cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Análise Comparativa da Sinterização de Materiais Ferrosos via Aquecimento Convencional e Sinterização Ultrarrápida

Laura da Silva de Camargo[1]; Andreia Moreira da Silva[1]; Dalton Daniel de Lima[1]; Natália de Freitas Daudt[1]
1. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Introdução

Na metalurgia do pó, sinterizar compactados de ferro em forno convencional exige ciclos de horas, e a cementação é feita depois. A sinterização ultrarrápida em alta temperatura (UHS) aquece feltros de carbono por efeito Joule a 10^3 - 10^4 °C/min e consolida materiais em segundos (WANG et al., 2020). Como o aquecedor é de carbono, a UHS pode transferir carbono ao ferro, unindo sinterização e cementação em um único ciclo, algo ainda não explorado na literatura.



Figura 1. Esquema do processo UHS. Fonte: adaptado de Wang et al. (2020).

Objetivos

Comparar a sinterização de compactados de ferro em forno convencional e em UHS, avaliando a cementação simultânea com diferentes fontes carbonáceas:

- avaliar a densificação e a porosidade após a UHS;
- verificar a ocorrência de cementação pelo perfil de microdureza;
- comparar carvão vegetal, grafite e grafeno, na UHS e em forno convencional.

Metodologia

Pó de ferro ASC100.29 (Höganäs) foi compactado a 600 MPa (Ø 8 mm). Nas amostras com fonte carbonácea, ≈0,1 g de grafite, grafeno (nanoplaquetas) ou carvão vegetal foi compactado sobre ≈2,0 g de ferro, formando uma camada em uma face. A UHS foi feita sob vácuo, entre feltros de grafite (≈11 A; ≈1000 °C; 60 s). Como referência, amostras foram sinterizadas em forno (1150 °C, 3 h, vácuo), cementadas em caixa e temperadas em água. Mediram-se a densidade geométrica e perfis de microdureza Vickers.





Figura 2. (a) Amostra entre camadas de feltro de carbono; (b) equipamento de UHS. Fonte: autora (2026).

Resultados e Discussão

Com 60 s de UHS, a densidade relativa passou de 80,8 % (verde) para 81,7 %, com retração inferior a 1 %; a porosidade (≈18 %) é predominantemente aberta (DANNINGER; DLAPKA, 2018).

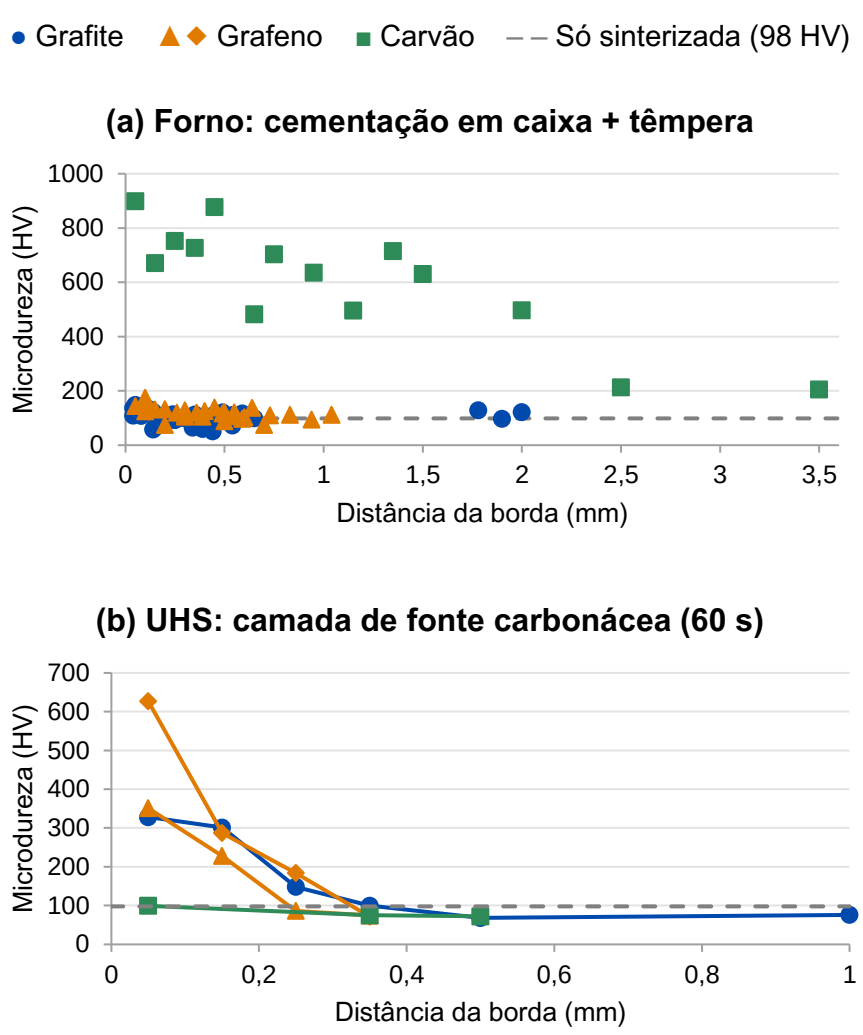


Figura 3. Perfis de microdureza Vickers: (a) cementação em forno; (b) UHS. Fonte: autora (2026).

Na UHS, grafite e grafeno endureceram a face em contato (até 627 HV), com retorno ao núcleo (≈70 HV) entre 0,25 e 0,35 mm, cerca de dez vezes a profundidade prevista pela difusão volumétrica (≈35 µm), o que sugere penetração pelos poros abertos (SMETANINA et al., 2024). No forno, sob vácuo e sem ativador, só o carvão cementou (até 899 HV), por manter a via gasosa do CO (CHIAVERINI, 1986).

Conclusões

- Em 60 s, a UHS sinterizou e cementou a superfície do ferro com grafite e grafeno, frente a ciclos de horas no forno convencional.
- O carvão vegetal só foi eficaz no forno, pela via gasosa; na UHS, o contato direto com carbono puro foi determinante.
- A densificação limitada (81,7 %) indica a necessidade de ajustar tempo, temperatura e espessura das amostras.

Referências e Agradecimentos

CHIAVERINI, V. Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. v. 3.
DANNINGER, H.; DLAPKA, M. Heat treatment of sintered steels – what is different? HTM Journal of Heat Treatment and Materials, v. 73, n. 3, p. 117-130, 2018.
SHEN, H.-Z. et al. Ultrafast high-temperature sintering: principles, advantages, and applications. Journal of the European Ceramic Society, v. 45, 117653, 2025.
SMETANINA, K. E. et al. Carbon contamination during spark plasma sintering of powder materials: a brief overview. Journal of Alloys and Compounds, v. 973, 172823, 2024.
WANG, C. et al. A general method to synthesize and sinter bulk ceramics in seconds. Science, v. 368, n. 6490, p. 521-526, 2020.