

INFLUÊNCIA DA NODULARIZAÇÃO E INOCULAÇÃO NA MICROESTRUTURA E DUREZA DO FERRO FUNDIDO NODULAR

Danieli Barbosa da Silva, Thiago Geraldo Alves da Silva, Marcelo Bergamini de Carvalho, Rodrigo André de Souza Ribeiro, Amir Rivaroli Junior

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Fatec Pindamonhangaba, Rodovia Vereador Abel Fabrício Dias, 4010 - Água Preta, 12445-010 – Pindamonhangaba.

daniana1859@yahoo.com; thiago.silva3@gerdausummit.com; marcelo.carvalho30@fatec.sp.gov.br,
rodrigo.ribeiro18@fatec.sp.gov.br, amir.rivaroli@fatec.sp.gov.br

Resumo

O estudo analisou, por meio de abordagem teórica, a influência dos processos de nodularização e inoculação na microestrutura e na dureza do ferro fundido nodular. Foram discutidos diferentes métodos de adição de magnésio, como sanduíche, câmara e encapsulado, bem como o uso de inoculantes à base de cálcio, bário e estrôncio no controle da formação da grafita nodular. A metodologia baseou-se em revisão crítica de artigos científicos, normas técnicas e estudos de caso, permitindo compreender os fatores que afetam a morfologia da grafita e a constituição da matriz metálica. Os resultados indicaram que a combinação entre nodularização eficiente e inoculação bem controlada favorece microestruturas homogêneas, estáveis e associadas a maior dureza em matrizes perlíticas. O trabalho evidencia a importância do controle metalúrgico na fundição nodular, propondo recomendações práticas para seleção de técnicas em contextos industriais e auxiliando na tomada de decisões mais assertivas no setor de fundição.

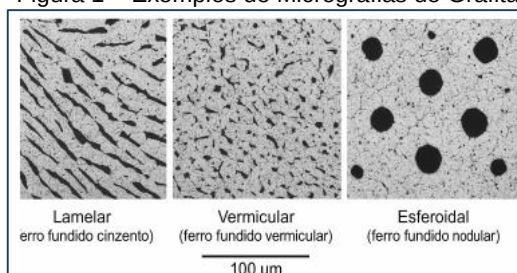
Palavras-chave: dureza; ferro fundido nodular; grafita esferoidal; inoculação; nodularização.

Área do Conhecimento: (Consulte área e subárea em que o trabalho será enviado no endereço <http://www.inicepg.univap.br/areas-de-conhecimento>).

Introdução

Os ferros fundidos classificados pela morfologia da grafita apresentam distintas propriedades e aplicações industriais. O ferro fundido cinzento contém grafita lamelar, que proporciona boa usinabilidade e elevada capacidade de amortecimento de vibrações, sendo amplamente utilizado em blocos de motor e bases de máquinas. O ferro fundido vermicular (CGI – *Compacted Graphite Iron*) apresenta grafita com morfologia intermediária entre lamelar e esferoidal, combinando resistência mecânica e térmica, o que o torna adequado para cabeçotes e blocos de motores modernos. Já o ferro fundido nodular caracteriza-se pela grafita esferoidal, obtida pela adição de magnésio ou elementos nodulizantes, conferindo alta resistência mecânica, ductilidade e tenacidade, razão pela qual é amplamente empregado em componentes críticos (SILVA; QUEIROZ, 2018). A Figura 1 apresenta micrografias desses tipos de ferro fundido, evidenciando a relação entre a morfologia da grafita e as propriedades resultantes.

Figura 1 – Exemplos de Micrografias de Grafita



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

O ferro fundido nodular, também denominado dúctil ou esferoidal, é uma liga de ferro, carbono e silício cuja principal característica é a presença de grafita em forma esferoidal, obtida por meio da nodularização. Esse processo envolve a adição de elementos nodulizantes, geralmente magnésio, ao ferro líquido, transformando a morfologia da grafita de lamelar para esferoidal. Tal modificação estrutural confere melhorias significativas nas propriedades mecânicas, como ductilidade, tenacidade e resistência ao impacto, preservando a boa fundibilidade e usinabilidade características do ferro fundido (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Apesar disso, a simples adição de magnésio não garante resultados eficazes, uma vez que a composição química da liga, o método de adição do nodulizante e o controle térmico exercem papel determinante no processo (CAMPOS et al., 2020). Nesse contexto, a inoculação desempenha função complementar, sendo realizada pela introdução de elementos nucleantes ao banho metálico, como ferro silício acrescido de cálcio, estrôncio ou alumínio. Esse tratamento auxilia na nucleação da grafita, reduz a formação de cementita e influencia diretamente a quantidade, forma e distribuição dos nódulos, bem como a constituição da matriz metálica.

