

Adição de Cr para endurecimento superficial do ferro fundido nodular na condição bruta de solidificação

Robinson Tadeu Nadal Visar¹ 
Paula Fernanda da Silva Farina^{2*} 

Resumo

O ferro fundido nodular apresenta muitas vantagens frente aos demais ferros fundidos, porém, sua baixa resistência ao desgaste é uma desvantagem. Para aumentar a dureza superficial dos ferros fundidos nodulares, comumente são utilizados tratamentos termoquímicos. Com o objetivo de obter uma camada reforçada superficial no ferro fundido nodular, na condição bruta de solidificação, o presente trabalho propõe a adição de Cr na composição, a qual, aliada a um inserto metálico (de aço AISI 1020), produzirá uma camada superficial endurecida, rica em carbonetos. Para tanto, foram realizadas simulações computacionais e produzida a liga fundida para realização de ensaios de dureza, tração e caracterização metalográfica. A adição de 0,5% em peso de Cr no ferro fundido nodular, aliada ao resfriador de aço AISI 1020, mostrou-se eficaz para melhorar as propriedades de resistência mecânica superficial do ferro fundido nodular, mantendo as características do mesmo no núcleo da peça.

Palavras-chave: Simulação computacional; Carbonetos; Resistência mecânica; Ferro fundido nodular; Resistência superficial.

Chromium addition in nodular cast iron for surface hardening in the as-cast condition

Abstract

Nodular cast iron has many advantages over other cast irons, but one disadvantage is its low wear resistance. Studies have been carried out to increase the surface hardness of nodular cast iron, the most common being thermochemical treatments. To obtain a reinforced surface layer on nodular cast iron in its as cast condition, this work proposes the addition of Cr to the composition, which, together with a metal insert (made from ISO 1020 steel), will produce a hardened layer, rich in carbides. To this end, computer simulations were carried out and the cast alloy was produced for hardness, tensile and metallographic characterization tests. The addition of 0.5 wt % of Cr to the nodular cast iron, combined with an ISO 1020 steel cooler, proved to be effective in improving the surface mechanical strength properties of the nodular cast iron, while maintaining its characteristics in the core of the part.

Keywords: Computer simulation; Carbides; Mechanical strength; Nodular cast iron; Surface hardness.

1 Introdução

Os ferros fundidos nodulares apresentam um processo de solidificação complexo e os mecanismos envolvidos na formação das fases iniciais ainda não são completamente compreendidos [1]. As características microestruturais e as propriedades mecânicas desses materiais estão diretamente relacionadas à forma como a fase rica em carbono se apresenta na microestrutura, sendo fortemente influenciada pelo potencial de nucleação da grafita e pela taxa de resfriamento.

A precipitação da fase rica em carbono pode ser na forma de grafita, em reações estáveis, ou na forma de carbonetos, em reações metaestáveis. Três variáveis principais controlam esse processo: a composição química da liga, a velocidade de resfriamento e o tratamento aplicado ao metal líquido [2].

Diversas teorias foram propostas para explicar o mecanismo de nucleação e crescimento dos nódulos de grafita no ferro fundido nodular. Skaland [3], por exemplo,

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

²Departamento de Manufatura e Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

*Autor correspondente: paulafs@unicamp.br
E-mail: robinsonvisar@gmail.com



sugere que o magnésio adicionado ao banho por meio da liga FeSiMg reage com o enxofre presente, promovendo a formação de sulfetos estáveis. Essas partículas, recobertas por camadas de silicatos, atuam como sítios preferenciais para a nucleação e o crescimento da grafita esférica. A forma e a distribuição dos nódulos de grafita são, portanto, determinadas pela composição química do metal, pela velocidade de resfriamento e pelo nível de nucleação alcançado durante a solidificação [4,5]. Devido à morfologia esférica da grafita associada à matriz metálica, os ferros fundidos nodulares apresentam propriedades mecânicas superiores em comparação aos ferros fundidos cinzentos [6,7]. A morfologia e a quantidade de nódulos de grafita desempenham um papel fundamental na resistência mecânica do material [8]. Para promover uma maior quantidade de sítios de nucleação da grafita e assegurar a formação de nódulos com geometria esférica adequada, é empregado o processo de inoculação. Esse tratamento tem como objetivo reduzir o grau de super-resfriamento, ou seja, a diferença entre a temperatura do eutético estável e metaestável no momento da solidificação, favorecendo a nucleação da grafita. Como resultado, obtêm-se microestruturas livres de carbonetos eutéticos, com distribuição homogênea dos nódulos. Além disso, a inoculação exerce influência direta na morfologia e distribuição da grafita eutética, o que, por sua vez, impacta a fração relativa de perlita e ferrita presentes na matriz [9-11].

O ferro fundido nodular, conhecido por suas excelentes propriedades mecânicas e ductilidade, é amplamente utilizado em aplicações estruturais e industriais [12]. No entanto, uma de suas limitações é a baixa resistência ao desgaste, o que motiva a busca por soluções para o endurecimento superficial desse material. Dentre as técnicas convencionais utilizadas para esse fim, destacam-se os tratamentos térmicos como o ADI e tratamentos termoquímicos como a nitretação e cementação [7,12-14].

