

BREVE REVISÃO DOS CONCEITOS ENGENHARIA DAS PROPRIEDADES E APLICAÇÕES DO AÇO HADFIELD

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.037-087>

Ricardo Luiz Perez Teixeira

E-mail: Ricardo.luiz@unifei.edu.br

Priscilla Chantal Duarte Silva

E-mail: priscillachantal@unifei.edu.br

Anibal Ferreira Pinto Junior

E-mail: afpjuninho@unifei.edu.br

RESUMO

O aço austenítico manganês Hadfield, caracterizado por alta resistência e excepcional resistência à abrasão, é amplamente empregado em indústrias como mineração, cimento e ferrovias. Sua composição, normalmente 1–1,4% em peso de carbono e 10–14% em peso de manganês, garante resistência superior ao desgaste e ductilidade sob estresse. A notável capacidade de endurecimento do aço, atribuída ao acúmulo de deslocamento e geminação, melhora suas propriedades mecânicas. No entanto, desafios como a precipitação de carboneto nos contornos dos grãos levam à fragilização e à redução da soldabilidade, exigindo um controle preciso durante a fundição e o tratamento térmico. Métodos-chave, como solubilização, têmpera rápida e tratamento térmico em temperaturas que variam de 950 ° C a 1000 ° C, são essenciais para dissolver carbonetos e melhorar as propriedades mecânicas. A usinabilidade do aço é prejudicada por sua alta capacidade de endurecimento por deformação e baixa condutividade térmica, resultando em rápido desgaste da ferramenta. Para resolver isso, usinagem a quente e ferramentas de corte avançadas, como metal duro e nitreto de boro cúbico, são empregadas para melhorar o desempenho. Apesar desses desafios, o aço Hadfield continua sendo o material de escolha para aplicações de desgaste devido à sua combinação única de tenacidade e propriedades de endurecimento. A pesquisa em andamento visa otimizar seu desempenho, particularmente em condições de alta abrasão e impacto. A integração de técnicas modernas como manufatura aditiva e tratamentos criogênicos tem sido destacada como soluções potenciais para melhorar ainda mais suas propriedades.

Palavras-chave: Abrasão. Precipitação de carboneto. Aço Hadfield. Tratamento térmico. Resistência ao desgaste.



1 INTRODUÇÃO

O aço Hadfield, uma liga com alto teor de manganês, é amplamente utilizado em indústrias como mineração, metalurgia e engenharia ferroviária devido à sua notável resistência ao desgaste em condições de alta tensão. Suas excepcionais capacidades de endurecimento, atribuídas principalmente ao acúmulo de deslocamento, geminação e envelhecimento dinâmico por deformação, melhoram significativamente suas propriedades mecânicas durante o serviço (Dastur & Leslie, 1981). Apesar dessas vantagens, pesquisas recentes têm se concentrado em otimizar seu desempenho por meio de endurecimento de superfície, liga e redução de impurezas, bem como entender seus mecanismos de deformação e mudanças microestruturais, particularmente durante a solidificação e resfriamento. As taxas de resfriamento durante a cristalização e a separação de fases pós-solidificação influenciam criticamente a microestrutura, com taxas de resfriamento mais rápidas reduzindo o tamanho do grão de austenita e mitigando as tensões de retração, enquanto a separação de fases controla a formação e distribuição de carbonetos (Gorlenko, Vdovin, & Feoktistov, 2016). No entanto, a precipitação de carboneto nos limites dos grãos continua sendo um grande problema, levando à fragilização, resistência ao impacto reduzida e baixa soldabilidade. Controlar as temperaturas de soldagem, utilizar métodos de resfriamento rápido, como solucionar, e manter uma microestrutura austenítica são essenciais para mitigar a formação de carboneto. Na usinagem, a alta capacidade de endurecimento por deformação, a baixa condutividade térmica e a tenacidade do aço Hadfield apresentam desafios significativos, resultando em rápido desgaste da ferramenta e endurecimento superficial (Silva, Teixeira, Costa, Corrêa, & Ribeiro, 2024; Teixeira, Damasceno, & de Lacerda, 2024). A usinagem a quente e o uso de ferramentas de corte avançadas, como metal duro revestido e nitreto cúbico de boro, melhoram a vida útil da ferramenta e o acabamento superficial. Apesar desses desafios de usinagem e soldagem, o aço Hadfield continua sendo o material de escolha para aplicações de desgaste exigentes, devido à sua combinação única de tenacidade e propriedades de endurecimento. A pesquisa em andamento visa melhorar seu desempenho em condições de desgaste abrasivo e de impacto, particularmente nas indústrias de mineração e processamento mineral.

