PROCESSO SIMPLIFICADO DE DEPOSIÇÃO DE CARBONO EM AÇO DE BAIXA LIGA NO SHELL MOLDING

SIMPLIFIED PROCESS OF CARBON DEPOSITION IN LOW-ALLOY STEEL USING SHELL MOLDING

Polyanne Clemente Mariano, Cesar Andrade Vieira, Marcos Tadeu Tavares Pacheco

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

RESUMO – O Shell Molding é um processo de fundição que utiliza areia revestida com resina termofixa, produzindo moldes resistentes e precisos, que permitem peças com excelente acabamento e geometrias complexas, reduzindo usinagem. Em aços de baixo carbono, oferece ductilidade e tenacidade, mas limitada dureza e resistência ao desgaste. A aplicação de grafite na interface molde–metal promove difusão de carbono, formando camada endurecida na superfície. Assim, o endurecimento é integrado à fundição, elevando a resistência ao desgaste sem comprometer a tenacidade, tornando as peças adequadas para engrenagens, eixos e componentes sujeitos a impacto e abrasão.

Palavras-chave: Shell Molding; Fundição de aços de baixa liga; Deposição de carbono; Endurecimento superficial; Difusão de carbono.

ABSTRACT – Shell Molding is a casting process using sand coated with thermosetting resin, producing resistant, precise molds and parts with excellent surface finish and complex geometries, while reducing machining. In low-carbon steels, it provides high ductility and toughness, but limited hardness and wear resistance. To overcome this, graphite can be applied to the mold-metal interface, allowing carbon diffusion and a hardened surface layer. This integrates hardening into casting, enhancing wear resistance without reducing toughness, making parts suitable for gears, shafts and components under impact and abrasion.

Keywords: Shell Molding: Low-alloy steel casting; Carbon deposition; Surface hardening; Carbon diffusion.

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 uso do *Shell Molding* para peças de aço de baixo teor de carbono (até aproximadamente 0,3% de C) possuem alta ductilidade e tenacidade, tornando-os ideais para peças que precisam ser conformadas ou absorver impactos sem fratura. No entanto, sua baixa dureza e resistência ao desgaste podem limitar seu uso em aplicações onde há atrito ou abrasão significativa.

Para contornar essa limitação, é possível aumentar o teor de carbono na camada superficial da peça fundida, um procedimento que pode ser realizado por meio de tratamentos térmicos ou técnicas específicas no próprio processo de fundição. No contexto do *shell molding***,** algumas estratégias podem ser aplicadas:

Segundo (Darmo, Sinarep e Soenoko, 2025), após a fundição, a peça de aço de baixo carbono pode passar por um processo de cementação, no qual é enriquecida com carbono em sua superfície. Esse tratamento forma uma camada externa endurecida (martensítica após têmpera), enquanto o núcleo permanece com baixo teor de carbono, mantendo sua ductilidade e resistência a impactos. No entanto, devido à alta temperatura e ao longo tempo de atuação necessário para a difusão do carbono, o processo demanda um considerável consumo de energia, resultando em um gasto energético elevado. Isso torna essencial a avaliação da eficiência do processo e o uso de técnicas que possam minimizar custos sem comprometer a qualidade do tratamento.

A Justificativa para maior teor de carbono na camada externa é a necessidade de uma camada superficial enriquecida em carbono está diretamente relacionada à resistência ao desgaste. O aumento do teor de carbono na superfície permite que essa região da peça seja endurecida por tratamentos térmicos, formando microestruturas como martensita ou perlita fina, que são altamente resistentes ao desgaste por abrasão e fadiga. Enquanto isso, o núcleo da peça mantém sua estrutura mais dúctil e tenaz, garantindo que a peça não se torne frágil como um todo.

