativa promissora, visto que os pequenos átomos de boro conseguem se difundir em uma ampla gama de materiais, incluindo ligas ferrosas, de níquel, cobalto, titânio, refratárias e sinterizadas (KRELLING et al., 2019). A difusão do boro forma uma camada superficial de boretos, elevando significativamente a dureza e resistência ao desgaste do material.

O processo de boretação ocorre a temperaturas elevadas, entre 800 °C e 1000 °C (JERONIMO, 2025), podendo ser realizado com diferentes meios, como pós, sais, pastas, óxidos fundidos ou gases. Os meios sólidos são geralmente preferidos por motivos toxicológicos e econômicos (KRELLING et al., 2023). Com base em estudos anteriores, como o de Jeronimo et al. (2022), adotaram-se os mesmos parâmetros — incluindo a preparação das amostras, composição do pó boretante e

condições de processamento — de modo a garantir repetibilidade e validar os resultados com base na literatura.

Segundo esses estudos, o tratamento à temperatura de 950 °C por 3 horas promove uma difusão eficiente do boro, formando compostos como CrB, Cr₂B, FeB e Ni₃B, responsáveis pelas melhorias observadas nas propriedades mecânicas. A mistura dos pós B₄C e KBF₄ resulta em camadas livres de silicatos, favorecendo a integridade do material. Outros trabalhos evidenciam o aumento da resistência ao desgaste através da boretação, tanto em meios secos (CAMPOS-SILVA et al., 2019) quanto em soluções aquosas neutras (MORÓN et al., 2023).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da velocidade de deslizamento e da carga normal no desgaste por deslizamento a seco da liga Inconel 718 boretada, em comparação com o material sem tratamento. Os ensaios foram conduzidos utilizando tribômetro pino-disco, em quatro combinações de carga (2 N e 10 N) e velocidade (0,1 m/s e 0,3 m/s), totalizando oito condições experimentais. O desgaste foi avaliado por perfilometria e os dados foram analisados estatisticamente, visando determinar a significância das variáveis.

2 METODOLOGIA

O Quadro 1 apresenta a nomenclatura adotada para identificação dos ensaios, conforme o tipo de tratamento, carga aplicada e velocidade de deslizamento. O número identifica o ensaio e a letra indica o lado da amostra ensaiado, mantendo essa convenção ao longo de todo o estudo.

Quadro 1 - Denominação das Amostras por Variação de Ensaio

TRATAMENTO	VELOCIDADE	CARGA	AMOSTRA / LADO				
BORETADO	0,1 m/s	2 N	1A	1B	2A	2B	3A
BORETADO	0,1 m/s	10 N	4A	4B	5A	5B	6A
BORETADO	0,3 m/s	2 N	7A	7B	8A	8B	9A
BORETADO	0,3 m/s	10 N	10A	10B	11A	11B	12A
NÃO BORETADO	0,1 m/s	2 N	13A	13B	14A	14B	15A
NÃO BORETADO	0,1 m/s	10 N	16A	16B	17A	17B	18A
NÃO BORETADO	0,3 m/s	2 N	19A	19B	20A	20B	21A
NÃO BORETADO	0,3 m/s	10 N	22A	22B	23A	23B	24A

Fonte: elaborado pelos autores.

O material utilizado como base para o estudo foi a superliga de níquel Inconel 718, com a seguinte composição química: níquel (53%), cromo (18,5%), ferro (18,67%), nióbio (5,10%), molibdênio (3,00%), titânio (1,00%), alumínio (0,50%), carbono (0,03%), manganês (0,10%) e silício (0,10%), conforme a liga utilizada por Jeronimo et al. (2022).

Para os ensaios, utilizou-se uma barra com 19 mm de diâmetro, cortada em discos de 6 mm de espessura e retificadas após o corte. As amostras foram lixadas em ambas as faces com lixas de carbetto de silício (SiC), até a granulação 320. Do total, doze amostras foram submetidas ao tratamento termoquímico de boretação, enquanto as demais doze foram diretamente encaminhadas ao ensaio de desgaste do tipo pino-disco.

2.1 TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE BORETAÇÃO

O tratamento termoquímico foi realizado com a mistura de 90% de B_4C e 10% de KBF_4 em massa, homogeneizados por mistura mecânica. As amostras foram posicionadas aos pares em um cadinho de aço inoxidável, intercaladas por camadas de pó boretante: de 25 mm a 30 mm nas extremidades superior e inferior, e de 50 mm a 60 mm entre as amostras. O conjunto foi selado com uma tampa metálica e complementado com areia de fundição comum.

A boretação foi realizada em forno tipo mufla, à temperatura de 950 °C por 3 horas, com taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, conforme metodologia de Jeronimo et al. (2022). Após o ciclo térmico, o resfriamento foi realizado em ar ambiente. As amostras foram então limpas em banho ultrassônico com acetona por dez minutos.

