

Avaliação dos efeitos do tratamento térmico de têmpera no aço *hadfield* com resfriamento em água e óleo: Estudo com dente de caçamba reaproveitado

Evaluation of the effects of tempering heat treatment on hadfield steel with water and oil cooling: Study with reused bucket tooth

Evaluación de los efectos del tratamiento térmico de revenido en acero hadfield con refrigeración por agua y aceite: Estudio con diente de cuchara reutilizado

Recebido: 05/06/2025 | Revisado: 15/06/2025 | Aceitado: 16/06/2025 | Publicado: 19/06/2025

Daniel Chiongo Tchicusse

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2212-1327>

Universidade do Namibe, Angola

E-mail: daniel.chiongo@gmail.com

Resumo

Este artigo tem o objetivo de apresentar a investigação e resultados dos efeitos dos tratamentos térmicos de têmpera no aço manganês austenítico, visando melhorar suas propriedades mecânicas, particularmente a dureza e a tenacidade, proporcionando mais tempo de vida útil e uma redução nos custos operacionais. Entretanto, o aço manganês é amplamente utilizado em ambientes de alta abrasão devido à sua excelente resistência ao desgaste, mas suas propriedades podem ser otimizadas por meio de tratamentos térmicos adequados. Para alcançar esse objetivo, os corpos de prova de aço manganês foram submetidas a um processo de têmpera a 1100°C com um tempo de permanência no interior do forno de até 1 hora. No entanto, os meios de resfriamento utilizado no processo foram água e óleo. Os resultados mostraram um aumento significativo na dureza após a têmpera com resfriamento a água, e uma redução na têmpera em óleo. As conclusões desta investigação indicam que a têmpera em água é um tratamento térmico eficaz para melhorar a dureza do aço Hadfield, aumentando o tempo de vida útil do material.

Palavras-chave: Tratamentos térmicos; Aço Hadfield; Têmpera; Temperatura; Resfriamento.

Abstract

This article aims to present the investigation and results of the effects of tempering heat treatments on austenitic manganese steel, with the aim of improving its mechanical properties, particularly hardness and toughness, providing longer service life and a reduction in operating costs. However, manganese steel is widely used in high abrasion environments due to its excellent wear resistance, but its properties can be optimized through appropriate heat treatments. To achieve this objective, the manganese steel specimens were subjected to a quenching process at 1100°C with a residence time inside the furnace of up to 1 hour. However, the cooling media used in the process were water and oil. The results showed a significant increase in hardness after quenching with water cooling, and a reduction in oil quenching. The conclusions of this investigation indicate that water quenching is an effective heat treatment to improve the hardness of Hadfield steel, increasing the service life of the material.

Keywords: Heat treatments; Hadfield steel; Tempering; Temperature; Cooling.

Resumen

Este artículo presenta la investigación y los resultados de los efectos de los tratamientos térmicos de temple en acero austenítico al manganeso, con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas, en particular la dureza y la tenacidad, proporcionando una mayor vida útil y una reducción en los costos operativos. Si bien el acero al manganeso se utiliza ampliamente en entornos de alta abrasión debido a su excelente resistencia al desgaste, sus propiedades pueden optimizarse mediante tratamientos térmicos adecuados. Para lograr este objetivo, las muestras de acero al manganeso se sometieron a un proceso de temple a 1100 °C con un tiempo de residencia en el horno de hasta 1 hora. No obstante, los medios de enfriamiento utilizados en el proceso fueron agua y aceite. Los resultados mostraron un aumento significativo de la dureza tras el temple con enfriamiento por agua y una reducción del temple en aceite. Las conclusiones de esta investigación indican que el temple con agua es un tratamiento térmico eficaz para mejorar la dureza del acero Hadfield, aumentando así su vida útil.

Palabras clave: Tratamientos térmicos; Acero Hadfield; Revenido; Temperatura; Enfriamiento.