A microestrutura final, composta pela grafita nodular e pela matriz metálica (ferrítica, perlítica ou mista), impacta fortemente as propriedades do material, sobretudo a dureza, que está relacionada à fração de perlita e ferrita e ao número de nódulos por unidade de área. Assim, compreender a interação entre nodularização e inoculação torna-se essencial para a obtenção de peças com desempenho superior.

Dada sua ampla aplicação em setores automotivo, agrícola, ferroviário e de saneamento básico, o estudo das variações nos processos metalúrgicos é fundamental para otimizar o ferro fundido nodular. A análise crítica desses tratamentos contribui para compreender os mecanismos de formação da grafita esferoidal, orientar o controle da matriz metálica e, conseqüentemente, assegurar propriedades adequadas às exigências industriais.

O sucesso da nodularização depende não apenas da adição de magnésio, mas também de fatores como tempo de retenção do metal líquido, agitação controlada e geometria da panela, que garantem a dispersão homogênea do elemento nodulizante; quando mal conduzidos, podem levar à degradação da esferoidização. Avanços recentes incluem o uso de ligas nodulizantes com estabilizadores, como níquel, cobre e terras raras, que refinam a microestrutura e aumentam a resistência mecânica, térmica e ao desgaste em componentes automotivos e ferroviários (NASCIMENTO; COSTA; MARTINS, 2021). Tecnologias de modelagem numérica, sensores em tempo real e sistemas automatizados de controle de temperatura e dosagem também têm contribuído para maior eficiência e padronização do processo. Além disso, a correta condução da nodularização impacta diretamente no consumo de ligas de magnésio, reduzindo custos, retrabalhos e efeitos ambientais negativos.

Metodologia

A pesquisa foi conduzida com caráter teórico, de natureza exploratória e qualitativa, fundamentada em revisão bibliográfica e análise comparativa de dados extraídos de publicações técnico-científicas. O objetivo consistiu em identificar e interpretar os efeitos dos processos de nodularização e inoculação na microestrutura e na dureza do ferro fundido nodular, utilizando como base livros técnicos de metalurgia, normas (ASTM A247; ABNT NBR 6916), manuais de fundição e artigos científicos indexados em bases como *Scielo*, *ScienceDirect* e Periódicos CAPES.

Este estudo, de caráter teórico, baseou-se em dados extraídos da literatura técnico-científica, sem produção de amostras experimentais. Foram analisados trabalhos que abordam as condições de fusão, os métodos de adição de magnésio para a nodularização e as técnicas de inoculação. A comparação considerou a eficiência dos métodos de tratamento, a influência da temperatura e composição do banho metálico e o impacto do tipo e quantidade de inoculante sobre a microestrutura final.

A preparação metalográfica foi discutida a partir de referências técnicas, contemplando etapas como corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico, com ênfase na revelação da morfologia da grafita e na distinção entre ferrita e perlita. Também foram considerados resultados publicados de ensaios de dureza Brinell, Vickers e Rockwell, que permitiram estabelecer correlações entre a matriz metálica predominante e os valores médios de dureza relatados.

A caracterização da grafita esferoidal foi analisada com base em normas e imagens de literatura especializada, considerando parâmetros como número de nódulos por mm², esfericidade e ocorrência de formas degeneradas. Os dados foram organizados em quadros e tabelas comparativas, abrangendo

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

métodos de adição de magnésio, tipos de inoculantes, alterações microestruturais e valores de dureza. A análise foi conduzida de forma crítica e descritiva, sem aplicação de tratamento estatístico, devido à diversidade e à falta de padronização dos dados secundários.