2.2 ENSAIO DE DESGASTE

Para a avaliação do desgaste, foi empregado o ensaio pino-disco, escolhido por sua ampla aplicação e relevância em estudos tribológicos, como também observado em Wu et al. (2025). O equipamento utilizado foi um tribômetro modelo Tribom CZ1000, desenvolvido pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), campus Joinville.

Os ensaios foram realizados a seco, utilizando como contracorpo uma esfera polida de alumina (Al_2O_3) com seis milímetros de diâmetro. O raio de ensaio foi fixado em seis milímetros, realizando 26539 voltas resultando em uma distância de deslizamento de mil metros. As variáveis de carga e velocidade foram combinadas em quatro condições distintas: 2 N e 10 N; 0,1 m/s e 0,3 m/s. Para cada condição, foram realizados cinco ensaios para as boretadas e cinco para as não boretadas, para comparação.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

A caracterização do desgaste foi realizada por perfilometria, utilizando um perfilômetro modelo Taylor Hobson Talysurf. Para cada ensaio, foram obtidas quatro seções da pista de desgaste, cujos perfis foram analisados com o software Mountains Map Universal. A partir dessas seções, foi possível determinar a profundidade média do desgaste e a área da seção transversal.

O volume de material removido foi obtido pela multiplicação da área média das seções pela circunferência da pista (calculada com base no raio de seis milímetros), permitindo uma estimativa quantitativa do desgaste em cada amostra.

Para fins deste estudo, a espessura da camada boretada não foi determinada experimentalmente. Em seu lugar, utilizaram-se os valores de espessura encontrados por Jeronimo et al. (2022), uma vez que foi seguida a mesma metodologia experimental.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

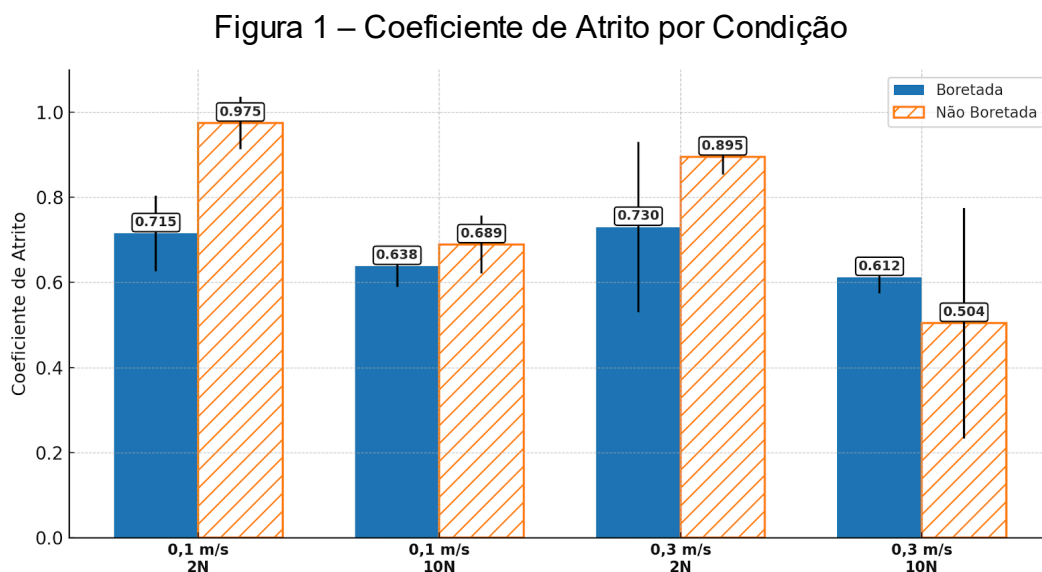
A análise estatística dos dados experimentais foi realizada com o auxílio do software Minitab, utilizando a metodologia de planejamento de experimentos (DOE – Design of Experiments). Visando investigar a influência dos parâmetros de ensaio e do tratamento superficial nas propriedades tribológicas, essa abordagem estatística multifatorial permitiu avaliar os efeitos principais de cada fator (tratamento, velocidade e carga), bem como das interações entre eles, sobre as variáveis de resposta.

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os ensaios foram realizados visando verificar a influência do tratamento termoquímico de boretação na resistência ao desgaste por deslizamento da liga Inconel 718. Os dados obtidos foram analisados quanto ao coeficiente de atrito, volume de material removido e profundidade do desgaste.