Estudos têm explorado abordagens alternativas que visam modificar a microestrutura já na condição bruta de solidificação, por meio da adição de elementos de liga, como o cromo (Cr), capaz de promover a formação de carbonetos duros e resistentes [14-16]. O cromo é amplamente utilizado como elemento de liga nos ferros fundidos devido à sua capacidade de influenciar significativamente a microestrutura e as propriedades mecânicas do material. De acordo com Stefanescu [17], sua adição tem três propósitos principais: aumentar a resistência à corrosão, estabilizar a estrutura para aplicações em altas temperaturas e formar carbonetos. Mesmo em pequenas quantidades, o cromo atua como agente perlizante, promovendo o refinamento da perlita e aumentando

sua dureza, especialmente em ligas com baixo teor de silício. No entanto, concentrações superiores a 0,3% favorecem a formação de carbonetos eutéticos devido à alta afinidade do cromo com o carbono, estabilizando essas fases mesmo sob condições termodinamicamente desfavoráveis [2,6].

Tabrett et al. [18] observaram que o cromo reduz as temperaturas dos eutéticos estável (TEE) e metaestável (TEM), favorecendo a formação de carbonetos durante a solidificação.

À medida que a concentração de cromo aumenta, os carbonetos tornam-se mais refinados e apresentam estruturas mais complexas. Parte do cromo residual também pode formar solução sólida com a ferrita, especialmente na presença de elementos não formadores de carbonetos, como o silício, aumentando a dureza da matriz [17,18].

Estudos de Nascimento e Santana [16] e Oliveira [19] reforçam o papel do cromo como potente formador de carbonetos, mesmo em teores baixos, promovendo a formação de compostos extremamente duros, o que pode compensar a perda de resistência ao desgaste em ligas com matriz ferrítica. Santos [20] complementa que, além de atuar na formação de carbonetos, o cromo influencia diretamente a nucleação da grafita, reduzindo sua quantidade e promovendo microestruturas mais ricas em fases duras.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da adição de 0,5% em peso de cromo na matriz do ferro fundido nodular, aliada à utilização de um inserto metálico de aço AISI 1020 como elemento resfriador, sobre a formação de carbonetos e propriedades mecânicas superficiais do material na condição como fundido. A proposta é investigar, por meio de simulação computacional e ensaios experimentais, a variação microestrutural ao longo da seção do corpo de prova fundido e a correlação entre a fração de carbonetos formados e as propriedades de dureza e resistência mecânica observadas.

2 Materiais e métodos

Para entender o efeito da adição de cromo no ferro fundido nodular, partiu-se de uma composição química padrão da empresa Castertech (sob a nomenclatura “Referência”, Tabela 1), utilizando o limite superior da faixa de composição química. Para a simulação com o programa MAGMASOFT®, adicionou-se 0,5% em peso de Cr (sob a nomenclatura “Simulada”, Tabela 1). A composição química da liga obtida experimentalmente (sob a nomenclatura “Obtida”) também é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química nominal (% em peso) do ferro fundido nodular “Referência” (limite superior da faixa de composição química nominal), da liga utilizada para a simulação computacional (“Simulada”) e da liga obtida experimentalmente (“Obtida”)

Liga	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Mg	Cr
Referência	3,62	2,75	0,40	0,040	0,017	0,15	0,020	0,055	0,05
Simulada	3,62	2,75	0,40	0,040	0,017	0,15	0,020	0,055	0,50
Obtida	3,55	2,65	0,21	0,037	0,015	0,08	0,005	0,050	0,46

A geometria de bloco Y com resfriador, padronizado conforme a norma ASTM A536 [21], Figura 1, foi utilizada tanto para a simulação computacional quanto para a obtenção do corpo de prova fundido. O corpo de prova fundido em formato Y tem como objetivo o estudo das propriedades mecânicas e a caracterização metalográfica.

Para a simulação computacional, foi utilizado o programa MAGMASOFT®, adotando os seguintes parâmetros: temperatura de vazamento de 1410 °C; classificação de nucleação como “good”; uso de resfriador metálico em aço SAE 1020; e desmoldagem após 40 minutos. O inserto de aço SAE 1020 tem a função exclusiva de acelerar a taxa de extração de calor, produzindo uma camada “coquilhada” na base corpo de prova.

O molde para a obtenção do bloco Y fundido foi produzido por meio do processo de moldagem *cold box*. A adição de cromo foi realizada diretamente na carga metálica durante a fusão, garantindo sua incorporação homogênea ao material e a composição química das amostras fundidas foi determinada por espectrometria de emissão óptica.