Resultados

a) Análise comparativa entre métodos de nodularização

A nodularização constitui etapa essencial na produção do ferro fundido nodular, pois transforma a grafita de lamelar para esferoidal. Entre os métodos mais utilizados destacam-se a adição tipo sanduíche, câmara reativa, aditivos em cadinho, sobretratamento com FeSiMg e nodulizantes encapsulados, cada um com vantagens e limitações que influenciam a eficiência da esferoidização, a estabilidade microestrutural e as propriedades mecânicas. Para avaliar essas abordagens, foi elaborado o Quadro 1 comparativo reunindo dados da literatura recente, relacionando técnicas empregadas, tipos de inoculantes, microestrutura obtida, matriz metálica resultante e valores médios de dureza, permitindo a visualização clara das correlações entre parâmetros metalúrgicos e desempenho final das peças fundidas.

Quadro 1 – Comparativo de estudos sobre nodularização, inoculação e dureza no ferro fundido nodular

Estudo / Fonte	Método de Nodularização	Tipo de Inoculante	Microestrutura Observada	Matriz Metálica	Dureza Média (HB)
Ferreira & Amorim (2016)	FeSiMg – método sanduíche	FeSi + Ca + Al	Grafita esferoidal bem distribuída	Ferrítica	160
Costa et al. (2019)	FeSiMg – câmara reativa	FeSi + Ba	Alta densidade de nódulos, pouca cementita	Perlítica	235
Martins et al. (2020)	FeSiMg com sobretratamento	FeSi + Sr	Nódulos pequenos e uniformes	Mista (F+P)	195
Mendes & Teixeira (2020)	Mg puro em cadinho	Inoculante comercial Sr	Grafita degenerada nas bordas	Perlítica	210
Castro et al. (2022)	FeSiMg encapsulado	Inoculante controlado	Microestrutura homogênea e estável	Ferrítica	175

Fonte: Os autores, 2025.

b) Efeitos do tipo de inoculante na microestrutura e correlação entre matriz metálica e dureza

A inoculação exerce papel essencial na formação da grafita esferoidal no ferro fundido nodular, influenciando diretamente a densidade, esfericidade e distribuição dos nódulos, bem como a matriz metálica resultante. O FeSi, quando combinado com elementos ativos, apresenta efeitos distintos: no estudo de Ferreira e Amorim (2016), a adição de Ca + Al resultou em nódulos bem distribuídos e matriz ferrítica uniforme, enquanto Costa et al. (2019) verificaram que a adição de bário aumentou a densidade de nódulos e a fração perlítica, refletindo-se em maior dureza. Já Martins et al. (2020) observaram que o uso de estrôncio favoreceu a formação de nódulos pequenos e estáveis, prevenindo regiões cementíticas em peças de maior massa. Em contrapartida, Mendes e Teixeira (2020) relataram a ocorrência de grafita degenerada nas bordas de peças quando o Sr foi aplicado em condições inadequadas, evidenciando a importância do momento de adição, do tempo de retenção e da temperatura do banho. Castro et al. (2022) destacaram os inoculantes de liberação controlada, que se mostraram eficazes em peças de geometria complexa, promovendo nucleação contínua e homogênea, com predominância de matriz ferrítica.

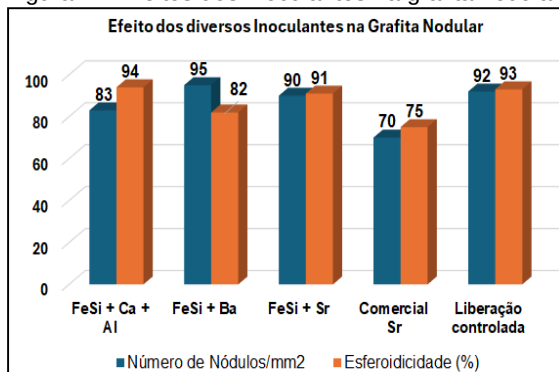
A análise da matriz metálica mostrou forte correlação com os valores de dureza, confirmando as previsões da metalurgia física. Matrizes predominantemente perlíticas apresentaram os maiores valores, chegando a 235 HB (COSTA et al., 2019), em razão da estrutura lamelar de ferrita e cementita, que aumenta a resistência, mas reduz a ductilidade. Em contrapartida, matrizes ferríticas, mais dúcteis e tenazes, apresentaram dureza inferior, variando de 160 a 175 HB (FERREIRA; AMORIM, 2016;

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

CASTRO et al., 2022). Quando a matriz foi mista (ferrita + perlita), como descrito por Martins et al. (2020), a dureza ficou em torno de 195 HB, refletindo equilíbrio entre resistência e ductilidade. Já a perlita instável, observada por Mendes e Teixeira (2020), apresentou dureza de 210 HB, mas com risco de heterogeneidade microestrutural, comprometendo a confiabilidade em serviço.