1. Introdução

A pesquisa científica desempenha um papel fundamental no avanço do conhecimento em diversas áreas, proporcionando uma base sólida para decisões informadas e inovações. Um tipo particular de aço é o aço austenítico com alto teor de manganês, contendo 1–1,4% em peso de C e 10–14% em peso de Mn, ou aço Hadfield, foi inventado em 1882 por Sir Robert Hadfield, no contexto de avaliação dos efeitos do tratamento térmico de têmpera no aço Hadfield com diferentes meios de resfriamento utilizado neste estudo com dente de caçamba reaproveitado, é crucial compreender que os aços são ligas de ferro com uma pequena quantidade de carbono e outros elementos de liga, como silício, manganês, cromo, níquel, entre outros. São os materiais metálicos mais utilizados em diversas indústrias devido à sua versatilidade, resistência, maleabilidade e facilidade de fabricação (Ayadi & Hadj, 2019).

Podem ser classificados de acordo com sua composição química, propriedades mecânicas, aplicação final ou método de fabricação. A classificação mais comum é baseada na composição química e na quantidade de carbono presente, resultando em aços carbono, aços de baixa liga e aços inoxidáveis, por exemplo. As propriedades dos aços podem variar significativamente com a composição química, o tratamento térmico e o processo de fabricação. No entanto, algumas propriedades gerais incluem alta resistência mecânica, tenacidade, ductilidade, maleabilidade, resistência à corrosão e condutividade elétrica (Mourão et al., 2007; Callister & Rethwisch, 2014).

Desde o desenvolvimento do Aço manganês austenítico também conhecido por Aço Hadfield, tem sido amplamente utilizado até aos dias atuais, em aplicações que requerem elevada resistência à abrasão e ao impacto, em alguns casos com pequenas modificações em sua composição e no tratamento térmico, para ser submetido à componentes sujeitos a desgaste, como os dentes de caçambas de escavadeiras e revestimentos de britadores, mineração, ferrovias, movimentação de terras devido à sua elevada tenacidade e ductilidade relacionado a sua elevada capacidade de endurecimento sob impacto (Andrade, 2015; Ayadi & Hadj, 2019).

Os aços são ligas metálicas composta principalmente por Ferro e Carbono, e com adição de alguns elementos de ligas e geralmente possui uma percentagem de Carbono abaixo de 1% (Pinto Jr. et al., 2018). No entanto, o aço Hadfield é um aço austenítico de alto manganês, largamente empregado na produção de peças fundidas expostas a impacto e abrasão, como componentes de equipamentos para mineração, e, um dos precursores desse tipo de aço foi Hadfield, cujo nome identifica o tipo por ele desenvolvido, com 1,2% de carbono e 12% de manganês sendo o principal do grupo de aços resistentes ao desgaste, até aos dias de hoje (Chiaverini, 2005).

Tratamentos térmicos dos aços são operações de aquecimento e arrefecimento de maneira controlada, com o intuito de otimizar as suas propriedades sem, contudo, alterar a sua composição química (Costa & Mei, 1988). No entanto, Callister e Rethwisch (2014) afirmam que:

As transformações de fases podem ser realizadas em sistemas de ligas metálicas mediante uma variação na temperatura, ou na composição ou ainda na pressão externa; entretanto, as variações na temperatura por meio de tratamentos térmicos constituem a maneira mais convenientemente utilizada para induzir transformações de fases. Isso corresponde a cruzar uma fronteira entre fases, no diagrama de fases composição-temperatura, na medida em que uma liga com uma dada composição é aquecida ou resfriada (p. 407).

Os Tratamentos térmicos são feitos com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes determinadas características, principalmente com objetivos de remoção de tensões (oriundas de esfriamento, trabalho mecânico ou outra causa), aumento ou diminuição da dureza, aumento da resistência mecânica, melhora da ductilidade, melhora da usinabilidade, melhora da resistência ao desgaste; melhora das propriedades de corte, melhora da resistência à corrosão; melhora da resistência ao calor; modificação das propriedades elétricas e magnéticas (Chiaverini, 2005).

Dentre vários tipos de tratamentos térmicos existentes podemos destacar o recozimento, normalização, têmpera e revenimento, entretanto, os três primeiros envolvem transformações de fases a partir da austenita onde podemos obter as diferentes propriedades, desde o máximo de ductilidade e o mínimo de dureza até os elevados valores de dureza e menor ductilidade associados à martensita (Costa & Mei, 1988). De acordo os mesmos autores (1988) o recozimento é um tratamento térmico visa basicamente diminuir a dureza do material, ao passo que a têmpera consiste em resfriar o aço a partir da temperatura de austenitização de brusca e sem cruzar a curva TTT (tempo, temperatura e transformação), para obtenção da microestrutura martensítica que é a da elevada dureza nos aços. E posteriormente, o tratamento térmico de revenimento é um tratamento subsequente aos aços termicamente temperados.