3.1 COEFICIENTE DE ATRITO

A análise do coeficiente de atrito, não somente forneceu dados sobre o atrito entre as superfícies mas também permitiu a verificação da estabilidade e da tendência à estabilidade dos ensaios, permitindo validá-los. A Figura 1 apresenta os valores médios do coeficiente de atrito obtidos para superfícies boretadas e não boretadas, sob diferentes condições de carga (2N e 10N) e velocidade (0,1 m/s e 0,3 m/s). Os dados representados incluem também os respectivos desvios padrão.



Fonte: elaborada pelos autores.

Com os resultados dos coeficientes de atrito registrados durante os ensaios, constatou-se que, para as condições com carga de 2 N, as amostras boretadas apresentaram coeficientes de atrito de 0,715 e 0,730, enquanto as amostras não boretadas registraram valores de 0,975 e 0,895, para as velocidades de 0,1 m/s e 0,3 m/s, respectivamente. Nessa condição, nota-se que as amostras não boretadas

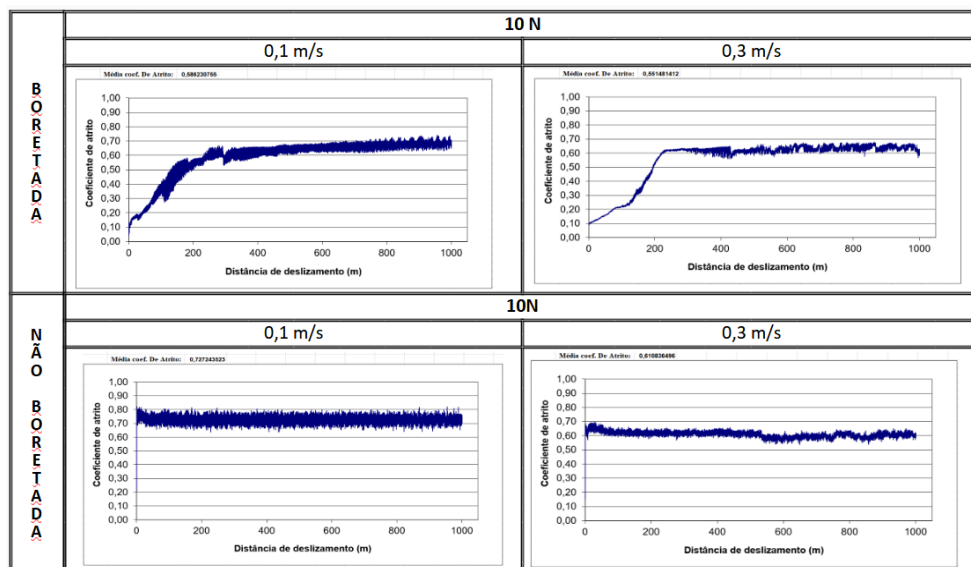
apresentaram valores mais altos em relação às boretadas. Apesar da presença de desvios padrão relativamente altos na condição boretada a 0,3 m/s ($\pm 0,200$), a diferença entre os valores médios ainda foi significativa, indicando que, para baixa carga, o tratamento termoquímico contribuiu para a redução do coeficiente de atrito.

Para a carga de 10 N, os coeficientes de atrito também se mantiveram relativamente próximos entre as condições, com valores entre 0,612 e 0,689, tanto para boretadas quanto para não boretadas, com exceção da condição de 0,3m/s não boretada, que apresentou o valor médio de 0,504, porém com um alto desvio padrão ($\pm 0,271$), indicando uma grande dispersão dos dados. Através desses valores verificou-se a influência da carga no coeficiente de atrito, onde nas amostras não boretadas, o coeficiente de atrito diminuiu significativamente com o aumento da carga, enquanto nas boretadas os valores diminuíram, porém mantendo-se próximos.

Por meio dos resultados, verificou-se que a variação de velocidade e de tratamento tiveram pouca influência sobre o coeficiente de atrito, enquanto a variação de carga teve uma influência maior na variação, para os parâmetros ensaiados.

Além disso, por meio da avaliação do coeficiente de atrito em função da distância, como os exemplos para carga de 10 N, demonstrados na Figura 2, notou-se uma estabilização ao longo dos ensaios para todas as variações do experimento.

Figura 2 – Gráficos Coeficiente de Atrito X Distância



Fonte: elaborada pelos autores.

Nas amostras não boretadas, essa estabilidade foi observada desde o início do experimento, enquanto as amostras boretadas apresentaram um período inicial de ajuste, com o coeficiente de atrito estabilizando-se a partir de aproximadamente 300

metros de deslizamento, possuindo um comportamento similar para as condições de 2 N, que por esse motivo não foram demonstradas.