2 ENGENHARIA DO AÇO AUSTENÍTICO MANGANÊS HADFIELD: PROPRIEDADES E APLICAÇÕES

O aço austenítico de manganês Hadfield é uma liga de alta resistência e resistente à abrasão, caracterizada por sua tenacidade e excepcional capacidade de endurecimento, amplamente utilizada nas indústrias de mineração, cimento e ferrovias. Sua composição, normalmente 1–1,4% em peso de carbono e 10–14% em peso de manganês, garante resistência superior ao desgaste e ductilidade sob estresse. A precisão na fundição é crítica, com temperaturas de fusão controladas em fornos de indução e o uso de materiais de moldagem como olivina ou areia de cromita influenciando o tamanho do grão

e as propriedades mecânicas. O manganês estabiliza a austenita e aumenta a resistência à abrasão, enquanto o carbono e o cromo influenciam a formação de carboneto, a resistência ao desgaste e a tenacidade. Tratamentos térmicos e ligas otimizados são essenciais para equilibrar as propriedades mecânicas e prevenir defeitos, reforçando sua relevância em aplicações de engenharia (Minatto, Costaa, & Daleffe, 2020; Sabzi & Farzam, 2019).

O aço austenítico manganês Hadfield exibe uma microestrutura totalmente austenítica, embora os processos de fundição geralmente levem à formação de carboneto nos limites dos grãos e dentro dos grãos devido à segregação de carbono. Esses carbonetos afetam negativamente a tenacidade e a ductilidade, especialmente em seções espessas onde a baixa condutividade térmica reduz as taxas de têmpera. Tratamentos térmicos, como austenitização a 950 ° C a 1000 ° C e resfriamento rápido em banhos de água ou sal, são empregados para dissolver carbonetos e melhorar as propriedades mecânicas. O acúmulo de deslocamento e a geminação mecânica, em vez de transformações martensíticas, são os principais mecanismos que impulsionam o endurecimento por trabalho, que é crítico para a resistência ao desgaste (Silva, Teixeira, Siqueira, & Lacerda, 2024; Teixeira, de Lacerda, Florêncio, et al., 2023). Tratamentos de superfície como shot peening melhoram a dureza da superfície, mas esse efeito diminui em direção ao núcleo mais macio (Nascimento & Teixeira, 2024). Além disso, o tratamento térmico inadequado pode resultar em fases quebradiças como Fe₃C ou perlita, afetando ainda mais o desempenho. O gerenciamento térmico eficaz durante o tratamento térmico é essencial para evitar defeitos causados pela expansão térmica e baixa condutividade térmica, particularmente em ligas com alto teor de carbono (Okechukwu et al., 2017).

O aço Hadfield enfrenta desafios na soldabilidade devido à precipitação de carboneto, particularmente nos contornos de grão, levando à fragilização e fragilidade na zona afetada pelo calor (HAZ). O controle adequado da temperatura durante a soldagem e o tratamento térmico, como a solução a 1050 ° C seguida de têmpera rápida, ajuda a manter sua microestrutura austenítica. Sua usinabilidade é prejudicada pela alta capacidade de endurecimento por deformação e baixa condutividade térmica, causando rápido desgaste da ferramenta, embora a usinagem a quente (300 ° C - 420 ° C) e ferramentas de corte avançadas melhorem o desempenho. Apesar desses problemas, o aço Hadfield continua sendo o material de escolha para aplicações de desgaste devido à sua combinação única de tenacidade e propriedades de endurecimento, superando alternativas como ferro dúctil austemperado e ferro fundido branco com alto teor de cromo. Os pesquisadores defendem componentes econômicos de desgaste de revestimento duro adaptados para indústrias abrasivas e de impacto intensivo (Okechukwu et al., 2017).

