CRIAÇÃO DE CAMADA ENDURECIDA EM PEÇA DE AÇO BAIXA LIGA POR PROCESSO SIMPLIFICADO DE DEPOSIÇÃO DE CARBONO NO SHELL MONDING

CREATION OF A HARDENED LAYER IN LOW-ALLOY STEEL PART BY SIMPLIFIED CARBON DEPOSITION PROCESS IN SHELL MOLDING

Letícia da Silva Santos, Cesar Andrade Vieira, Marcos Tadeu Tavares Pacheco

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica
E-mail para contato: leticiaani16@gmail.com

RESUMO – O Shell Molding é um processo de fundição que utiliza areia revestida com resina termofixa para produzir moldes finos e resistentes, permitindo peças metálicas de alta precisão, bom acabamento e geometrias complexas, reduzindo usinagem. Este estudo propõe um método simplificado de endurecimento superficial em aços de baixa liga, aplicando grafite na interface molde-metal para promover deposição de carbono. Busca-se formar camada martensítica após tratamento térmico, aumentando resistência ao desgaste e fadiga sem comprometer a tenacidade, avaliando profundidade, uniformidade e impacto nas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Shell Molding; Aço de baixa liga; Deposição de carbono; Endurecimento superficial; Camada martensítica.

ABSTRACT – Shell Molding is a casting process that uses sand coated with thermosetting resin to produce thin and resistant molds, enabling the manufacturing of metal parts with high precision, good surface finish, and complex geometries, while reducing machining. This study proposes a simplified surface hardening method for low-alloy steels by applying graphite at the mold–metal interface to promote carbon deposition. The aim is to form a martensitic layer after heat treatment, enhancing wear and fatigue resistance without compromising toughness, while evaluating depth, uniformity, and impact on mechanical properties.

Keywords: Shell Molding; Low-alloy steel; Carbon deposition; Surface hardening; Martensitic layer.

1 INTRODUÇÃO

Segundo (Asasaari, Wong, Tamin e Johar, 2025), o *Shell Molding* é um processo de fundição em molde de casca que utiliza areia revestida com resina termofixa para criar moldes finos e resistentes ao calor. Esse método permite a produção de peças metálicas com excelente acabamento superficial, alta precisão dimensional e complexidade geométrica, reduzindo significativamente a necessidade de usinagem posterior. Vantagens do *Shell Molding*: Precisão Dimensional – Permite tolerâncias mais estreitas em comparação com a fundição em areia convencional, Redução da Usinagem – Peças fundidas já próximas das dimensões finais minimizam operações secundárias, Superfície de Qualidade – O uso de areia revestida proporciona acabamento mais liso e uniforme, Eficiência na Produção – Moldes mais leves e reutilizáveis melhoram o tempo de ciclo e reduzem desperdícios, Complexidade Geométrica – Facilita a produção de peças com detalhes finos e geometrias intrincadas resultante.

Segundo (Benarioua, 2025), o endurecimento superficial de aços de baixa liga é uma estratégia amplamente utilizada na indústria metalúrgica para melhorar as propriedades mecânicas das peças, aumentando sua resistência ao desgaste e fadiga sem comprometer a tenacidade do núcleo. Dentre os processos de endurecimento, a cementação se destaca por proporcionar um enriquecimento superficial de carbono, promovendo a formação de uma camada martensítica após tratamento térmico adequado.

Neste contexto, o presente estudo propõe um método simplificado de deposição de carbono no processo *Shell Molding*, visando a criação de uma camada endurecida na superfície de aços de baixa liga mediante a aplicação de grafite na interface molde-metal. O processo *Shell Molding* é amplamente utilizado na fabricação de peças fundidas, caracterizando-se pela utilização de moldes de areia revestidos com resina. A introdução de grafite na interface entre o metal fundido e o molde pode representar uma alternativa econômica e eficiente para a deposição superficial de carbono, eliminando a necessidade de etapas adicionais de cementação tradicional.

O objetivo deste estudo é investigar a influência da deposição de carbono por meio da aplicação de grafite na interface molde-metal, analisando seus efeitos na microestrutura e propriedades mecânicas das peças produzidas. Pretende-se avaliar a profundidade da camada endurecida, a distribuição de carbono na superfície e o impacto no desempenho do material, buscando otimizar o processo para aplicações industriais que demandam alta resistência ao

desgaste e durabilidade. Dessa forma, este estudo pode contribuir para o desenvolvimento de um método mais eficiente e economicamente viável para o aprimoramento de peças fundidas de aço de baixa liga.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do estudo, foram formados dois grupos distintos de peças (n=4 para cada grupo), utilizando diferentes metodologias de fundição. O primeiro grupo foi fabricado pelo método tradicional de fundição "*shell molding*", enquanto o segundo grupo seguiu um procedimento modificado, com a deposição uniforme de uma camada de grafite sobre a superfície interna do molde. O aço de baixo teor de carbono utilizado em ambos os grupos foi o SAE 1020, um aço amplamente empregado na indústria devido à sua boa conformabilidade e soldabilidade, além da baixa concentração de carbono, variando entre 0,18% e 0,23%**.** O corpo de prova desse estudo é mostrado na figura 1 abaixo.

