

EFEITOS DO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO E TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇO DE BAIXO CARBONO

*Júlio França Almeida¹; Jose Aguiar dos Santos Junior¹
Carlos Otávio Damas Martins²; Sandro Griza²; Jaqueline Dias Altidis¹*

1. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Sergipe

2. Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe

RESUMO: A busca por aços com maior resistência tem desafiado continuamente cientistas metalúrgicos. A cementação é um processo termoquímico que consiste na adição de carbono à superfície do aço, com o intuito de aprimorar suas propriedades mecânicas. Durante a cementação, o material é aquecido a uma temperatura específica e exposto a uma atmosfera rica em carbono, permitindo que o elemento se difunda na microestrutura da superfície, formando uma camada superficial com maior dureza. Este estudo tem como objetivo analisar experimentalmente, por meio do ensaio de dureza Vickers, o aumento ou não da dureza na superfície de corpos de prova submetidos aos processos de cementação, têmpera e revenido, utilizando diferentes meios cementantes diamantina, carvão vegetal e couro animal sob as mesmas condições de temperatura e pressão. A partir desses dados, será realizada uma análise que relaciona o aumento da dureza ao custo de cada meio cementante, buscando identificar alternativas de menor custo que possam substituir o meio tradicional sem comprometer a eficiência do tratamento termoquímico.

Palavras-Chave: cementação; tempera; carbono; dureza.

1 INTRODUÇÃO

A busca pela obtenção de aços com propriedades mecânicas superiores é um tema amplamente estudado na metalurgia, especialmente em um cenário industrial cada vez mais exigente. Os aços são materiais fundamentais em diversas aplicações, desde estruturas de construção até componentes críticos em máquinas e equipamentos. Entre os métodos mais eficazes para melhorar as propriedades desses materiais, destaca-se a aplicação de tratamentos térmicos e termoquímicos, que são essenciais para garantir a durabilidade e a resistência dos produtos finais. A cementação, um dos tratamentos termoquímicos mais utilizados na indústria, é especialmente eficaz para aumentar a dureza superficial dos aços. Durante este processo, os corpos de prova são aquecidos a uma temperatura específica e expostos a uma atmosfera rica em carbono, permitindo que o elemento se difunda na microestrutura da superfície do material. Essa difusão resulta na formação de uma camada endurecida, que é responsável por proporcionar as propriedades mecânicas desejadas, enquanto mantém a ductilidade no núcleo da peça tratada (CHIAVERINI, 2008). O tratamento visa aprimorar não apenas a dureza, mas também a resistência ao desgaste e à corrosão, características cruciais para a aplicação de aços em ambientes agressivos.

A seleção adequada do meio utilizado como fonte de carbono é um aspecto crítico do processo de cementação. É fundamental criar uma atmosfera de tratamento com controle rigoroso da concentração dos elementos durante todo

o processo, a fim de garantir a difusão eficaz de carbono na superfície da peça e a criação de um gradiente de concentração desejável (YANG et al., 2017). Além da atmosfera, a temperatura deve ser cuidadosamente escolhida para evitar a fragilização do metal, que pode ocorrer se o tratamento for realizado na zona de temperatura crítica. A quantidade de carbono que se acumula na superfície também deve ser controlada, pois uma concentração inadequada pode comprometer a integridade estrutural do material (KAMBLE & TATKARE, 2015). O tempo de duração do tratamento é outro fator importante que deve ser ajustado às características desejadas da peça final. Estudos têm mostrado que ligas metálicas, após serem submetidas ao tratamento de cementação, podem apresentar melhorias significativas em propriedades como dureza e resistência ao desgaste, tornando-as adequadas para operar em condições de alta pressão e temperatura (KUBACZYK et al., 2020). Além disso, a cementação pode ser aplicada em componentes que exigem alta resistência à abrasão, como engrenagens, eixos e ferramentas de corte, ampliando assim a vida útil e a eficiência dos produtos.