3.2 DESGASTE

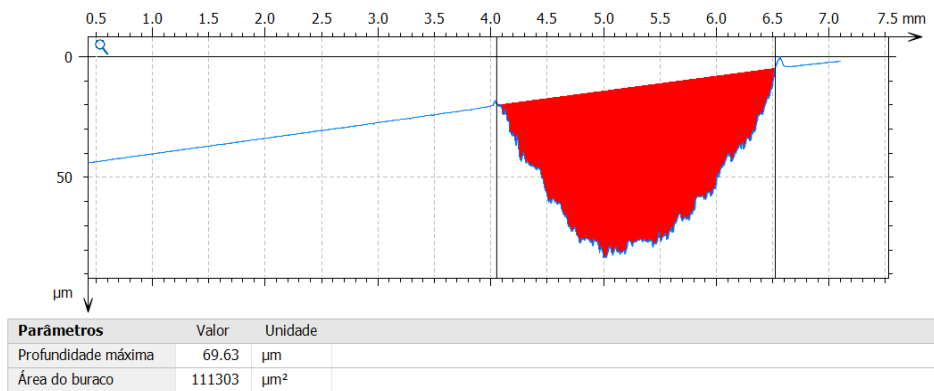
Com o intuito de investigar a efetividade da boretação na melhoria da resistência ao desgaste, esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da análise das pistas formadas nos ensaios tribológicos. Os dados foram obtidos por meio de perfilometria, técnica que permitiu a quantificação precisa do volume de material removido e da profundidade das pistas de desgaste nas diferentes condições testadas.

Os resultados são organizados em quatro subseções: a 3.2.1 caracterização visual e dimensional das trilhas de desgaste (perfilometria); a 3.2.2 os volumes médios de material removido; a 3.2.3 avaliação da profundidade do desgaste em relação à espessura da camada boretada; a 3.2.4 as irregularidades observados nos ensaios realizados.

3.2.1 Perfilometria

A análise das superfícies das amostras, por meio da perfilometria, permitiu a caracterização do perfil desgastado. Para as amostras sem tratamento, a pista de desgaste foi facilmente detectada, gerando uma curva característica associada ao perfil de desgaste, conforme ilustrado na Figura 3, onde a região em vermelho destaca a área de material removido e a profundidade, determinados através do software Mountains Map Universal.

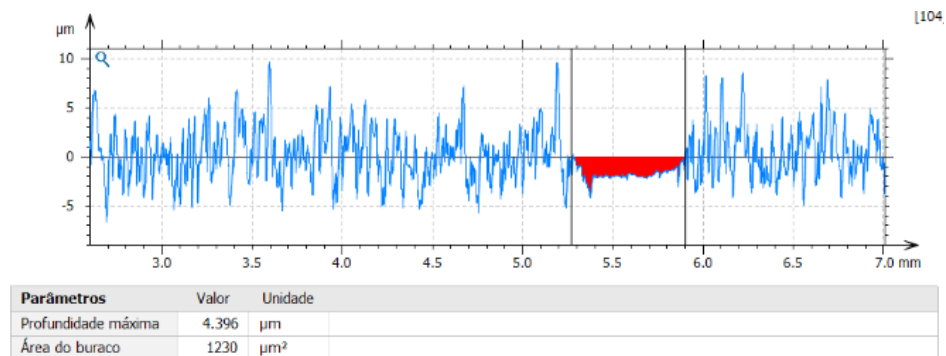
Figura 3 – Perfilometria Amostra 17 A



Fonte: elaborada pelos autores.

Nas amostras submetidas à boretação, a caracterização da pista de desgaste exigiu uma análise mais minuciosa, sendo necessário aplicar zoom no perfil gerado, para viabilizar a correta localização da pista, devido ao aumento da rugosidade causada pelo tratamento aplicado, conforme ilustrado na Figura 4. Nesta condição, o perfil da pista (destacada em vermelho), além de apresentar visualmente uma área menor, também revelou uma profundidade de desgaste inferior quando comparada às amostras sem tratamento.