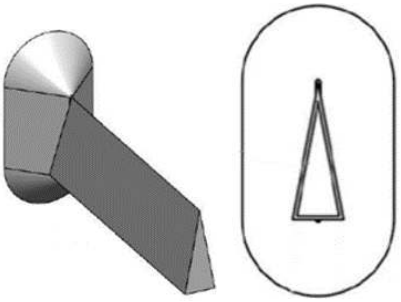
Figura 1: Corpos de Prova.



1A **1B**

Após a fundição da peça, foi realizado um corte transversal, criando um perfil em formato triangular, conforme figura 2 abaixo. Esse procedimento teve como objetivo expor a seção interna do material para permitir medições mais precisas da camada endurecida resultante do processo. A avaliação da dureza foi feita pelo método Vickers, que utiliza um penetrador de diamante em formato piramidal para determinar a resistência do material, fornecendo dados essenciais sobre a profundidade e uniformidade do endurecimento obtido.

Figura 2: Secção Transversal em Triângulo.



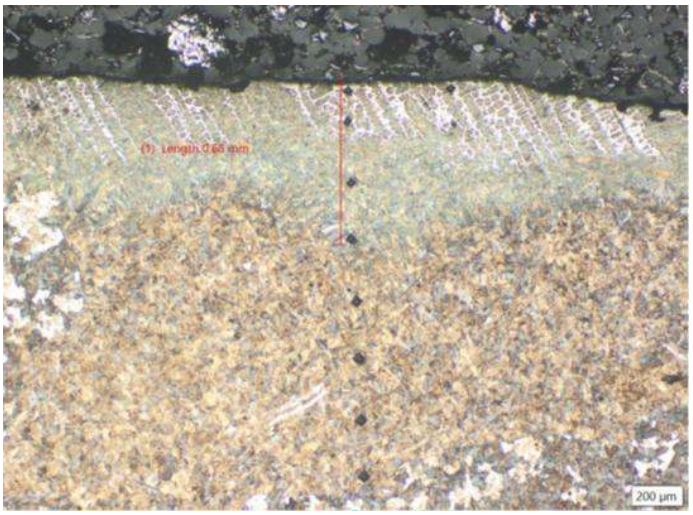
2A **2B**

Para avaliar o impacto da deposição de grafite na dureza superficial e a espessura da camada endurecida, foram realizadas medições conforme a seguinte norma:

- Ensaios realizados conforme norma ABNT NBR NM ISO 6507-1:2019 para micro dureza.
- Utilizado um microdurômetro Mitutoyo HM-220 com carga de 200 Kgf e 500 Kgf aplicada por 10 segundos.
- As medições foram feitas em seções transversais, partindo da superfície até o núcleo da peça, para analisar variações de dureza ao longo da profundidade.

Na figura 3 é mostrado a realização de 10 medições em diferentes profundidades com distancias de 0,17 mm, permitindo a construção de um perfil de dureza.

Figura 3: Camada Endurecida de 0,17mm.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de dureza Vickers confirmaram de forma inequívoca que a deposição de carbono integrada ao Shell Molding proporcionou um aumento expressivo da dureza superficial das peças fundidas. A amostra submetida ao processo de fundição em molde enriquecido com carbono (película de grafite no molde) apresentou valores médios dos 4 primeiros pontos da camada endurecida equivalente a 504,25 HV e uma dureza máxima de 574 HV, visto que, a dureza media do núcleo da peça e de 300,5 HV e dureza máxima de 315 HV, isso representa um incremento de aproximadamente 52%. Foram verificados os seguintes resultados em Vickres (HV), mostrado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Tabela de Valores de Dureza Media, Dureza Mínima e Dureza Máxima