Têmpera refere-se ao processo de resfriamento rápido de peças metálicas a partir da temperatura de austenitização, no entanto, os materiais podem ser temperados em óleo que pode conter uma variedade de aditivos, água, soluções aquosas de polímeros e água que pode conter sal ou aditivos cáusticos. A capacidade de endurecimento do aço por meio deste processo depende das características do meio de resfriamento, da composição do aço ou das condições de uso do agente de têmpera, bem como, a meticulosidade com que o sistema é mantido (ASM INTERNATIONAL, 1991).

Diversos autores destacam a relevância de Tratamentos térmicos de têmpera sobre os vários tipos de aços, abordando as principais propriedades obtidas por meio do mesmo tratamento como, aumento de dureza e a elevada resistência mecânica e para melhorar ainda mais a microestrutura e aliviar as tensões internas causadas pelo tratamento de têmpera submetê-los a um procedimento de revenimento. Por exemplo, Silveira et al. (2018) realizaram um estudo no qual analisaram as propriedades mecânicas do aço ABNT 8640 submetido ao tratamento térmico de têmpera, utilizando água como meio de resfriamento. O trabalho foi publicado na *Revista Holos*, edição de junho de 2018. Os autores argumentam que o tratamento resultou no aumento da dureza dos corpos de prova, bem como em alterações na microestrutura, especialmente na redução do tamanho de grão.

Outros estudos realizados por Rios et al. (2025), complementam ao discutir sobre o efeito do tratamento térmico de recozimento, normalização, têmpera e revenimento na microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 4140, no entanto, apesar dos avanços identificados na literatura, ainda existem lacunas significativas. Estas incluem tratamentos térmicos de têmpera e revenimento do aço Hadfield, que limitam a aplicabilidade ou abrangência das teorias existentes. É neste contexto que o presente estudo se propõe a contribuir, abordando tratamento térmico de têmpera no aço Hadfield, utilizando diferentes meios de resfriamento e dente de çaçamba reaproveitado como estudo de caso.

Por outro lado, os avanços recentes têm proporcionado novos entendimentos e ferramentas para melhorar as diversas propriedades dos aços, como demonstrado por Gürol e Kocaman (2025), que investigaram os efeitos de diferentes tratamentos térmicos no comportamento à corrosão de um aço austenítico de alto manganês com adição de molibdênio. Tais avanços abrem novas possibilidades para investigar como processos como a dupla solubilização podem influenciar positivamente a formação de microestruturas mais homogêneas e a geração de óxidos protetores ricos em molibdênio, elevando significativamente a resistência à corrosão desses materiais em aplicações industriais severas.

Diante da importância do Aço Hadfield e dos tratamentos térmicos em sua otimização, este estudo propõe uma avaliação sistemática dos efeitos da têmpera, utilizando uma temperatura de austenitização de 1100 °C e diferentes meios de resfriamento (água e óleo), visando avaliar os efeitos do tratamento térmico de têmpera, com diferentes meios de resfriamento, nas propriedades mecânicas (dureza) do mesmo aço.

Os resultados esperados contribuirão não apenas para o avanço do conhecimento técnico e científico na área da engenharia de materiais, fornecendo subsídios para a escolha adequada dos parâmetros de têmpera com o objetivo de otimizar o desempenho do aço Hadfield em aplicações industriais críticas. Além disso, a pesquisa também visa preencher lacunas na

literatura técnica, ao investigar como diferentes meios de resfriamento influenciam diretamente a dureza e a estabilidade microestrutural deste aço.

A relevância deste estudo está fundamentada em sua contribuição para diversos setores industriais que utilizam o aço Hadfield em condições severas de desgaste e impacto, como a mineração, construção civil, metalurgia, processamento de materiais e fabricação de equipamentos pesados.