Para otimizar o processo de cementação, recomenda-se que os aços a serem tratados possuam um baixo teor de carbono na liga, pois isso favorece a difusão do elemento na microestrutura (CHIAVERINI, 2008). Outro aspecto crucial é o coeficiente de difusão do carbono no aço, que representa a vazão dos átomos pelos retículos cristalinos, impactando diretamente a eficiência do tratamento (DA SILVA & JÚNIOR, 2019). Compreender esses parâmetros é fundamental para ajustar o tratamento de cementação, assegurando resultados que atendam às exigências das aplicações industriais. Além dos aspectos técnicos, a viabilidade econômica do processo de cementação também deve ser considerada. A escolha de meios cementantes alternativos e de baixo custo pode resultar em significativas reduções nos custos de produção, sem comprometer a qualidade do tratamento. Nesse sentido, pesquisas que explorem a eficácia de materiais como carvão vegetal e couro animal em comparação com meios tradicionais são essenciais para promover a sustentabilidade e a inovação na indústria metalúrgica.

2 METODOLOGIA

2.1. Objetivo da Pesquisa

O objetivo deste estudo é analisar experimentalmente o aumento da dureza na superfície de corpos de prova de aço submetidos ao tratamento de cementação, têmpera e revenido, utilizando diferentes meios cementantes: diamantina, carvão vegetal e couro animal.

2.2. Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa incluem:

Corpos de prova: Aços de baixo teor de carbono, conforme normas técnicas para garantir homogeneidade e reproduzibilidade dos resultados.

- Meios cementantes:
- Diamantina
- Carvão vegetal
- Couro animal

Equipamentos: Forno para tratamento térmico, sistema de controle de temperatura, e dispositivo de medição de dureza Vickers.

2.3. Preparação das Amostras

Para a realização deste estudo, foram escolhidos dois metais diferentes que serão tratados, iniciando-se pela preparação dos corpos de prova. Os passos da preparação incluem:

Corte dos Materiais: Os corpos de prova foram cortados em dimensões padronizadas utilizando uma máquina policorte Arotec, localizada no galpão do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Sergipe. Este equipamento assegura cortes precisos, fundamentais para garantir que a camada de cementação seja formada adequadamente durante o processo.

Lixamento das Amostras: Após o corte, as amostras passaram por um processo de lixamento para remover imperfeições superficiais e obter uma textura que favoreça a adesão do meio cementante. O lixamento foi realizado com lixas de grão fino, proporcionando uma superfície lisa e limpa, essencial para a realização da análise química e do tratamento termoquímico.

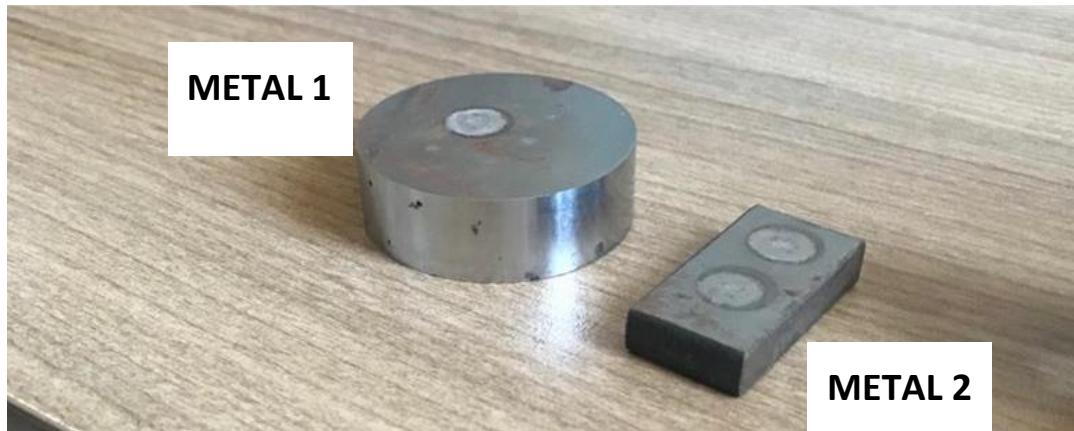
Análise Química: Antes do tratamento, as amostras foram submetidas a uma análise química para verificar a composição dos metais, garantindo que estivessem dentro dos parâmetros desejados para a realização do tratamento de cementação.