Pontos | Valores *Points I Values*	
1	560
2	574
3	470
4	413
5	315

Pontos | Valores *Points I Values*	
6	294
7	286
8	306
9	305
10	297

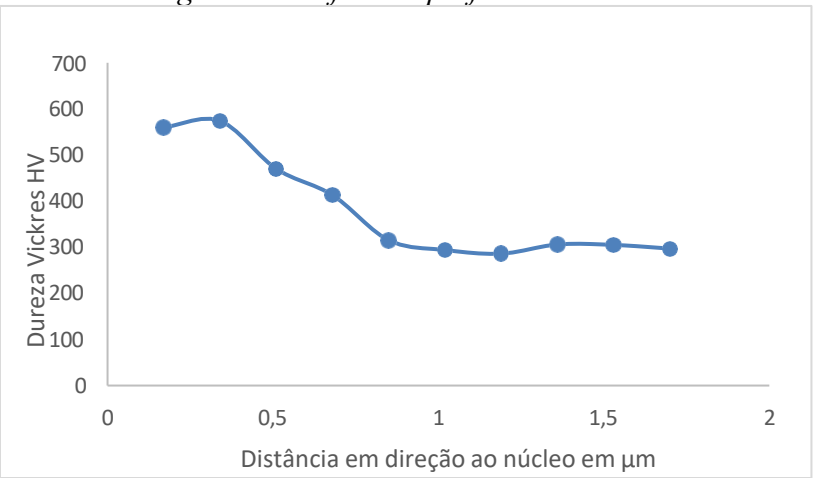
Pontos | Valores *Points I Values*	
11	---
12	---
13	---
14	---
15	---

Pontos | Valores *Points I Values*	
16	---
17	---
18	---
19	---
20	---

Valor Mínimo *Minimum Value*	Valor Médio *Average Value*	Valor Máximo *Maximum Value*
286	382	574

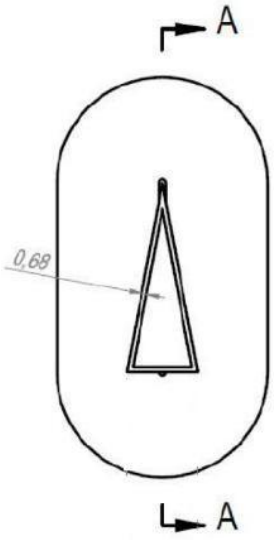
O gráfico mostrado na figura 4 abaixo demostra o perfil de dureza produzido pela camada de deposição de carbono depositada na superficial da peça. Os pontos de teste de dureza vickres foram coletados com uma distância de 017mm entre cada marcação e com o total 10 pontos coletados.

Figura 4: Gráfico do perfil das durezas.



A figura 5: abaixo mostra a camada de 0,68mm endurecida pelo processo de deposição de carbono superficial da peça, objetivo alvo desse experimento.

Figura 5: Espessura da Camada Endurecida.



Os resultados obtidos no processo de deposição de carbono na interface molde-metal demonstram um aumento significativo na dureza do aço de baixo teor de carbono. A dureza média dos quatro primeiros pontos da camada endurecida foi de 504,25 HV, com uma dureza máxima de 574 HV, e gerou uma espessura de 0,68 mm, com distancias entre os pontos de ,017 mm. Considerando que a dureza média do núcleo da peça foi de 300,5 HV e a dureza máxima alcançou 315,4 HV, fica evidente a efetividade do método na melhoria das propriedades mecânicas do material. Esse incremento pode ser atribuído à incorporação de carbono na superfície do metal durante o processo, resultando em uma camada superficial mais resistente ao desgaste e à deformação plástica.

O aumento da dureza superficial do material representa um avanço significativo para diversas aplicações industriais, especialmente na fabricação de componentes submetidos a desgaste contínuo, como engrenagens, eixos e ferramentas de corte. A presença de uma camada endurecida melhora a resistência ao atrito, prolongando a vida útil da peça e reduzindo custos com manutenção e substituição de componentes.

Em comparação com a cementação tradicional, o método proposto apresenta vantagens significativas em termos de eficiência energética. A cementação convencional envolve temperaturas elevadas e tempos prolongados de tratamento térmico, o que acarreta um alto consumo de energia e impactos ambientais negativos devido à emissão de gases e resíduos industriais. Em contrapartida, a deposição de carbono na interface molde-metal reduz a necessidade de exposição prolongada ao calor intenso, resultando em menor demanda

energética e, consequentemente, em uma abordagem mais sustentável para a indústria metalúrgica.

Outro fator relevante é a uniformidade da camada enriquecida com carbono. A interação direta entre o molde e o metal favorece uma distribuição homogênea do carbono na superfície, reduzindo variações indesejadas na dureza e melhorando a confiabilidade do tratamento térmico. Além disso, a técnica evita problemas associados às atmosferas gasosas utilizadas na cementação tradicional, como a formação de fuligem e a contaminação do ambiente de trabalho, proporcionando um processo mais limpo e seguro.

Além dos benefícios mecânicos e energéticos, a deposição de carbono na interface molde-metal pode contribuir para a inovação em processos de manufatura avançada. A possibilidade de integrar essa técnica com métodos de conformação e fundição abre novas perspectivas para a produção de peças com propriedades otimizadas diretamente no processo de fabricação, reduzindo etapas adicionais de tratamento térmico e melhorando a eficiência produtiva.