Figura 4 – Perfilometria Amostra 5 B



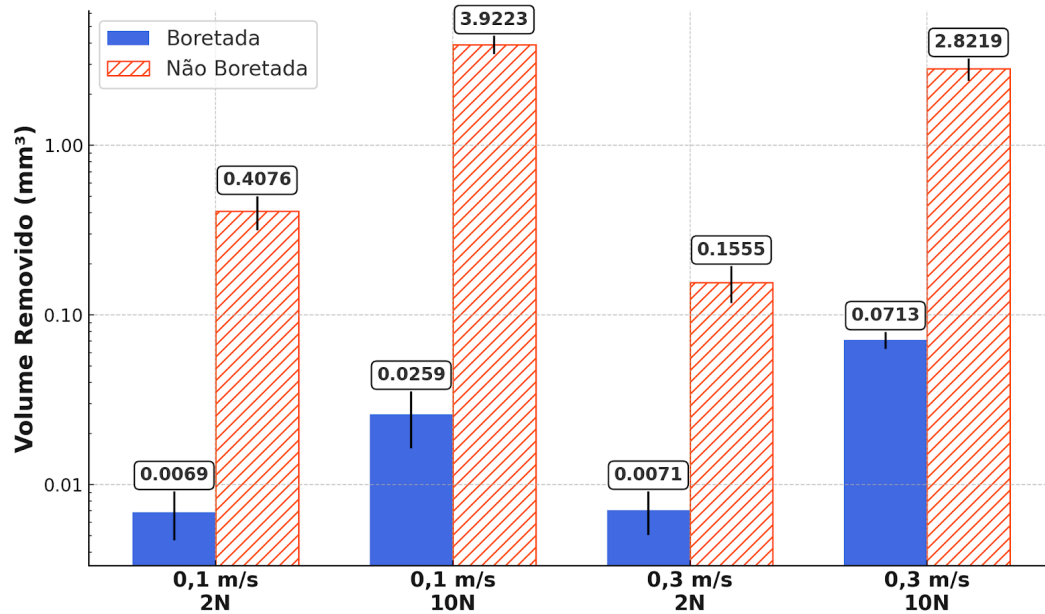
Fonte: elaborada pelos autores.

3.2.2 Volume de Material Desgastado

Com os dados do volume removido por amostra, encontrou-se o valor médio extraído por condição, expostos na Figura 5. Observou-se que, para as amostras boretadas, o aumento da carga foi responsável por um acréscimo expressivo no volume de desgaste, em ambas as velocidades, de modo que a 0,1 m/s, o volume

passou de 0,0069 mm³ para 0,0259 mm³, e a 0,3 m/s, o aumento foi de 0,0071 mm³ para 0,0713 mm³, para cargas de 2 N e 10 N respectivamente.

Figura 5 – Gráfico Volume Removido por Condição



Fonte: elaborada pelos autores.

O efeito da carga também foi perceptível para as amostras não boretadas, como na velocidade de 0,1 m/s, com um aumento no volume desgastado de 0,4076 mm³ (com 2 N) para 3,9223 mm³ (com 10 N). O mesmo também foi observado para a condição de 0,3 m/s, com variação do volume de 0,1555 mm³ para 2,8219 mm³, com carga de 2 N e 10 N respectivamente.

Em contraponto, analisando isolada da variável velocidade, notou-se que somente, ela não apresentou impacto considerável no desgaste, como evidenciado na condição 2 N, em que o desgaste variou de 0,0069 mm³ para 0,0071 mm³ com o aumento da velocidade, com desvios padrão sobrepostos. A influência no desgaste pela interação entre as variáveis foi analisada posteriormente por meio estatístico para obtenção de resultados quantitativos.

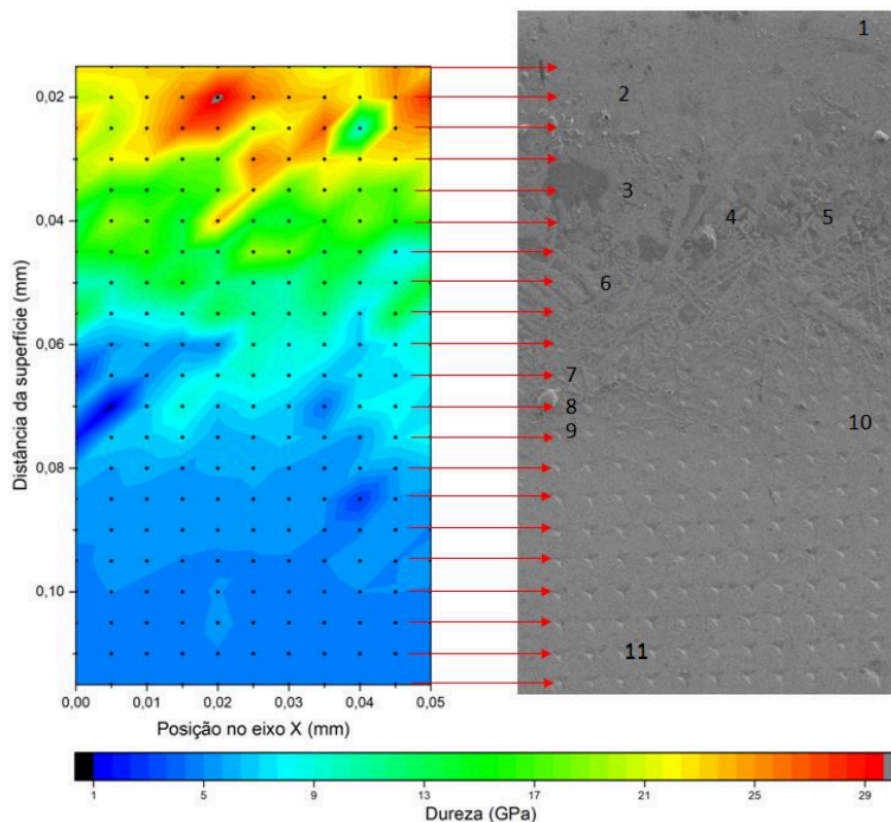
Na comparação entre as amostras boretadas e não boretadas, observou-se que as amostras não tratadas exibiram um volume de material removido significativamente maior em todas as condições de ensaio quando comparadas às amostras tratadas. Em termos de magnitude, o desgaste nas amostras não boretadas foi superior a dez vezes, ao observado nas amostras boretadas, dependendo da