Este artigo tem o objetivo de apresentar a investigação e resultados dos efeitos dos tratamentos térmicos de têmpera no aço manganês austenítico, visando melhorar suas propriedades mecânicas, particularmente a dureza e a tenacidade, proporcionando mais tempo de vida útil e uma redução nos custos operacionais.

2. Metodologia

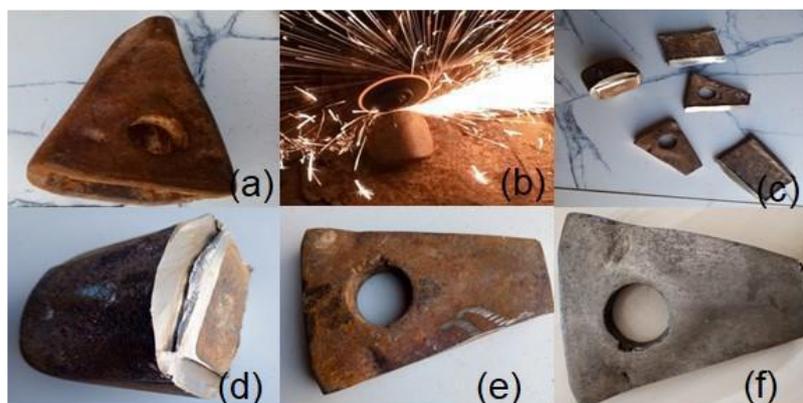
Para que o conhecimento possa ser considerado científico, é necessário determinar o método que possibilitou chegar a este conhecimento, no entanto, o conjunto de conhecimentos intelectuais e técnicos adotados para a realização deste estudo é definido então como método científico (Gil, 2002).

O tipo de pesquisa utilizado neste estudo foi exploratório, laboratorial, experimental e de natureza quantitativa (Pereira et al., 2018). A abordagem exploratória permitiu a obtenção de informações relevantes disponíveis na literatura, as quais serviram de base para a condução do trabalho, enquanto que a natureza experimental do estudo se manifesta na aplicação prática do tratamento térmico de têmpera e na realização de testes de dureza para avaliar os efeitos desse processo nas propriedades do aço Hadfield.

Os materiais foram escolhidos com base em sua capacidade de atender aos requisitos específicos dos procedimentos experimentais, garantindo resultados confiáveis e representativos. Desde os corpos de prova até os equipamentos de laboratório utilizados, cada componente desempenha um papel fundamental na condução dos tratamentos térmicos e análises subsequentes. Por se tratar de uma amostra de campo, sem acesso a dados oficiais sobre a composição química ou a especificação exata do aço, o trabalho assume um carácter aplicado, focando em condições próximas à realidade enfrentada por oficinas e sectores de manutenção.

Foi realizada uma preparação adequada os corpos de prova antes dos ensaios de dureza, entretanto, o material foi cortado em dimensões apropriadas para os experimentos, como mostra a Figura 1 e Quadro 1, respectivamente, e com superfícies preparadas, sendo crucial para garantir resultados precisos.

Figura 1 - Corte do material e Preparação da Superfície: dente de caçamba (a), o momento do corte (b), divisão após o corte (c, d, e), material preparado superficialmente (f).



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2025).

Inicialmente, os corpos de prova foram cortados usando uma Rebarbadora, conforme a Figura 1b e 1c, respetivamente, em seguida os corpos de prova foram montados em suportes adequados para lixamento. As superfícies os corpos de prova foram então lixados em uma série de etapas, começando com lixas grossas e progredindo gradualmente para lixas mais finas, até alcançar uma superfície lisa e uniforme.

Os principais equipamentos empregues na realização deste trabalho foram o forno eléctrico de tratamento térmico (ver Figura 2), o durómetro Brinell, conforme a Figura 3, para medição da dureza e os meios de resfriamento utilizados neste estudo foram a água fria e o óleo mineral.

Para a realização do tratamento térmico de têmpera em óleo, foi utilizado como meio de resfriamento o óleo mineral **Galp Fórmula H 10W-30**, no entanto, apesar de este óleo não ser especificamente formulado para operações metalúrgicas, como a têmpera de aços, sua utilização neste experimento justificou-se pela sua maior disponibilidade e pelas propriedades físico-químicas adequadas a uma taxa de resfriamento moderada. O uso deste óleo visou avaliar os efeitos da têmpera em condições não convencionais, com foco na influência sobre a microestrutura e a dureza do aço Hadfield, e permitiu observar possíveis limitações ou vantagens do emprego de óleos alternativos em ambientes experimentais ou com recursos limitados.