2.4. Análise Química

A análise química é um passo crucial para identificar a composição dos metais selecionados para a presente pesquisa. O tratamento de cementação é indicado para aços de baixo carbono, pois, neste tipo de metal, os retículos cristalinos permitem uma boa velocidade de difusão do carbono na microestrutura, favorecendo o endurecimento.

Para determinar a composição da liga metálica, foi realizada uma análise química no laboratório de metalografia no edifício do NUPEG, localizado na Universidade Federal de Sergipe. Essa análise foi conduzida utilizando espectrometria de emissão óptica. O procedimento incluiu a realização de 12 ataques químicos na superfície do Metal 1 e 6 ataques na superfície do Metal 2. Os resultados obtidos foram apresentados como a média dos teores dos elementos identificados durante os ensaios, permitindo uma caracterização precisa da composição dos materiais. Na Figura 1 podemos observar os metais que foram submetidos a análise química.

Figura 1: Metais submetidos a análise química



Fonte: Próprio Autor, 2024.

2.5. Tratamento Térmico

Após a preparação, os corpos de prova serão submetidos ao processo de cementação, seguido por têmpera e revenido. Os passos incluem:

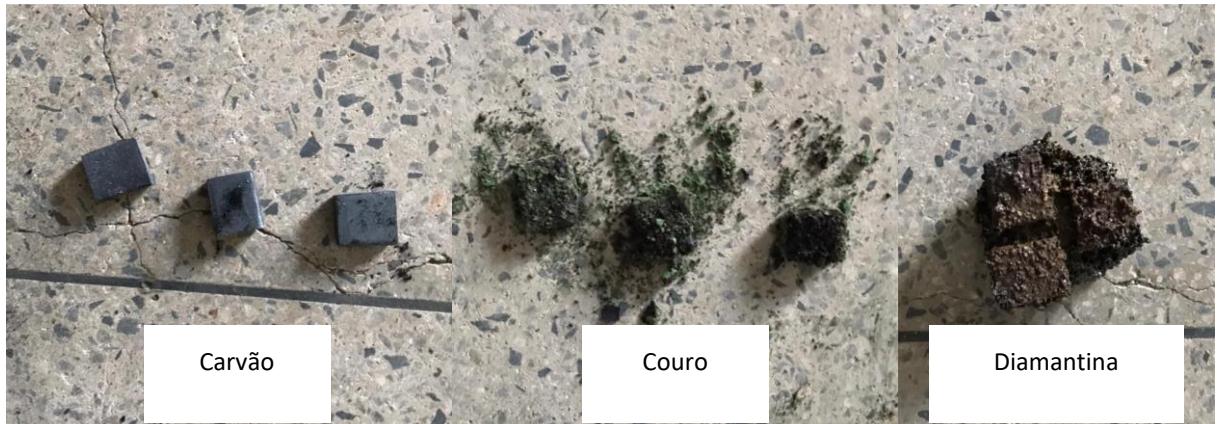
Cementação: As amostras serão aquecidas a uma temperatura especificada e expostas a uma atmosfera rica em carbono, utilizando os meios cementantes escolhidos. O controle da temperatura e do tempo de exposição será realizado com precisão para garantir a difusão adequada de carbono na superfície do material. Na Figura 2 podemos observar os corpos de provas depois do processo de cementação do aço 1043 e na Figura 3 podemos observar o aço 1020 depois do processo de cementação.