condição de ensaio. Tal comportamento corrobora com os dados apresentados por Wu et al. (2025) no seu estudo sobre as características de desgaste na mesma superliga boretada, onde o autor encontrou 2 graus de diferença, confirmando o êxito na melhoria da resistência ao desgaste do Inconel 718 através da boretção, ainda que com metodologia experimental distinta.

3.2.3 Profundidade do Desgaste

Com a análise realizada através da perfilometria, também foi possível estudar a profundidade alcançada pelo desgaste de cada situação, possibilitando verificar se o desgaste ultrapassou a camada boretada ou a zona de difusão do tratamento termoquímico. Em estudos anteriores, para as mesmas condições, foram encontrados os valores de 57,12 μ m para o final da camada boretada e 90,13 μ m para o final da zona de difusão (JERONIMO, 2025), demonstrado na Figura 6, que evidencia o fim da camada e da área de difusão através da dureza. .

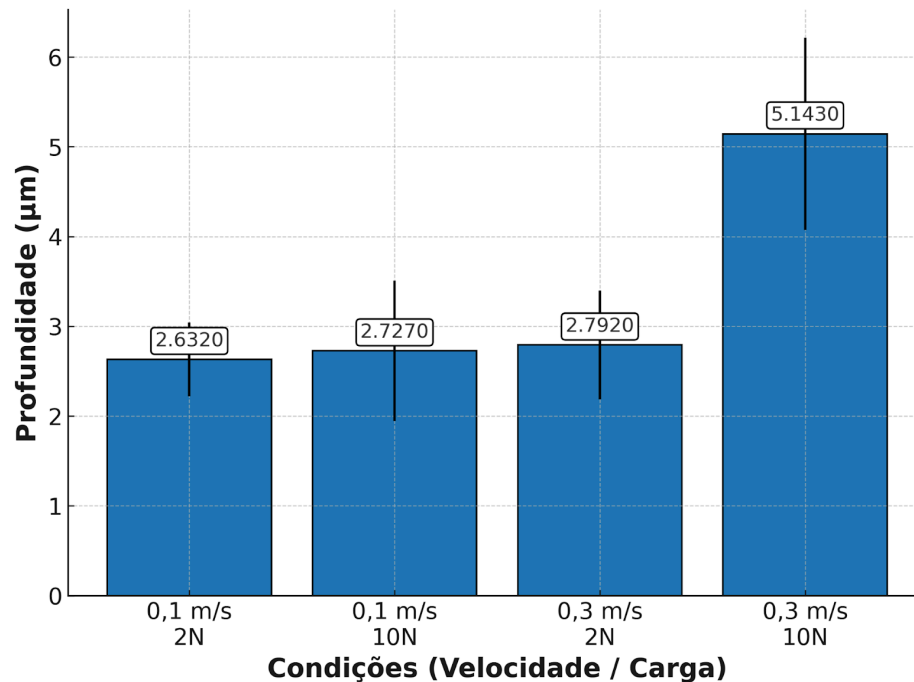
Figura 6 – Profundidade da Camada evidenciada através da Dureza



Fonte: Jeronimo (2025).

Para os valores de camada apresentados concluiu-se que, para todas as condições, mesmo considerando o desvio padrão, conforme apresentado na Figura 7, não ultrapassou-se a camada boretada, tampouco alcançou a zona de difusão, para as condições ensaiadas.

Figura 7 – Profundidade do Desgaste para as Amostras Boretadas



Fonte: elaborada pelos autores.

3.2.4 Irregularidades nos Ensaio de Desgaste

Durante os ensaios com as amostras não boretadas, sob carga de 10 N e nas duas variações de velocidade, observou-se uma pista de desgaste mais larga e, juntamente a isso, constatou-se um desgaste na esfera de alumina utilizada como contracorpo. Na imagem da esquerda da Figura 8 tem-se a amostra e a esfera desgastadas anormalmente; na figura central, uma amostra não boretada com as condições menos severas (0,1 m/s e 2 N nesse caso); e na imagem da direita, a esfera após o ensaio da amostra da imagem central, onde já há uma adesão do inconel na esfera, porém sem desgaste visível da mesma. Com base na análise visual da esfera e da amostra, observou-se essas irregularidades para as condições relatadas, que podem ter reduzido os valores encontrados para o desgaste nessas condições.