Figura 2 - Forno Mufla da Nabertherm.



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2025).

A dureza pode ser definida como uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica (permanente) localizada (pequena impressão ou risco), no entanto, os ensaios de dureza são de fácil e rápida execução e de custo relativamente acessível. Os ensaios de dureza relevantes e mais utilizados na indústria dos tratamentos térmicos são, Vickers, Rockwell, Brinell, Knoop.

Para esta pesquisa foi utilizada apenas os ensaios de dureza Brinell, sendo o método que utiliza uma esfera de aço temperado ou de carboneto de tungsténio, com um determinado diâmetro. A esfera é pressionada sobre a amostra, polida e limpa, com uma determinada carga, durante um tempo. No final a calote esférica marcada na amostra tem um determinado diâmetro. A dureza Brinell é representada pelas letras HB (Hardness Brinell) pela seguinte fórmula:

$$HB = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Onde:

- F= forças de teste (N)
- D= diâmetro da bola de carboneto de tungsténio (mm)
- d= diâmetros de recuo ao longo de duas direcções perpendiculares (mm)

Os diâmetros da esfera variam de 1 à 10mm. As cargas utilizadas podem variar entre os 500 e os 3000kgf, com tempo de carga entre os 10 e 30s (Silva, 2020 & Groover, 2010).

Figura 3 - Durômetro Brinell.



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2025).

O Tratamento térmico é definido como o ciclo de aquecimento ou arrefecimento controlado dos metais com finalidade de alterar suas propriedades físicas e mecânicas, sem alterar o produto final e a composição química. Entretanto, tanto na têmpera quanto em outros tratamentos térmicos, é desenrolada em três fases: O aquecimento, o estágio à temperatura de têmpera, e o arrefecimento.

Uma limitação significativa deste estudo foi a questão relacionada com a microestrutura do material e a falta informações relacionadas à composição química do material. Apesar de não se realizar um estudo microestrutural utilizando técnicas avançadas como o microscópio eletrônico de varredura (MEV) ou microscópio eletrônico de transmissão (MET), para observar a microestrutura formada após os tratamentos térmicos, ainda assim os resultados obtidos estão embasados na literatura. Entretanto, a dureza obtida após tratamento térmico de têmpera pode ser considerada como um reflexo das transformações microestruturais ocorridas, e as alterações como formação de martensita ou revenido de estruturas bainíticas estão diretamente relacionados com os valores de dureza observados (Totten, 2006).

Mesmo na ausência de análises químicas e metalográficas, a investigação foi conduzida com base em tratamentos térmicos práticos e acessíveis, proporcionando contribuições relevantes para o meio científico ao preencher lacunas existentes sobre tratamentos térmicos aplicados a materiais comumente utilizados no dia a dia das indústrias de mineração, metalurgia, construção civil, entre outras que empregam componentes como os dentes de caçamba.

3. Resultados e Discussões

A seguir, são discutidos os principais achados decorrentes dos ensaios de dureza realizados após os tratamentos térmicos aplicados ao aço Hadfield. Para avaliar os efeitos de têmpera no mesmo aço com diferentes meios de resfriamento, foi necessário, primeiramente, realizar a coleta de dados iniciais. Assim, foram efetuados ensaios de dureza Brinell nos corpos de prova (CP's) ainda no estado bruto, a fim de que os resultados obtidos após os tratamentos térmicos pudessem ser comparados de forma adequada. Essa etapa inicial permitiu estabelecer uma base de referência para a análise das alterações nas propriedades mecânicas decorrentes dos diferentes meios de resfriamento utilizados. Depois dos ensaios de dureza Brinell, foram obtidos os seguintes resultados como mostra o Quadro 1, relacionados aos dois (2) corpos de prova.

Quadro 1 - Dados de Ensaio de dureza Brinell da primeira amostra do estudo.