Figura 2: Corpos de prova do metal 1 - aço 1043 - após a cementação



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3: Corpos de prova do metal 2 - aço 1020 - após a cementação



Fonte: Próprio autor, 2023.

Têmpera e Revenido: Após a cementação, as amostras passarão por um processo de têmpera, que consiste no resfriamento rápido, seguido pelo revenido, que é um aquecimento controlado para aliviar tensões internas e melhorar a ductilidade.

2.6. Avaliação da Dureza

Após o tratamento, a dureza das amostras será medida utilizando o ensaio de dureza Vickers. Este método permitirá avaliar o aumento da dureza na superfície dos corpos de prova em comparação com o material original, fornecendo dados quantitativos sobre a eficácia dos diferentes meios cementantes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao analisar os dados da Tabela 1, podemos observar que os três meios cementantes apresentaram resultados distintos em termos de aumento da dureza superficial do aço 1043. A diamantina obteve o maior valor de dureza média (660 HV), seguido de perto pelo carvão vegetal (630 HV), enquanto o couro queimado apresentou o menor aumento na dureza (448 HV) e o aço sem nenhum tratamento (439HV).

Tabela 1: Valores médios de dureza obtidos para o aço ABNT 1043

Meio Cementante	Dureza Vickers (HV)
Diamantina	660
Carvão Vegetal	630
Couro Animal Queimado	448

Fonte: Próprio autor 2023

Como esperado, a diamantina apresentou o melhor desempenho, promovendo o maior aumento na dureza superficial do aço 1043. Isso pode ser atribuído à sua capacidade de fornecer uma fonte rica e estável de carbono para o processo de cementação, favorecendo uma difusão eficaz e uniforme do carbono na superfície do material. A dureza elevada obtida com esse meio é ideal para aplicações em que a resistência ao desgaste e a abrasão são requisitos críticos. O carvão vegetal, por outro lado, obteve resultados muito próximos aos da diamantina, com uma dureza média de 630 HV. Embora ligeiramente inferior, essa proximidade nos valores sugere que o carvão vegetal pode ser uma alternativa viável e eficiente em processos de cementação. Considerando o fator econômico, o carvão vegetal representa uma opção significativamente mais acessível. Em termos de custo-benefício, o carvão vegetal se destaca. Em relação ao preço da diamantina o carvão vegetal é 10 vezes mais barato que o pó de diamantina. Assim, o carvão vegetal apresenta uma boa solução para aplicações que exigem uma dureza aumentada, porém não máxima, sem comprometer o orçamento. O couro queimado, por sua vez, apresentou o menor aumento de dureza, com uma média de 444 HV. Embora não tenha alcançado valores comparáveis aos dos outros meios, é importante ressaltar que o couro pode ter limitações no fornecimento de carbono para a difusão na superfície do aço. Esse meio pode ser adequado para aplicações em que a leve melhoria da dureza é suficiente e não há necessidade de um nível de resistência elevado, como em componentes que não serão expostos a condições extremas de pressão ou abrasão.

Avaliando a relação entre desempenho e custo, o carvão vegetal destaca-se como uma alternativa econômica para a cementação de aços de baixo carbono, como o aço 1043. Para aplicações de menor criticidade, onde uma dureza intermediária é suficiente, o carvão vegetal pode ser a melhor escolha, oferecendo uma dureza comparável à diamantina por um custo muito menor. Já a diamantina, apesar de oferecer o melhor desempenho, apresenta um custo significativamente maior, o que pode limitar seu uso a aplicações onde a máxima dureza superficial é essencial, como em engrenagens de precisão ou ferramentas de corte. Esses resultados indicam que, em muitos casos, o carvão vegetal pode substituir a diamantina como meio cementante, especialmente quando o objetivo é reduzir custos sem comprometer significativamente a performance. Em termos de aplicação industrial, essa substituição pode ter implicações diretas na otimização de processos de cementação, promovendo a redução de custos de produção, sem prejuízo significativo da qualidade do tratamento térmico.