Os ensaios mecânicos foram conduzidos em corpos de prova extraídos do bloco Y fundido (Figura 2). Os corpos de prova foram retirados de três diferentes seções ao longo da altura do braço do bloco Y, conforme a distância da superfície em contato com o resfriador: (i) 11 mm (CP1), (ii) 25 mm (CP2) e (iii) 39 mm (CP3). Foram fundidos dois blocos Y, dos quais foram extraídos seis corpos de prova no total, numerados de CP1 a CP6. Os corpos de prova

CP1, CP2 e CP3 foram retirados do primeiro bloco, e CP4, CP5 e CP6 do segundo, de modo que cada bloco forneceu amostras nas três posições definidas (11 mm, 25 mm e 39 mm), conforme a norma ASTM A536 [21].

Os resultados simulados de dureza em BRINELL, foram obtidos com o auxílio do programa de simulação MAGMASOFT®, para a previsão da dureza em toda a extensão da amostra. Para o ensaio nas amostras fundidas, utilizou-se o durômetro marca Panambra, com esfera de 5 mm, carga de 750 kgf. A leitura da impressão da calota foi realizada via programa MIPS.

A caracterização qualitativa dos corpos de prova foi realizada por microscopia óptica (MO), enquanto a análise quantitativa foi conduzida com o analisador de imagens MIPS. As amostras foram preparadas segundo técnicas metalográficas convencionais e atacadas com reagente Nital a 3%, por um tempo entre 2 e 4 segundos. A microscopia eletrônica de varredura (MEV), acoplada à espectroscopia por dispersão de energia (EDS), foi empregada na identificação e caracterização dos carbonetos. As análises de dureza e de microestrutura foram realizadas em regiões não afetadas pela fratura, nos corpos de prova extraídos a 11, 25 e 39 mm do bloco Y, após os ensaios mecânicos.

3 Resultados e discussão

A simulação computacional forneceu dados em relação ao número de nódulos de grafita, fração volumétrica

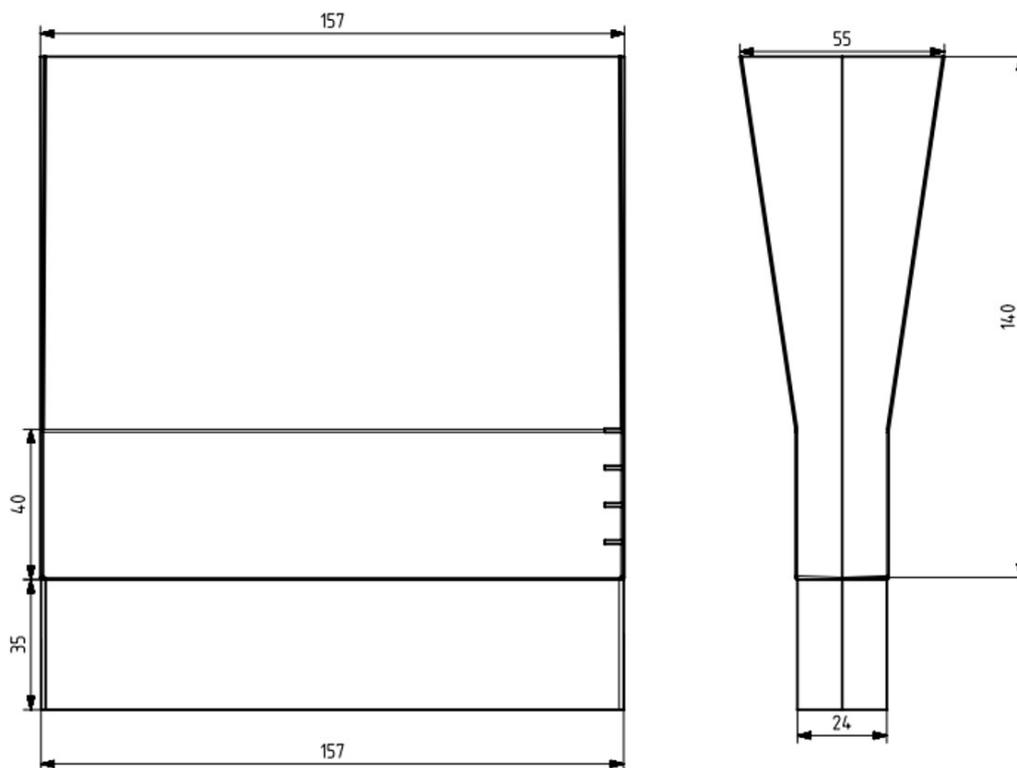


Figura 1. Dimensões em milímetros do corpo de prova em bloco Y [19].

de carbonetos, resistência à tração, limite de escoamento, percentual de alongamento e dureza.

Na simulação computacional, a região em contato com o resfriador apresenta maior densidade de nódulos de grafita, Figura 3a, cerca de 400 nód/mm², devido à extração acelerada de calor, que favorece a nucleação de mais partículas de grafita durante a solidificação; o que é condizente com a literatura [3,10].