Material	Força aplicada (kgf)	Tempo aplicado (s)	Dentador (mm)	Dureza(kgf/mm)	Resfriamento
CP- 1	3000	10	10	487	Óleo
CP- 2	3000	10	10	418.3	Água

Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2025).

Tendo feito estes procedimentos, os três (3) corpos de prova foram colocados no interior da Mufla com uma temperatura ambiente de 42 °C, e logo foi feita a programação do forno no painel de controle, de destacar que a mesma Mufla possui um controlador B150, e nesta programação foi inserida os seguintes dados:

$T_a = 42\text{ °C}$; $T_1 = 1\ 100\text{ °C}$; $t_1 = 1\text{ h}$; e $t_2 = 1\text{ h}$.

Onde:

T_a = Temperatura ambiente;

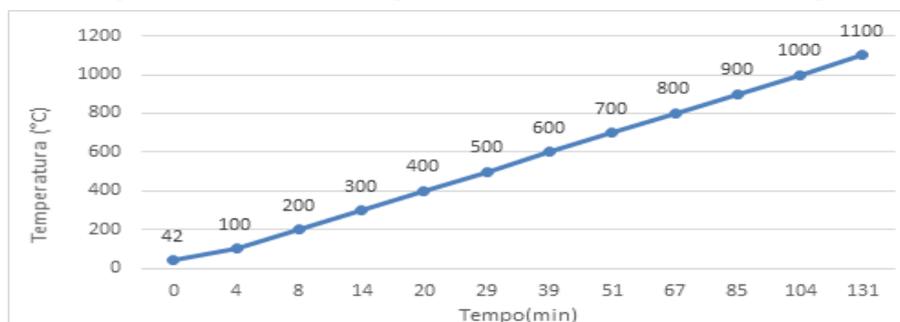
T_1 = Temperatura de patamar;

t_1 = refere-se ao tempo percorrido até atingir a temperatura de patamar pretendida;

t_2 = refere-se ao tempo de permanência após atingir a temperatura de patamar de qualquer tratamento.

Vale dizer que a temperatura de patamar de 1 100 °C foi alcançada em 2 horas e 2 minutos, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Variação da Temperatura (1 100 °C) em Função do Tempo.



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2025).

Tendo terminado o tempo de permanência no forno que foi de 1 100°C em 1 hora, se retirou os corpos de prova do forno como mostra a Figura 5, e o posterior arrefecimento brusco em água, óleo e ao meio ambiente dos corpos de prova um (1), dois (2) e três (3), respectivamente, conforme mostrado na Figura 6. No entanto, o corpo de prova um (1) foi feito o arrefecimento em água e ainda dentro do recipiente foi se fazendo movimentos circulares da água com o corpo de prova prendida na pinça, permanecendo nestas condições em um período de 3 minutos, e o corpo de prova dois (2) foi arrefecida bruscamente em um óleo sintético e tendo permanecido por um tempo de 10 minutos.

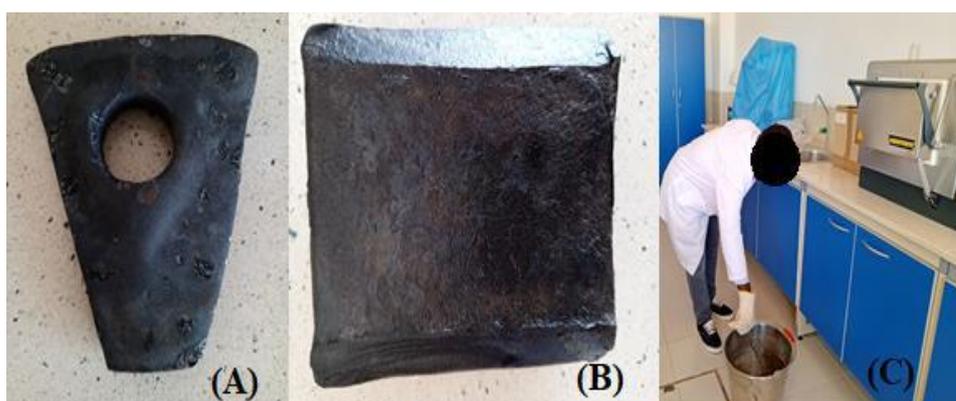
Figura 5 - Retirada do Aço Para o Devido Arrefecimento.



