# ESTUDO DA BORETAÇÃO TERMOQUÍMICA NA LIGA INCONEL 718: REVISÃO SISTEMÁTICA, ANÁLISE CINÉTICA E PLANEJAMENTO PARA ENSAIOS DE TRIBOCORROSÃO

Chiclene Pedro Gaspar, Cesar Edil da Costa

## INTRODUÇÃO

A superliga à base de níquel Inconel 718 destaca-se pela elevada resistência mecânica e estabilidade térmica em aplicações aeroespaciais e offshore. No entanto, sua durabilidade operacional é frequentemente comprometida sob solicitações sinérgicas de atrito e ataque químico (tribocorrosão). O tratamento termoquímico de boretação surge como uma rota eficiente para a modificação superficial via difusão atômica de boro, gerando fases intermetálicas de alta dureza. O presente trabalho realizou uma investigação analítica e sistemática sobre a formação e o comportamento da camada boretada no Inconel 718, correlacionando parâmetros de processo, microestrutura e planejamento do dispositivo de ensaio tribocorrosivo. Com base na produção científica do grupo de pesquisa da UDESC e na literatura recente, analisou-se a influência do binômio tempo-temperatura na cinética de crescimento da camada, na identificação das fases formadas ($Ni_2B$, CrB e $Cr_2B$) e no perfil de microdureza superficial. Adicionalmente, estruturou-se a metodologia e os requisitos operacionais para ensaios triboeletroquímicos em circuito aberto e sob polarização potenciodinâmica. Os resultados consolidam as diretrizes cinéticas e operacionais para a reprodução experimental de camadas boretadas protetivas em superligas.

A aplicação de superligas à base de níquel, em especial o Inconel 718, consolidou-se em componentes críticos dos setores aeronáutico, nuclear e de óleo e gás devido à sua excelente resistência à fluência e à corrosão em temperaturas moderadas a elevadas. Não obstante, componentes estruturais submetidos a ambientes marinhos agressivos associados a solicitações mecânicas de atrito enfrentam falhas prematuras por tribocorrosão — processo irreversível gerado pela ação simultânea do desgaste mecânico e da dissolução eletroquímica.

Nesse cenário, os tratamentos termoquímicos de engenharia de superfícies permitem aprimorar as propriedades tribológicas sem degradar a tenacidade do núcleo metálico. A boretação termoquímica destaca-se por promover a difusão de boro na matriz gama (γ) do níquel, induzindo a precipitação de boretos complexos caracterizados por altíssima dureza e inércia química.

O presente plano de trabalho teve como foco investigar de forma sistemática a resposta microestrutural do Inconel 718 ao processo de boretação, correlacionando parâmetros de tratamento térmico e evolução de fases intermetálicas, além de estabelecer o arranjo experimental para a avaliação quantitativa do comportamento tribocorrosivo da liga.

## DESENVOLVIMENTO

O plano de trabalho fundamentou-se em três eixos metodológicos integrados:

**Revisão sistemática e extração de dados experimentais**

Análise criteriosa de estudos do grupo de pesquisa da UDESC e da literatura especializada recente (destacando-se Jeronimo et al., 2022; Deng et al., 2015; e Xu et al., 2026). Foram mapeadas correlações entre temperatura (na faixa de 900 °C a 1000 °C), tempo de encharque térmico, espessura da camada, perfis de microdureza Vickers e espectros de difração de raios X (DRX).

**Ambientação laboratorial e protocolos metalográficos**

Treinamento em normas de biossegurança de bancada e domínio da preparação metalográfica de superligas (seccionamento refrigerado, embutimento a quente com baquelite condutiva, lixamento

sequencial até granulometria 1200 e polimento mecânico com suspensão de diamante de 1 µm), assegurando superfícies isentas de tensões residuais para análises difratométricas.