A fração volumétrica de carbonetos, obtida por simulação computacional, apresenta um percentual máximo em torno de 10%, Figura 3b. A formação de carbonetos é

mais intensa na região em contato com o resfriador devido à alta taxa de extração de calor, a qual acelera a solidificação, aumentando o superresfriamento e, conseqüentemente, favorece a precipitação de carbonetos, de acordo com o que foi apresentado na literatura [2,5]. Esses resultados indicam que a mesma condição que aumenta o número de nódulos de grafita, aumenta a presença de carbonetos.

A Figura 4 apresenta os resultados de propriedades mecânicas obtidos por meio da simulação computacional. A região em contato com o resfriador, maior fração volumétrica de carbonetos (Figura 3b), apresenta os maiores valores

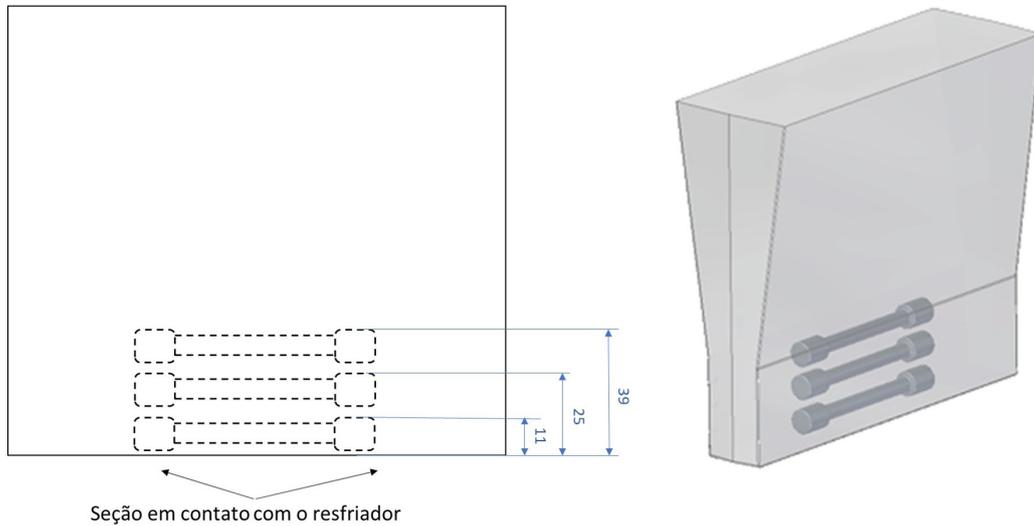


Figura 2. Representação esquemática da localização dos corpos de provas, para ensaio de tração, dureza e caracterização metalográfica, no bloco Y.

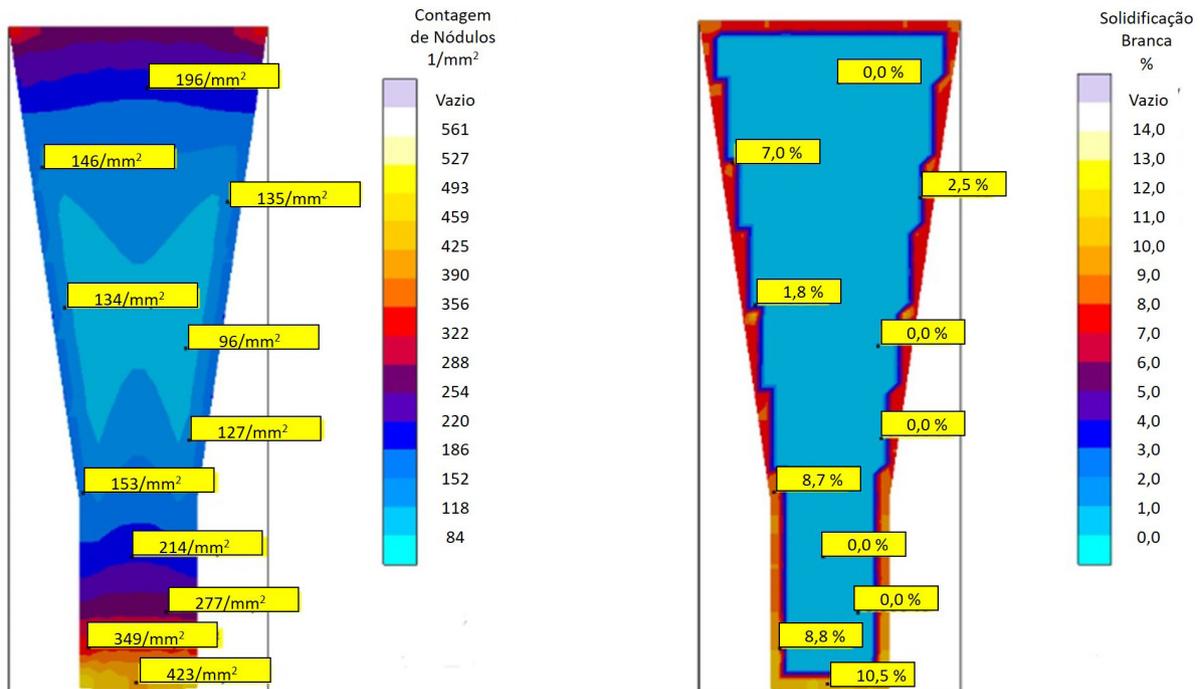


Figura 3. Simulação computacional com o software MAGMASOFT®, com potencial de nucleação *good*, temperatura de vazamento de 1040 °C, resfriador de aço AISI 1020 e desmoldagem após 40 min. (a) número de nódulos; (b) percentual de carbonetos.