Figura 8 – Esferas e Amostras para Condição Não Boretada



Fonte: elaborada pelos autores.

Buscando correspondência na literatura, é possível encontrar estudos que abordam os mecanismos de desgaste em ferramentas de alumina na usinagem do Inconel 718, nos quais se constatou que este fenômeno pode ser atribuído ao desgaste adesivo entre os materiais (XUE, 2022). Este processo ocorre pela adesão do material da peça na ferramenta, sendo o material da ferramenta posteriormente arrancado de sua matriz pelo descolamento do material aderido, resultando em desgaste adesivo. Embora essa interação seja um aspecto relevante, a investigação aprofundada do desgaste da esfera e seus impactos não foram o foco principal deste estudo, servindo apenas como uma oportunidade para pesquisas futuras.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para uma melhor compreensão da influência da carga, da velocidade e do tratamento superficial sobre o volume de material removido, foi conduzido um planejamento de experimentos (DOE) do tipo fatorial 2^2 em duas etapas. Na primeira etapa, avaliou-se o efeito da carga (2 N e 10 N) e da velocidade (0,1 m/s e 0,3 m/s) sob a condição boretada, com o objetivo de investigar os efeitos principais e possíveis interações entre esses dois fatores sobre o comportamento tribológico das amostras.

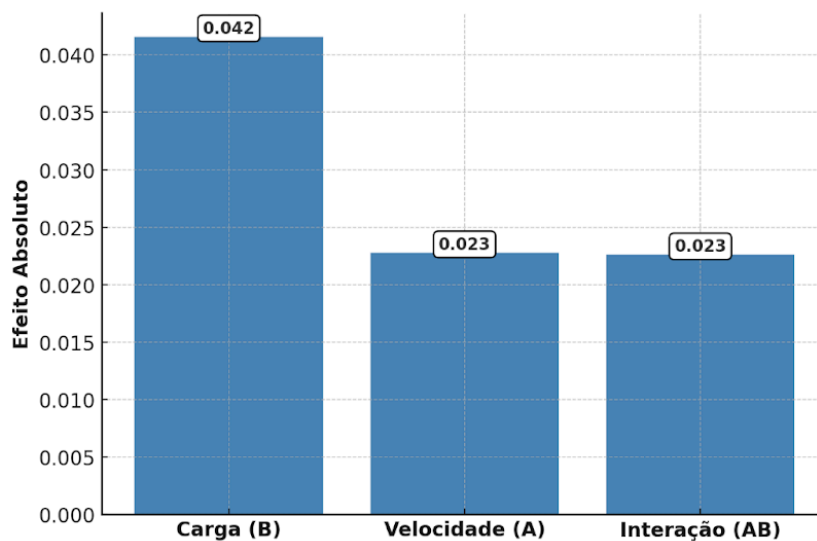
Na segunda etapa, o DOE foi realizado para investigar a influência da carga (2 N e 10 N) e do tratamento superficial (boretado e não boretado), mantendo-se a velocidade constante em 0,1 m/s. Essa abordagem permitiu não apenas identificar a contribuição isolada de cada fator, mas também compreender como suas combinações afetam o volume removido, ampliando a análise para diferentes condições de superfície das amostras.

3.3.1 Interação entre Velocidade e Carga nas Amostras Boretadas

A análise dos dados experimentais demonstrou que tanto a velocidade quanto a carga influenciam o volume removido das amostras tratadas, porém com intensidades distintas, conforme Figura 9. A carga aplicada apresentou o maior efeito, indicando que o aumento da força de contato resulta em um desgaste maior da superfície. A velocidade mostrou-se menos influente em comparação à carga. Além disso, a interação entre carga e velocidade teve sua influência muito similar à da velocidade isolada. Com base nesses resultados, concluiu-se que a carga tem maior impacto no volume removido, porém, quando combinado com alta velocidade, o desgaste é intensificado.

Esse resultado era esperado e está de acordo com a equação de Archard, a qual estabelece que a taxa de desgaste é proporcional à carga aplicada e ao coeficiente de desgaste, não tendo influência direta da velocidade. Para que a velocidade exerça influência significativa sobre o desgaste, seria necessária uma variação substancial desse parâmetro, a ponto de alterar o mecanismo de desgaste.