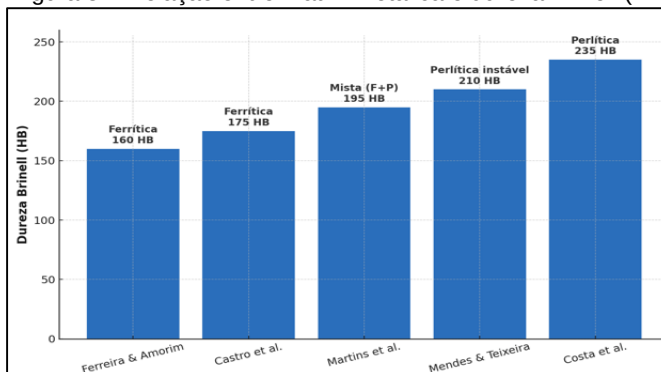
A Figura 2 apresenta os efeitos dos diferentes inoculantes na morfologia da grafita, destacando a variação do número de nódulos por mm² e o índice de esferoididade. Já a Figura 3 evidencia a relação entre matriz metálica e dureza Brinell, confirmando que o aumento da fração de perlita está associado a maiores valores de dureza, enquanto a predominância ferrítica garante melhor ductilidade e usinabilidade.

Figura 2 – Efeitos dos inoculantes na grafita nodular



Fonte: Os autores, 2025.

Figura 3 – Relação entre matriz metálica e dureza Brinell (HB)



Fonte: Os autores, 2025.

c) Fatores que influenciam o desempenho e aplicação prática.

Os estudos analisados indicam que a velocidade de resfriamento influencia diretamente a microestrutura do ferro fundido nodular, favorecendo a formação de perlita em resfriamentos rápidos. Ensaios de dureza e micrografias confirmaram a relação entre composição química, tipo de inoculante e propriedades finais, destacando a eficácia do estrôncio na formação de nódulos pequenos e uniformes. A Figura 4 apresenta de forma conceitual os principais fatores que exercem influência sobre o desempenho do ferro fundido nodular, especialmente no que se refere à microestrutura e à dureza final do material. Cada fator foi classificado segundo um grau de influência estimado com base nas obras consultadas.

Figura 4 – Fatores que influenciam o desempenho do ferro fundido nodular



Fonte: Os autores, 2025.

Os dados teóricos discutidos ao longo deste trabalho contribuem para fundamentar decisões técnicas na indústria de fundição, promovendo a melhoria da qualidade, redução de retrabalhos e maior competitividade do processo. Para reforçar a aplicabilidade prática dos dados discutidos, apresenta-se

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

a seguir o Quadro 2, no qual são resumidas as recomendações técnicas de nodulizantes e inoculantes conforme diferentes contextos industriais de fundição. A proposta foi oferecer uma orientação estratégica para a tomada de decisão técnica baseada em variáveis operacionais, custo-benefício e exigência mecânica do produto.

Quadro 2 – Recomendações práticas de nodulizantes e inoculantes conforme o tipo de produção industrial

Cenário Industrial	Recomendação de Nodulizante	Recomendação de Inoculante
Peças críticas com alta exigência mecânica (virabrequins)	FeSiMg encapsulado ou método em câmara	Sr ou combinação Sr-Ba para maior eficiência de nucleação
Produção em grande volume com foco em estabilidade	FeSiMg padrão com controle de temperatura	Ba ou Ca para estabilidade e tempo de atuação maior
Fundições de pequeno porte com menor controle de processo	FeSiMg método sanduíche com adição lenta	Ca ou inoculantes comerciais pré-formulados
Aplicações com menor exigência estrutural (ex: tampas, suportes)	FeSiMg método sanduíche	Ca simples ou sem inoculação adicional

Fonte: Os autores, 2025.

A lógica partiu da aplicação desejada da peça e se propôs a combinação de técnicas e materiais mais adequados, considerando aspectos como exigência mecânica, estabilidade do processo e capacidade técnica da fundição.