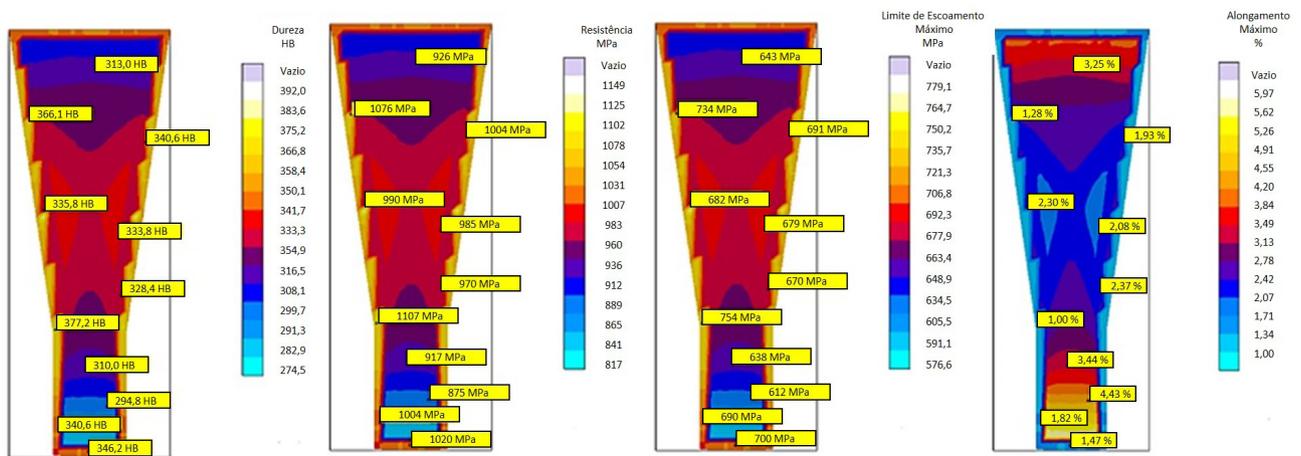


Figura 4. Propriedades mecânicas previstas para a liga de ferro fundido nodular “Simulada”, por meio da simulação computacional com o software MAGMASOFT®, com potencial de nucleação *good*, temperatura de vazamento de 1040 °C, resfriador de aço AISI 1020 e desmoldagem após 40 min.

de dureza (Figura 4a), de limite de resistência à tração (Figura 4b) e de limite escoamento (Figura 4c). Acima da área em contato com o resfriador, na área identificada em azul na escala de cores, os valores de resistência mecânica são menores em comparação com as regiões próximas ao resfriador e à parede do molde.

A ductilidade, determinada pelo máximo alongamento (Figura 4d) tem um comportamento inverso ao das propriedades de resistência mecânica.

Validadas as tendências microestruturais e de propriedades mecânicas pelas simulações, os corpos de prova no formato de bloco Y foram fundidos e os corpos de prova foram produzidos (Figura 2). A comparação entre os valores de dureza previstos por simulação computacional e aqueles medidos nas amostras fundidas apresentaram as mesmas tendências para as posições 11 e 25 mm, Figura 5. Para a posição a 39 mm do resfriador a dureza experimental apresentou um valor inferior ao simulado. O valor medido confirmou a queda de dureza com o distanciamento da superfície, o que era esperado, portanto, o erro encontra-se no valor simulado.

Conforme previsto pela simulação, as regiões mais próximas da seção em contato com o resfriador apresentaram maior fração volumétrica de carbonetos e uma maior quantidade de número de nódulos de grafita por milímetro quadrado, Tabela 2.

O resultado obtido para o grau de nodularização na superfície em contato com o resfriador, Tabela 2, foi inferior ao das demais regiões analisadas, indicando que a área com maior fração volumétrica de carbonetos apresentou redução na esferoidização dos nódulos de grafita.

Esse comportamento sugere a existência de uma correlação entre o aumento da fração volumétrica de carbonetos e a diminuição do grau de nodularização, possivelmente devido à competição entre a formação de carbonetos e a nucleação e crescimento dos nódulos grafiticos.