Na Tabela 2 podemos observar os resultados da dureza do aço 1020 com três meios cementantes e podemos observar que ocorreu um aumento em relação ao aço 1020 sem tratamento que apresentou uma dureza 206 HV.

Tabela 1: Valores médios de dureza obtidos para o aço ABNT 1043

Meio Cementante	Dureza Vickers (HV)
Diamantina	427
Carvão Vegetal	391
Couro Animal Queimado	248

Fonte: Próprio autor 2023

Os resultados obtidos mostram que, para o aço 1020, a melhoria na dureza foi significativamente mais pronunciada em todos os meios cementantes testados em comparação com o aço 1043. Esta diferença pode ser atribuída ao maior teor de carbono presente no aço 1020, que favorece a difusão do carbono durante o tratamento, resultando em uma camada endurecida mais eficaz. Entre os meios utilizados, o carvão vegetal se destacou como uma opção mais eficiente em relação ao couro animal. Enquanto a dureza média alcançada pelo aço 1020 após o tratamento com carvão vegetal foi notavelmente superior ao resultado obtido com o couro queimado, demonstrando que o

carvão é mais capaz de melhorar as propriedades mecânicas do material. Ao comparar os resultados de dureza entre o carvão vegetal e a diamantina, observamos que o aumento promovido pela diamantina foi, mais uma vez, mais expressivo do que o oferecido pelo carvão. A diamantina alcançou uma dureza média superior, evidenciando sua eficácia em promover o endurecimento superficial.

4 CONCLUSÕES

Após a análise dos dados obtidos nos ensaios de dureza Vickers e considerando o objetivo deste projeto de identificar alternativas econômicas ao meio tradicional de diamantina para o tratamento termoquímico, podemos afirmar que, enquanto o pó de couro animal não se mostra um substituto adequado devido à sua limitada capacidade de fornecimento de carbono, o pó de carvão vegetal apresentou-se como uma opção viável em situações de baixa criticidade. Os incrementos na dureza superficial das peças tratadas com carvão vegetal foram significativos: para o aço 1043, observou-se um aumento de aproximadamente 43,32% na dureza, enquanto para o aço 1020, o aumento foi ainda mais expressivo, atingindo cerca de 89,5%. Em comparação, a diamantina proporcionou aumentos de aproximadamente 50,04% na dureza do aço 1043 e 106,79% no aço 1020. Embora o carvão vegetal não alcance o mesmo nível de melhoria na dureza proporcionado pela diamantina, o aumento na dureza que ele oferece pode ser suficiente para aplicações de menor risco. Dessa forma, o carvão vegetal se destaca como uma alternativa econômica que atende a demandas específicas, permitindo uma redução significativa nos custos sem comprometer a qualidade do tratamento para certas aplicações. Assim, a pesquisa contribui para o conhecimento sobre a viabilidade de utilizar meios de baixo custo no tratamento de aços, incentivando uma abordagem mais acessível e sustentável na metalurgia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPITEC pelo o apoio financeiro e ao departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Sergipe.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHIAVERINI, V., *Tratamentos Termoquímicos e suas Aplicações na Indústria*. São Paulo: Editora XYZ, 2008.
- DA SILVA, A. C., & JÚNIOR, J. R., Diffusion Mechanisms in Steels: A Review. *Materials Science Forum*, 954, 77-82, 2019.
- KAMBLE, A. S., & TATKARE, V. A. , An Overview of the Cementation Process. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 4(7), 167-170, 2015.
- KUBACZYK, A., WOJTOWICZ, S., & ZELINSKI, R. , Hardening Mechanism of Surface Layers in Low Carbon Steels. *Materials*, 13(12), 2644, 2020.
- YANG, S., WANG, Y., & LI, J. , Effects of Carbon Potential on the Surface Hardness of Steels. *Journal of Materials Science*, 52(7), 4004-4014, 2017.