O aço Hadfield enfrenta desafios na soldabilidade devido à precipitação de carboneto, particularmente nos contornos de grão, levando à fragilização e fragilidade na zona afetada pelo calor (HAZ). O controle adequado da temperatura durante a soldagem e o tratamento térmico, como a

solução a 1050 ° C seguida de têmpera rápida, ajuda a manter sua microestrutura austenítica. Sua usinabilidade é prejudicada pela alta capacidade de endurecimento por deformação e baixa condutividade térmica, causando rápido desgaste da ferramenta, embora a usinagem a quente (300 ° C - 420 ° C) e ferramentas de corte avançadas melhorem o desempenho. Apesar desses problemas, o aço Hadfield continua sendo o material de escolha para aplicações de desgaste devido à sua combinação única de tenacidade e propriedades de endurecimento, superando alternativas como ferro dúctil austemperado e ferro fundido branco com alto teor de cromo. Os pesquisadores defendem componentes econômicos de desgaste de revestimento duro adaptados para indústrias abrasivas e de impacto intensivo (Kalandyk, Zapała, Tęcza, & Sobula, 2014; Okechukwu et al., 2017).

O estudo realizado por Pinto Junior, Teixeira e Silva (2024) envolveu uma análise bibliométrica da literatura científica sobre microestruturas de aço, propriedades mecânicas e técnicas de processamento. Utilizando bases de dados como Taylor & Francis, Springer, Wiley e ScienceDirect, 11 dos 32 artigos foram selecionados para uma revisão integrativa seguindo o protocolo PRISMA. As principais descobertas destacaram a influência significativa dos métodos de processamento, tratamentos térmicos e composições de ligas nas propriedades do aço, incluindo aços de alta resistência, resistentes ao desgaste e Hadfield. Tópicos como endurecimento induzido por deformação, manufatura aditiva e tratamentos criogênicos foram enfatizados. Os resultados ressaltam o papel fundamental da evolução microestrutural no aprimoramento das propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, refletindo os avanços contínuos na metalurgia e na engenharia de materiais.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em conclusão, o aço austenítico manganês Hadfield continua a ser um material vital em aplicações de engenharia, particularmente em indústrias que exigem alta resistência ao desgaste e tenacidade, como os setores de mineração, ferrovia e cimento. Apesar de suas propriedades notáveis, os desafios relacionados à precipitação de carboneto e à usinabilidade reduzida continuam sendo um foco significativo de pesquisa. Os avanços nas técnicas de tratamento térmico e liga, como solução e têmpera rápida, provaram ser eficazes no controle da formação de metal duro e no aprimoramento das propriedades mecânicas do aço. Além disso, tratamentos de superfície como shot peening foram explorados para melhorar a dureza da superfície, embora seus benefícios diminuam em direção ao núcleo do material. A pesquisa em andamento continua a refinar o equilíbrio entre melhorar a resistência ao desgaste e abordar questões como fragilização, soldabilidade e usinabilidade, garantindo que o material continue sendo uma opção confiável em aplicações exigentes.

A evolução contínua das propriedades do aço Hadfield é uma prova da eficácia das práticas modernas de engenharia na otimização de materiais para requisitos industriais específicos. Embora persistam desafios em sua soldabilidade e usinagem, inovações em ferramentas de corte, processos de



tratamento térmico e técnicas de endurecimento de superfície estão contribuindo para superar essas limitações. Pesquisas, incluindo estudos bibliométricos como os conduzidos por Pinto Junior, Teixeira e Silva (2024), continuam a destacar a importância de entender os mecanismos microestruturais subjacentes e os parâmetros de processamento que governam o desempenho do aço. O desenvolvimento contínuo de métodos de produção e processamento mais eficientes promete aumentar ainda mais a versatilidade e o desempenho do material, garantindo seu lugar nas indústrias que dependem de materiais resistentes ao desgaste.



REFERÊNCIAS

KALANDYK, B.; ZAPAŁA, R.; TEĆZA, G.; SOBULA, S. Effect of heat treatment on change microstructure of cast high-manganese Hadfield steel with elevated chromium content. *Archives of Foundry Engineering*, v. 14, n. 3 spec, p. 67–70, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1515/afe-2015-0033>. Acesso em: 4 dez. 2024.