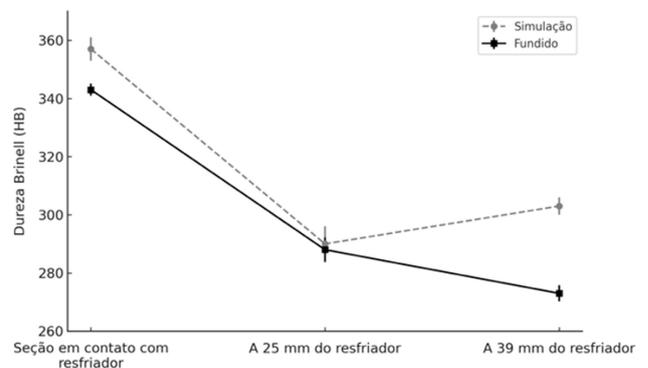


Figura 5. Gráfico de correlação de dureza entre os valores de dureza obtidos na simulação e os valores obtidos nos corpos de prova fundidos. Os valores apresentados para a simulação correspondem à média dos valores obtidos na simulação para a mesma região.

Em relação aos valores de resistência à tração e limite de escoamento obtidos para os corpos de prova das amostras fundidas (Figura 6), observou-se a mesma tendência verificada para os resultados de dureza: os corpos de prova extraídos nas regiões mais próximas ao resfriador apresentaram os maiores valores de resistência mecânica, enquanto o corpo de prova retirado a 39 mm da interface com o resfriador registrou os menores valores, para as amostras fundidas. As propriedades mecânicas medidas para as posições 25 e 39 mm são próximas. Os resultados de percentual de alongamento, para a amostra fundida em bloco Y mostram que o corpo de prova retirado da seção em contato com o resfriador, apresentou um percentual de alongamento menor em comparação com as demais posições.

A correlação entre os resultados de propriedades mecânicas simuladas pelo programa MAGMASOFT® e os dados obtidos experimentalmente nas amostras fundidas em

Tabela 2. Número de nódulos/mm², grau de nodularização e fração percentual de carbonetos nas diferentes seções analisadas dos corpos de prova (CP1 a CP6), extraídos de blocos Y fundidos. A seção “Resfriador” corresponde à região da amostra em contato direto com o inserto metálico

Seção	Nº Nódulos/mm ²	% Grau de Nodularização	% Carbonetos
Resfriador	454	85	15
11 mm (Cp1)	350	93	7
11 mm (Cp4)	346	92	8
25 mm (Cp2)	310	98	3
25 mm (Cp5)	295	96	5
39 mm (Cp3)	280	96	1
39 mm (Cp6)	285	98	0,5

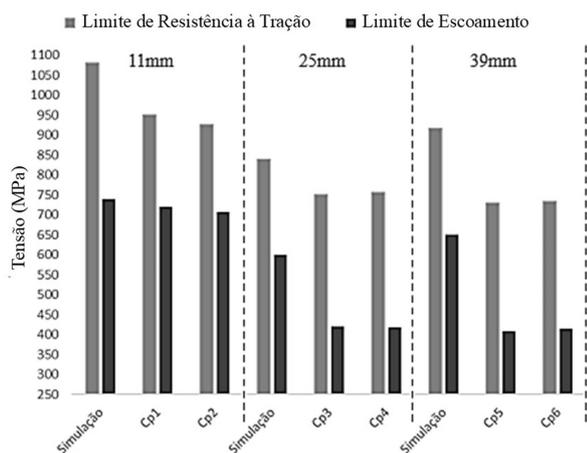


Figura 6. Comparação dos valores de resistência à tração e limite de escoamento obtidos amostra fundida em bloco Y e simulação computacional, para 11 mm da seção em contato com o resfriador, 25 mm da seção em contato com o resfriador e 39 mm da seção em contato com o resfriador.

bloco Y evidenciou divergências significativas nas regiões mais afastadas do resfriador.

Segundo a simulação computacional, essas regiões tenderiam a apresentar valores elevados de dureza, resistência à tração e limite de escoamento, além de menor ductilidade, em função da menor influência térmica do resfriador. No entanto, os ensaios experimentais demonstraram um comportamento inverso: nas seções mais distantes do resfriador, observaram-se menores valores de dureza e resistência à tração, enquanto a ductilidade foi superior. Essa discrepância pode ser atribuída a limitações do modelo numérico na representação precisa das condições reais de solidificação, incluindo variações locais na nucleação da grafita, no grau de inoculação ou na distribuição térmica ao longo do corpo de prova. Tais fatores, embora críticos para a formação microestrutural, nem sempre são plenamente capturados pelas simulações. Tanto nas simulações quanto nos ensaios experimentais, as propriedades mecânicas observadas estão diretamente relacionadas à proporção de ferrita, perlita, carbonetos e à quantidade e morfologia dos nódulos de grafita na

microestrutura. No entanto, essas proporções podem variar devido a fatores inerentes ao processo de fundição, o que pode impactar os resultados obtidos.