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2025).

Como resultado obtido após o tratamento dos dois (2) corpos de prova, apresenta-se na Figura 6, as alterações nas Propriedades físicas.

Figura 6 - Alterações dos materiais após tratamento térmico: material arrefecido em água (a), arrefecido em óleo (b) e processo de arrefecimento (c).



Fonte: Elaborado pelo próprio Autor (2025).

Mediante os tratamentos aplicados aos materiais, houve um aumento significativo após o tratamento de têmpera a 1100 °C com resfriamento em água de HB=418,3 para HB=481 indicando a eficiência deste processo para o aumento de dureza, mas o resfriamento em óleo foi diferente, havendo uma redução na dureza de HB=487,0 para HB=335,7.

A eficiência do tratamento térmico de têmpera com resfriamento a água, como é o caso deste estudo, não é apenas uma particularidade, mas muitos autores realizaram trabalhos semelhantes confirmando a eficiência da água em detrimento do óleo e meio ambiente, conforme um estudo realizado, em que foi utilizado o aço DIN18CrNiMo7-6, tendo sido tratado termicamente em água, óleo e meio ambiente, em que o resfriamento a água proporcionou melhores resultados, com uma dureza consideravelmente superior do que resfriamento em óleo e meio ambiente, respectivamente (Vicente et al., 2020 & Jesus et al., 2020).

Os resultados de dureza obtidos são amplamente aceitos como uma indicação confiável das transformações microestruturais resultantes dos tratamentos térmicos. A prática industrial e a literatura técnica confirmam que as alterações na dureza são diretamente correlacionadas às mudanças esperadas na microestrutura, como a formação de martensita durante a têmpera (Silva et al., 2020 & Junior et al., 2022).

O revenido é um tratamento que deve ser feito aos aços após a têmpera com o objetivo de aliviar as tensões internas e obter uma microestrutura que atenda às necessidades industriais, porque a microestrutura martensítica aumenta a dureza, mas torna o material frágil, de fato, poucos aços são usados no estado temperado. Por tanto, é por meio do revenimento que a fragilidade pode ser reduzida e a tenacidade aumentada, utilizando uma faixa de temperatura, aproximadamente de 120 a 675 °C (Patiño, 1996).

4. Conclusão

Neste estudo se investigou os efeitos do tratamento térmico de têmpera no aço Hadfield, utilizando o forno de tipo mufla e o durômetro Brinell para o tratamento térmico e medições de dureza. Os resultados mostraram que:

- Na revisão bibliográfica foi possível constatar quais dos tratamentos térmicos aplicados em aço Hadfield melhoram as propriedades mecânicas como dureza, resistência ao desgaste e tenacidade, no entanto, a têmpera com temperatura variadas entre 1000 °C e 1100 °C, é o tratamento ideal para aumentar a dureza do aço Hadfield, e é necessário o revenimento para aliviar as tensões causadas pelo processo de têmpera;
- O tempo de permanência e a temperatura de patamar têm grande influência na microestrutura do aço para a posterior formação da martensite, que fornece maior resistência e dureza do material;
- Dos tratamentos térmicos aplicados, o resfriamento a água obteve melhores resultados em comparação ao resfriamento em óleo.

Os resultados deste estudo demonstram que o tratamento térmico de têmpera com resfriamento em água é uma técnica eficaz para melhorar as propriedades mecânicas do aço Hadfield. Portanto, diversos estudos e práticas industriais confirmam que a dureza é um indicador direto das transformações microestruturais esperadas em tratamentos térmicos, entretanto, este estudo demonstrou o aumento de dureza para os materiais resfriado a água como um indicador de mudanças microestruturais.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço ao meu Criador, o Santo, bendito seja Ele por cuidar de mim e me dar forças neste projecto especial que apesar de muito trabalho e esforço envolvidos ainda consegui chegar até aqui. Seguidamente, quero agradecer aos meus Pais que me geraram Francisco Tchicusse e Francisca Catumbo Tchimanda por sempre estarem presentes na minha vida e em todos os momentos da minha jornada científica e nunca me desacreditaram, e à minha esposa Ana Segunda Capitango por estar sempre ao meu lado para me incentivar e me dar coragem quando tudo parece perdido.