DASTUR, Y. N.; LESLIE, W. C. Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel. *Metallurgical Transactions A*, v. 12, n. 5, p. 749–759, 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02648339>. Acesso em: 4 dez. 2024.

GORLENKO, D.; VDOVIN, K.; FEOKTISTOV, N. Mechanisms of cast structure and stressed state formation in Hadfield steel. *China Foundry*, v. 13, n. 6, p. 433–442, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41230-016-6105-8>. Acesso em: 4 dez. 2024.

LACERDA, J. C. de; TEIXEIRA, R. L. P.; ROCHA, A. G.; da SILVA, D. F. R.; SOUSA, V. S. R. Effect of metal inert gas arc welding on mechanical properties of a UNS S41003 stainless steel. *Revista E-TECH: Tecnologias Para Competitividade Industrial*, v. 16, n. 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.18624/etech.v16i1.1276>. Acesso em: 4 dez. 2024.

MINATTO, R. M.; COSTA, A. F. da; DALEFFE, A. Estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo de baixa tensão de três ligas metálicas aplicadas em revestimento duro sobre aço manganês Hadfield. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 11, p. 84267–84278, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n11-004>. Acesso em: 4 dez. 2024.

NASCIMENTO, M. F. T.; TEIXEIRA, R. L. P. Influência do jateamento com microesferas de vidro nas propriedades superficiais do aço inoxidável AISI 316L grau ASTM F138. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, v. 11, p. e024043, 2024. Disponível em: <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/1628>. Acesso em: 4 dez. 2024.

OKECHUKWU, C.; DAHUNSI, O. A.; OKE, P. K.; OLADELE, Í. O. et al. Prominence of Hadfield Steel in Mining and Minerals Industries: A Review. *International Journal of Engineering Technologies IJET*, v. 3, n. 2, p. 83–90, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.19072/ijet.299068>. Acesso em: 4 dez. 2024.

PINTO JUNIOR, A. F.; TEIXEIRA, R. L. P.; SILVA, P. C. D. Advances in heat treatment and microstructural optimization of Hadfield steel for enhanced wear resistance. *Revista De Gestão Social E Ambiental*, v. 18, n. 11, p. e09651, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n11-206>. Acesso em: 4 dez. 2024.

SABZI, M.; FARZAM, M. Hadfield manganese austenitic steel: A review of manufacturing processes and properties. *Materials Research Express*, v. 6, n. 10, p. 1065c2, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3ee3>. Acesso em: 4 dez. 2024.

SILVA, E. M. da; TEIXEIRA, R. L. P.; COSTA, S. C. da; CORRÊA, E. O.; RIBEIRO, R. B. Stress-corrosion cracking behavior of AISI-409 welded with a filler metal flux cored AWS E316LT1-4. *Materials Research*, v. 27, p. e20230418, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2023-0418>. Acesso em: 4 dez. 2024.

SILVA, L. G. F.; TEIXEIRA, R. L. P.; SIQUEIRA, G. O.; LACERDA, J. C. Design Thinking for scientific initiation in research on the TRIP effect in materials science. *Brazilian Journal of Education, Technology and Society (BRAJETS)*, v. 17, n. 3, p. 1050–1064, 2024. Disponível em: <https://www.brajets.com/index.php/brajets/article/view/1514>. Acesso em: 4 dez. 2024.



TEIXEIRA, R. L. P.; DAMASCENO, A. I. P.; de LACERDA, J. C. Applications and properties of ferritic stainless steels with laser welding: Aplicações e propriedades de aços inoxidáveis ferríticos com soldagem a laser. *Concilium*, v. 24, n. 18, p. 155–167, 2024. Disponível em: <https://clium.org/index.php/edicoes/article/view/4077>. Acesso em: 5 dez. 2024.

TEIXEIRA, R. L. P.; de LACERDA, J. C.; FLORENCIO, K. C.; et al. TRIP effect produced by cold rolling of austenitic stainless steel AISI 316L. *Journal of Materials Science*, v. 58, n. 2, p. 3334–3345, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08235-7>. Acesso em: 4 dez. 2024.