A análise microestrutural da amostra fundida evidenciou uma redução gradual na fração volumétrica de carbonetos à medida que aumenta a distância em relação ao resfriador. Na Figura 7, a imagem (a), correspondente à superfície em contato direto com o resfriador, apresenta aproximadamente 15% de carbonetos. A 11 mm dessa interface, imagem (b), essa fração reduz-se para 7%. Na imagem (c), referente à seção a 25 mm da superfície, observa-se uma nova redução para 3%, enquanto na imagem (d), a 39 mm, a fração de carbonetos é de apenas 1%. Os carbonetos estão indicados por setas nas imagens. Para todas as micrografias, o foco foi ajustado de forma a realçar a presença dos carbonetos, permitindo melhor visualização e distinção dessas fases. Essa variação confirma a influência direta da taxa de resfriamento sobre a formação de carbonetos: quanto maior a proximidade com o resfriador, maior a taxa de resfriamento e, conseqüentemente, maior a precipitação de carbonetos na microestrutura.

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras fundidas do bloco Y evidenciou alterações significativas na microestrutura em função da distância em relação ao resfriador. Na Figura 8a, correspondente à superfície em contato direto com o resfriador, observa-se uma elevada fração volumétrica de carbonetos. Na Figura 8b, a 11 mm da superfície, identificam-se nódulos de grafita distribuídos em uma matriz composta por perlita, ferrita e ainda com presença de carbonetos. A Figura 8 (c), referente à seção a 25 mm da superfície, mostra uma matriz com nódulos de grafita, perlita e ferrita; nesta condição, não foi possível identificar a presença de carbonetos com aumento de 2500x, somente em 5000x. Já na imagem (d), a 39 mm da superfície, a microestrutura mantém a presença de ferrita e perlita, além de nódulos de grafita e uma reduzida fração volumétrica de carbonetos. Esses resultados indicam que a proximidade com o resfriador favorece a formação de carbonetos devido à maior taxa de resfriamento, enquanto o afastamento promove uma microestrutura mais equilibrada, com predomínio de fases metálicas dúcteis, como ferrita e perlita.

Corroborando os dados observados para o grau de nodularização na superfície em contato com o resfriador (Tabela 2), as análises das micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para imagem (a) da Figura 8, revelam que os carbonetos ricos em cromo tendem a se formar nas proximidades dos nódulos de grafita ou mesmo a partir deles, utilizando-os como substrato para sua precipitação. Esse padrão microestrutural reforça a hipótese de que a presença de carbonetos interfere no processo de esferoidização da grafita, contribuindo para a redução do grau de nodularização nas regiões com maior fração de carbonetos.

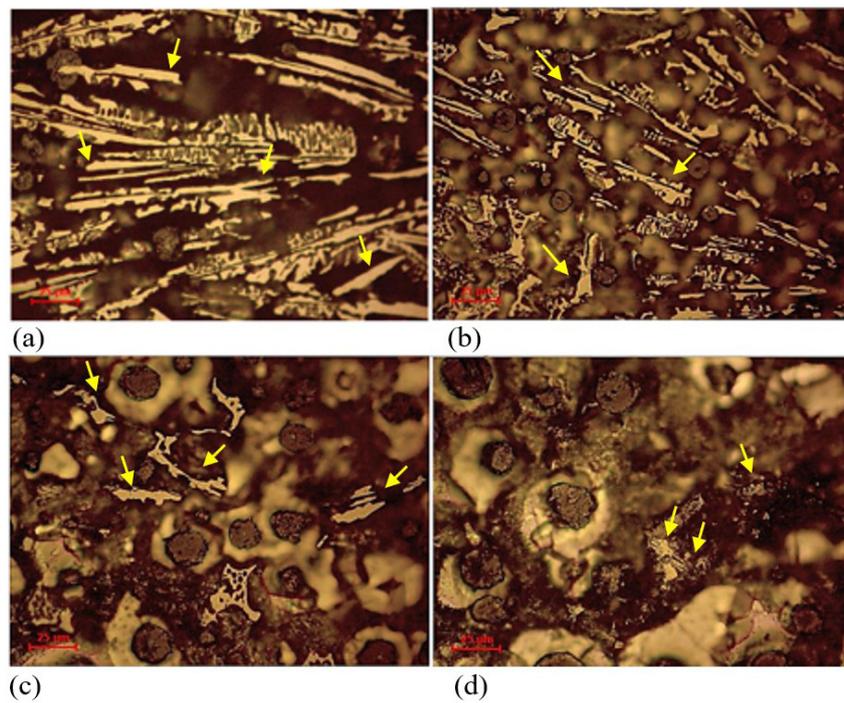


Figura 7. Caracterização metalográfica das amostras fundidas em bloco Y mostrando variações microestruturais conforme a distância do resfriador. (a) superfície em contato com o resfriador; (b) 11 mm da superfície; (c) 25 mm da superfície; (d) 39 mm da superfície. As setas indicam os carbonetos. Ataque com Nital. Microscopia ótica.