**Estruturação do dispositivo de tribocorrosão**

Planejamento conceitual de um aparato triboeletroquímico de três eletrodos integrado a um tribômetro esfera-sobre-placa (amostra como eletrodo de trabalho, contraeletrodo de platina e eletrodo de referência Ag/AgCl). O arranjo foi projetado para monitorar o Potencial de Circuito Aberto (OCP), curvas de polarização potenciodinâmica e o coeficiente de atrito (COF) sob solução salina agressiva de NaCl (figura 1).

## RESULTADOS

A consolidação dos dados da literatura e dos trabalhos do grupo de pesquisa evidenciou que a presença expressiva de elementos de liga como cromo (Cr), ferro (Fe), molibdênio (Mo) e nióbio (Nb) no Inconel 718 afeta diretamente os mecanismos difusionais do boro. Diferentemente de aços-carbono comuns, que desenvolvem morfologia denteada, a interface camada/substrato no Inconel 718 apresenta-se mais plana e uniforme.

As análises de DRX descritas na literatura recente (Xu et al., 2026; Jeronimo et al., 2022) revelam a formação predominante de boretos de níquel ($Ni_2B$) e boretos de cromo (CrB e $Cr_2B$), associados a uma zona de difusão adjacente. O aumento da temperatura para níveis em torno de 950 °C e a extensão dos tempos de patamar resultam no crescimento progressivo da espessura da camada e em incrementos substanciais de microdureza em comparação com a matriz solubilizada.

Quanto ao comportamento em meio agressivo, os dados apontam que a continuidade e a ausência de microtrincas na camada são essenciais: camadas homogêneas agem como barreira passivante contra o ataque por pites. No arranjo planejado para tribocorrosão, o acoplamento do contra-corpo cerâmico inerte ($Al_2O_3$) permitirá desacoplar o desgaste mecânico puro da corrosão acelerada por despassivação mecânica da superfície boretada ($S = T - W + C$), fornecendo medições precisas do coeficiente de atrito dinâmico.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão sistemática e a compilação dos dados experimentais consolidaram a boretação termoquímica como tratamento eficiente para a superliga Inconel 718, demonstrando a formação de fases boretadas duras ($Ni_2B$, CrB e $Cr_2B$) e ganho substancial de resistência mecânica superficial.

O levantamento dos parâmetros cinéticos validou a faixa operacional próxima a 950 °C como a mais equilibrada para difusão atômica sem degradação do grão do substrato.

O planejamento conceitual do dispositivo de tribocorrosão estabeleceu os parâmetros eletroquímicos e mecânicos para avaliação sinérgica em meio salino, preparando o arranjo técnico para as próximas campanhas de ensaios laboratoriais.

**Palavras-chave:** Inconel 718; Boretação; Boretos de Cromo e Níquel; Tribocorrosão; Engenharia de Superfícies.




Figura 1- Sistema para ensaio tribocorrosivo adaptado ao triboômetro.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

DENG, G. et al. Effect of standard heat treatment on microstructure and properties of borided Inconel 718. Surface and Coatings Technology, v. 278, p. 30-38, 2015.

JERONIMO, J. L.; KRELLING, A. P.; PACHECO, C.; BONETTI, I.; DA SILVA, R.; MILAN, J. C. G.; DA COSTA, C. E. Microstructural and mechanical characterizations and corrosion behaviour of borides layers on Inconel 718 superalloy. Results in Engineering, v. 14, p. 100783, 2022.

JERONIMO, J. L.; KRELLING, A. P.; PACHECO, C.; DA COSTA, C. E. Effects of Boriding on the Microstructure of Inconel 718 Alloy. SSRN Electronic Journal, 2022.

MISCHLER, S. Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: A review. Tribology International, v. 41, n. 7, p. 573-583, 2008.

XU, Y. et al. Investigation of the Microstructure, Mechanical, and Wear Characteristics of the Boronized Layer on IN718 Alloy Treated Under Aging Conditions. Metals, v. 16, n. 2, p. 210, 2026.