Discussão

Os resultados analisados indicam que o sobretratamento com FeSiMg e Sr favorece matrizes mistas, equilibrando resistência e ductilidade (195 HB), enquanto a adição direta de magnésio em cadinho gera variabilidade microestrutural e risco de fragilidade (210 HB). O FeSiMg encapsulado mostrou maior estabilidade e homogeneidade, resultando em matriz ferrítica (175 HB). Em relação à inoculação, combinações de FeSi com Ca + Al, Sr ou inoculantes de liberação controlada aumentaram a eficiência de nucleação e a uniformidade da grafita, elevando a densidade e a esfericidade dos nódulos. A correlação entre matriz e dureza reforça que estruturas perlíticas apresentam maior dureza, mas menor ductilidade, enquanto matrizes ferríticas conferem melhor tenacidade e usinabilidade; já as mistas apresentam comportamento intermediário. Divergências entre autores estão ligadas a variáveis secundárias, como temperatura do banho, tempo de reação e impurezas, o que evidencia a necessidade de maior controle operacional. Na prática industrial, métodos controlados de adição de magnésio (câmara ou encapsulado) mostraram-se mais eficazes que o método sanduíche, e a escolha do inoculante deve considerar não apenas a qualidade microestrutural, mas também aspectos econômicos e de padronização fabril, já que o Sr, embora eficiente, é mais sensível a variações, enquanto Ca e Ba oferecem maior estabilidade. Dessa forma, o rigor no controle dos parâmetros secundários é essencial para assegurar reprodutibilidade, qualidade microestrutural e desempenho confiável das peças fundidas.

Conclusão

O estudo evidenciou que os processos de nodularização e inoculação exercem influência decisiva sobre a microestrutura e as propriedades do ferro fundido nodular, em especial a dureza. A análise comparativa da literatura demonstrou que a eficiência da nodularização depende do método de adição

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

de magnésio, da estabilidade térmica do banho e do tempo de reação, enquanto a inoculação adequada controla a quantidade e a distribuição dos nódulos de grafita.

Verificou-se que matrizes perlíticas, associadas a maiores taxas de resfriamento e teores residuais de magnésio otimizados, resultam em maior dureza, ao passo que matrizes ferríticas conferem menor dureza e maior ductilidade. A sistematização das informações permitiu propor recomendações práticas para a fundição, destacando a importância do controle rigoroso dos parâmetros de processo a fim de aumentar a reprodutibilidade, reduzir defeitos metalúrgicos e otimizar o desempenho e o custo-benefício industrial.

Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6916: Ferro fundido nodular – Classificação e requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A247: Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron castings. West Conshohocken, 2017.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais: uma abordagem integrada*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAMPOS, C. E. M. et al. Influência da nodularização e inoculação na microestrutura do ferro fundido nodular. *Revista Matéria*, v. 25, n. 1, p. 1–10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.1053>.

CASTRO, J. P. et al. Avaliação de inoculantes de liberação controlada em peças fundidas nodulares de alta complexidade. *Revista Materiais Inovadores*, v. 3, n. 1, p. 14–22, 2022.

COSTA, A. P. et al. Comparativo entre métodos de dureza aplicados em ferros fundidos nodulares. *Cadernos de Ensaios em Engenharia*, v. 7, n. 3, p. 33–41, 2019.

MARTINS, R. A. et al. Influência da matriz metálica e da morfologia da grafita nas propriedades do ferro fundido nodular. *Revista Técnica em Metalurgia*, v. 13, n. 3, p. 77–84, 2020.

MENDES, A. J.; TEIXEIRA, C. A. Influência da composição química do inoculante na matriz metálica do ferro fundido nodular. *Revista Brasileira de Fundição*, v. 13, n. 3, p. 44–51, 2020.

NASCIMENTO, H. C.; COSTA, M. F.; MARTINS, T. S. Influência de elementos de liga no desempenho mecânico de ferros fundidos nodulares. *Revista Científica Engenharia & Metalurgia*, v. 6, n. 2, p. 45–55, 2021.

SILVA, F. M.; QUEIROZ, E. T. Comportamento microestrutural dos diferentes tipos de ferro fundido e suas aplicações industriais. *Revista Ciência em Metalurgia*, v. 12, n. 3, p. 60–68, 2018.