Portanto, a metodologia estudada se apresenta como uma alternativa promissora para processos industriais que requerem endurecimento superficial do aço de baixo carbono, aliando eficiência mecânica, sustentabilidade energética e viabilidade econômica. A continuidade das pesquisas nessa área pode levar ao aperfeiçoamento da técnica, possibilitando sua aplicação em larga escala e consolidando-a como uma opção competitiva frente aos métodos convencionais de endurecimento superficial.

4 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a criação de uma camada endurecida em peças de aço de baixa liga por meio de um processo simplificado de deposição de carbono no Shell Molding, comparando seus resultados com os métodos tradicionais de cementação. Os resultados mostraram que a nova abordagem pode ser uma alternativa promissora, oferecendo vantagens como menor complexidade de execução e redução de custos operacionais. Além disso, um dos principais benefícios identificados foi a diminuição do gasto energético em comparação aos métodos tradicionais, que exigem longos períodos de aquecimento em fornos de alta temperatura, resultando em maior consumo de energia. O processo simplificado, por sua vez, demonstrou potencial para proporcionar economia energética sem comprometer significativamente a dureza superficial da peça.

Gostaríamos de expressar nossa gratidão a todos os envolvidos neste trabalho, incluindo os orientadores e coordenadores da Universidade Santa Cecilia (Unisanta) que apoiaram este estudo.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a otimização dos parâmetros do processo de deposição de carbono, visando controlar a umidade dos moldes, afim de aumentar a uniformidade e a profundidade da camada endurecida. Além disso, estudos complementares sobre a resistência ao desgaste e à fadiga das peças tratadas poderão fornecer informações adicionais sobre a aplicabilidade desse método em diferentes setores industriais. A avaliação da sustentabilidade e do impacto ambiental do novo processo também poderá contribuir para sua viabilidade como alternativa aos métodos convencionais.

5 REFERÊNCIAS

ASASAARI, S.; WONG, K.; TAMIN, M.; JOHAR, M. Moisture absorption effects on the mechanical properties of carbon/epoxy composites. International Journal of Structural Integrity, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1108/ijsi-12-2019-0136. Acesso em: 07 mar. 2025.

BAALI, S.; BENARIOUA, Y.; MAZOUZ, A. An Experimental Study of the Influence of Carburizing Treatment Holding Time on the Structure and Hardness of 16NC6 Steel. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.48084/etasr.5684. Acesso em: 07 mar. 2025.

BALLEM, M.; ALDARWISH, M.; ALJUROUSHI, A.; SHAKA, A.; ABDULBAKEE, A. Effect of Carburizing Temperature and Post Carburizing Treatments on Microhardness and Microstructural Evolution of Carburized Low- Carbon Steel. Journal of Pure & Applied Sciences, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.51984/jopas.v22i2.2788. Acesso em: 07 mar. 2025.

BENARIOUA, Y. Carburizing treatment of low alloy steels: Effect of technological parameters. Journal of Physics: Conference Series, v. 1033, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1033/1/012008. Acesso em: 07 mar. 2025.

BOUMEDIRI, H.; TOUATI, S.; DEBBAH, Y.; SELAMI, S.; CHITOUR, M.; KHELIFA, M.; KAHALERAS, M.; BOUMEDIRI, K.; ZEMMOURI, A.; ATHMANI, M.; FERNANDES, F. Effect of carburizing time treatment on microstructure and mechanical properties of low alloy gear steels. Materials Research Express, v. 11, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad5cd6. Acesso em: 07 mar. 2025.

CAI, Z.; ZHU, M. Non-uniform heat transfer behavior during shell solidification in a wide and thick slab continuous casting mold. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, v. 21, p. 240-250, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12613-014-0901-1. Acesso em: 07 mar. 2025.

DARMO, S.; SINAREP, S.; SOENOKO, R. A study of the pack carburizing quenching treatment with cane molasses cooling medium effect on the wear resistance of low carbon steel. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, v. 2, p. 32- 37, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228627. Acesso em: 07 mar. 2025.

GULOGLU, G.; ALTAN, M. Moisture Absorption of Carbon/Epoxy Nanocomposites. Journal of Composites Science, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/jcs4010021. Acesso em: 07 mar. 2025.

KANG, J.; SHANGGUAN, H.; DENG, C.; HU, Y.; YI, J.; WANG, X.; ZHANG, X.; HUANG, T. Additive manufacturing-driven mold design for castings. Additive Manufacturing, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.04.037. Acesso em: 07 mar. 2025.