Referências

- Andrade, G.T. (2015). *Resistência à abrasão Hadfield para retificadoras: efeito do tamanho do abrasivo e do pH médio*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.3.2016.tde-11072016-102946.
- ASM International (1991). *Heat treating* (Vol. 4). ASM Handbook Committee.
- Ayadi, S. & Hadji, A. (2019). Effect of Heat Treatments on the Microstructure and Wear Resistance of a Modified Hadfield Steel. *Metallfiz. Noveishie Tekhnol.* 41 (5): 607—20. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.05.0607>.
- Callister, W. D. & Rethwisch, D. G. (2016). *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. LTC—Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.
- Chiaverini, V. (2005). *Aços e ferros fundidos: características gerais tratamentos térmicos principais tipos*. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- Costa, A. L. & Mei, S. P. R. (1988) *Aços e ligas especiais*. Eletrometal S.A.
- Gil, A. C. (2002). *Como elaborar projetos de pesquisa*. Editora Atlas.

Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons, Inc.

Gürol, U. & Kocaman, E. (2025). Effect of different heat treatment procedures on the corrosion Behavior of high-manganese austenitic steels. *International Journal of Metalcasting*. <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01543-x>.

Jesus, S. S., Farah, A. F., Bovério, M. A., Farah, S. P. S. & Gomes, M. A. (2020). Influência do meio de resfriamento no tratamento térmico de têmpera, nas propriedades do Aço DOMEX 700MC. *SITEFA*, 3(1), 96–105. <https://doi.org/10.33635/sitefa.v3i1.128>.

Junior, M., Sachetto, J. P. & Farah, A. F. (2022). Análise da influência de tratamentos térmicos no desempenho de um aço sae 1095. Simpósio de Tecnologia (Sitefa). 5(1), 129-39. <https://doi.org/10.33635/sitefa.v5i1.219>.

Mourão, M. B., Yokoji, A., Malynowskyj, A., Leandro, C. A. S., Takano, C., Quites, E. E. C., Gentile, E. F., Lenz, G. F. B., Bolota, S. J. R., Gonçalves, M. & Facó, R. J. (2007) *Introdução a Siderurgia*. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

Patiño, J. A. P. (1996) Tratamientos termicos de los aceros. Tesis de Maestro, Universidad Autonoma de Nuevo Leon. <http://eprints.uanl.mx/435/1/1020115008.PDF>.

Pereira A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free e-book]. Editora da UAB/NTE/UFSM.

Pinto Jr, D. M., Shitsuka, D. M., Shitsuka, R. & Costa, W. L. (2018) *Tecnologia siderúrgica*. Editora Poisson.

Rios, C. T., Amaral, M. C. P. & Sousa, E. S. (2025). Efeito do tratamento térmico de recozimento, normalização e revenimento na microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 4140. *Brazilian Journal of Development*, 11, 1-14 <https://doi.org/10.34117/bjdv11n1-004>.

Silva, J. A. S. P. (2020). *Tratamentos Térmicos dos Aços: uma abordagem ao mundo dos tratamentos térmicos*. Quântica Editora—Conteúdos Especializados, Ltda.

Silva, L.R. C., Coêlho, C. C., Silva, M. S. & Filho, E. F. P. (2020). Análise da microestrutura e propriedade de dureza do aço SAE 1045 tratado termicamente por têmpera em diferentes meios de resfriamento. *Cadernos UniFOA, Volta Redonda*. (42), 13-21.

Silveira, F., Zuchetto, A., Ruppenthal, J. E. & Machado, F. M. (2018) Tratamento térmico de têmpera em aço ABNT 8640: análise das propriedades mecânicas. *HOLOS*, 2, 49-59. <https://doi.org/10.15628/holos.2018.5614>.

Totten, G. E. (2006). *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*. CRC Press.

Vicente, F. H., Domingos, W. S., Junior, A. C. M. V., Sami, M. I. J. & Meirelles, R. G. (2020). Tratamento térmico de tempera e revenido em diferentes meios de resfriamento do Aço DIN 18CrNiMo7-6. *SITEFA*, 3(1), 48–59. <https://doi.org/10.33635/sitefa.v3i1.107>.