Figura 9 – Gráfico de Pareto – Interação Velocidade e Carga



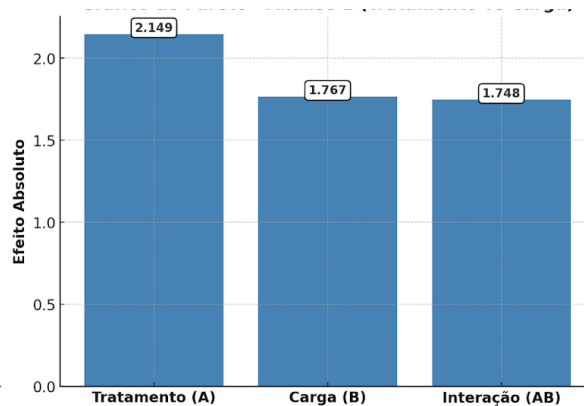
Fonte: elaborada pelos próprios autores.

3.3.2 Interação entre Tratamento e Carga para Velocidade de 0,1 m/s

A análise dos dados experimentais demonstrou que tanto o tratamento quanto a carga influenciam o volume removido das amostras, porém com intensidades distintas,

conforme Figura 10. O tratamento aplicado apresentou o maior efeito, indicando que a ausência do tratamento boretado resulta em um desgaste significativamente maior da superfície. A carga, embora também relevante, mostrou-se menos influente em comparação ao tratamento. Além disso, a interação entre tratamento e carga foi considerável. Com base nesses resultados, concluiu-se que a combinação de peça não tratada e alta carga intensifica o desgaste, provavelmente devido há uma maior adesão, devendo ser evitada, principalmente quando associadas.

Figura 10 – Gráfico de Pareto – Interação Tratamento e Carga



Fonte: elaborada pelos próprios autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O tratamento termoquímico de boretação no Inconel 718 aumentou a resistência ao desgaste, reduzindo o volume de material removido de em mais de dez vezes em comparação com as amostras não tratadas.
- A carga aplicada foi a variável de maior impacto no volume desgastado, apresentando influência direta, quando desconsiderado o fator tratamento.
- Em nenhuma condição de ensaio o desgaste ultrapassou a camada boretada ou a zona de difusão, demonstrando a eficácia da proteção fornecida pelo tratamento.
- A velocidade apresentou pouca influência nos resultados de desgaste.
- A interação entre carga elevada e ausência de tratamento resulta em desgaste acentuado, ressaltando a importância da boretação sob condições severas.

REFERÊNCIAS

JERONIMO, Jefferson Luiz. *Influência do tratamento termoquímico de boretação na microestrutura, comportamento microabrasivo e corrosão da liga Inconel 718.* 2025. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2025.

WU, Z. et al. Insights into the microstructure and load-dependent wear characteristics of the boride layer on Inconel 718 alloy. *Tribology International*, v. 202, 110298, 2025.

KRELLING, A. P.; ZAPPELLINO, B. DE F.; JERONIMO, J. L.; BONETTI, I.; MILAN, J. C. G.; DA COSTA, C. E. Caracterização microestrutural de camadas de boretos formadas sobre Aço AISI 8640. *Brazilian Journal of Development*, v. 9, n. 1, p. 5919–5931, 2023.

MORÓN, R. C.; CONTLA-PACHECO, A. D.; CASTREJÓN-SÁNCHEZ, V. H.; MELO-MÁXIMO, L.; CAMPOS-SILVA, I. Estimation of the wear and corrosion synergism of borided Inconel 718 alloy immersed in a neutral aqueous solution. *Ceramics International*, v. 49, n. 2, p. 2495–2505, 2023.

JERONIMO, J. L.; KRELLING, A. P.; PACHECO, C.; BONETTI, I.; DA SILVA, R.; MILAN, J. C. G.; DA COSTA, C. E. Microstructural, mechanical characterizations and corrosion behaviour of borides layers on Inconel 718 superalloy. *Results in Engineering*, v. 16, 100783, 2022.

XUE, C.; WANG, D.; ZHANG, J. Wear mechanisms and notch formation of whisker-reinforced alumina and Sialon ceramic tools during high-speed turning of Inconel 718. *Materials*, v. 15, n. 11, p. 3860, 2022.

CAMPOS-SILVA, I.; CONTLA-PACHECO, A. D.; FIGUEROA-LÓPEZ, U.; MARTÍNEZ-TRINIDAD, J.; GARDUÑO-ALVA, A.; ORTEGA-AVILÉS, M. Sliding wear resistance of nickel boride layers on an Inconel 718 superalloy. *Surface & Coatings Technology*, v. 378, p. 124862, 2019.

KRELLING, A. P.; MELO, F. S.; ALMEIDA, E. A. S.; DA COSTA, C. E.; MILAN, J. C. G. Microstructure and properties of borided Monel 400 alloy. *Materials Research Express*, v. 6, n. 10, p. 106410, 2019.

RAMOS, Matheus Santana. *Avaliação do comportamento tribológico de revestimentos de Inconel 625 no desgaste por deslizamento.* 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.