Dessa forma, a combinação de um núcleo tenaz e uma superfície mais resistente ao atrito permite que a peça suporte esforços mecânicos intensos sem sofrer deformação plástica excessiva ou fratura prematura. Isso é particularmente útil em aplicações como engrenagens, eixos e componentes sujeitos a atrito ou impacto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse experimento foi realizado duas amostragens diferentes de quatro peças cada, com a finalidade de provar que a aplicação de carbono na superfície do molde, gera cimentação no corpo de prova final.

Foram utilizados moldes em *shell*, próprios para produção de corpos de prova com medidas de 200 mm de comprimento e 50 mm de largura e peso de 0,595 Kg. Como mostra a figura 1.

Figura1: Moldes Utilizados.

Molde utilizado *Molde com aplicação de grafite* *Molde envasado com aço*







Para a realização do estudo, foram formados dois grupos distintos de peças (n=4 para cada grupo), como mostra a figura 2 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 foi desenvolvido obtendo-se uma peça com secção transversal em triângulo, figura 3.

Figura 2: Os corpos de prova produzidos.



Figura 3: Secção Transversal em Triângulo.



Foi realizado teste de dureza superficial em todos os corpos de prova pelo método Brinell com um durometro portátil *Brinell*, como mostra a figura 4, visto que esse método é o mais indicado para verificação de macro dureza superficial.

Figura 4: Durometro portátil Brinell.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de dureza *Brinell* confirmaram de forma inequívoca que a deposição de carbono integrada ao *Shell Molding* proporcionou um aumento expressivo da dureza superficial das peças fundidas. As amostras submetidas ao processo de fundição em moldes enriquecidos com carbono (película de grafite no molde) apresentaram valores médios de dureza 291,75± 18,6 HB, enquanto as peças fundidas sem carbono registraram apenas 230,5±3 HB, representando um incremento de aproximadamente 34%, indicando um valor de significância p = 0,013. Foram verificados os seguintes resultados em *Brinell* (HB), mostrado na tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Valores de Dureza Media e Desvio Padrão

Peça	C/C	S/C
1	269 HB	229 HB
2	285 HB	229 HB
3	302 HB	229 HB
4	311 HB	235 HB
Media	291,75HB	230,5HB
Desvio P	18,6HB	3HB

CC = Corpo de Prova Com Carbono

S/C = Corpo de Prova Sem Carbono

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 inicial média de 230,5 HB foi elevada para 291,75 HB, evidenciando 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.

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. Em contrapartida, a deposição de carbono na interface molde-metal reduz a necessidade de exposição prolongada ao calor intenso, resultando em menor demanda energética.

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. Além disso, a técnica evita problemas associados a atmosferas gasosas utilizadas na cementação, como formação de fuligem e contaminação do ambiente de trabalho.

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 e sustentabilidade energética.

4 CONCLUSÃO

Esse processo reduziu algumas etapas em relação ao processo tradicional, onde esse é necessário fundir a peça primeiro, posteriormente fazer a etapa de cimentação, que consistem em reaquecer a mesma novamente, depois coloca-la em um meio rico em carbono, aguardar um tempo de aproximadamente de duas horas de difusão do carbono e finalmente resfria-la. Esse novo processo a cimentação é feito já no momento do envasamento do aço no molde, eliminando o a etapa de reaquecimento e a espera de difusão da peça novamente. Com isso ganha-se tempo e economia de energia na fabricação e endurecimento de peças fundidas em aços de baixo carbono nas industrias relativas a esse processo.

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 de março de 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 de março de 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 de março de 2025.

BENARIOUA, Y. Carburizing treatment of low alloy steels: Effect of technological parameters. Journal of Physics: Conference Series, 1033, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1033/1/012008. Acesso em: 07 de março de 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, 11, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad5cd6. Acesso em: 07 de março de 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, 21, p. 240-250, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12613-014-0901-1. Acesso em: 07 de março de 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, 2, p. 32-37, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228627. Acesso em: 07 de março de 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 de março de 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 de março de 2025.