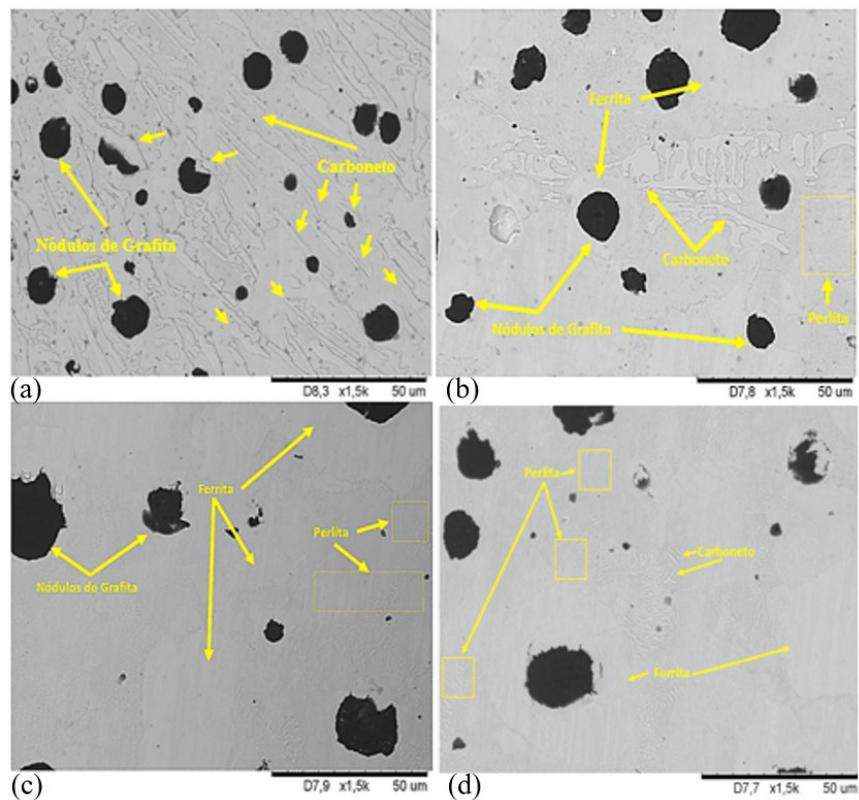


Figura 8. Análise por MEV das amostras fundidas em bloco Y mostrando variações microestruturais conforme a distância do resfriador. (a) superfície em contato com o resfriador; (b) 11 mm da superfície; (c) 25 mm da superfície; (d) 39 mm da superfície. Sem ataque.

4 Conclusão

A adição de 0,5% em peso de cromo ao ferro fundido nodular promoveu a formação de carbonetos, especialmente nas regiões em contato com o resfriador metálico (aço SAE 1020). Essa precipitação localizada contribuiu para o aumento da dureza e da resistência mecânica superficial do material.

A combinação entre o elemento de liga e o resfriamento direcionado mostrou-se eficaz na modificação da microestrutura da zona adjacente ao inserto, com incremento na fração volumétrica de carbonetos, refletindo em maiores valores

de dureza, limite de escoamento e resistência à tração, além de menor ductilidade.

Nas regiões mais afastadas do resfriador, preservaram-se as características típicas do ferro fundido nodular, com predominância de nódulos de grafita e matriz composta por perlita e ferrita, mantendo valores de propriedades mecânicas compatíveis com os do ferro fundido nodular comum.

Os resultados evidenciam o potencial do cromo como elemento de liga para aplicações que demandam maior resistência ao desgaste, oferecendo uma alternativa viável para o reforço superficial de componentes fundidos.

Referências

- 1 Stefanescu DM. Modeling of cast iron solidification—the defining moments. *Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science*. 2007;38(7):1433-1447. <http://doi.org/10.1007/s11661-007-9173-y>.
- 2 Guesser WL. *Propriedades mecânicas dos ferros fundidos*. Joinville: Ed. Univille; 2012.
- 3 Skaland T. Nucleation mechanisms in ductile iron. In: *Proceedings of the AFS Cast Iron Inoculation Conference; 2005; Schaumburg, IL*. Schaumburg: American Foundry Society; 2005. p. 13-30.
- 4 Kopyciński D, Dorula J. The influence of iron powder and disintegrated steel scrap additives on the solidification of cast iron. *Metallurgy and Foundry Engineering*. 2010;36(2):97. <http://doi.org/10.7494/mafe.2010.36.2.97>.
- 5 Muhmond HM. *On the inoculation and graphite morphologies of cast iron [thesis]*. Stockholm: Royal Institute of Technology; 2014.
- 6 Santos ABS, Branco CHC. *Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas; 1991.
- 7 Basso A, Sikora J. Review on production processes and mechanical properties of dual phase austempered ductile iron. *International Journal of Metalcasting*. 2012;6(1):7-14. <http://doi.org/10.1007/BF03355473>.
- 8 Al-Ghonamy A, Ramadan M, Fathy N, Hafez KM, El-Wakil AA. Effect of graphite nodularity on mechanical properties of ductile iron for waterworks fittings and accessories. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*. 2010;10:1-5.
- 9 Pearce J. Inoculation of cast irons: practices and developments. *Foundry Trade Journal*. 2008;181(3651):28-31.
- 10 Petrus Ł, Bulanowski A, Kołakowski J, Brzeźński M, Urbanowicz M, Sobieraj J, et al. The influence of selected melting parameters on the physical and chemical properties of cast iron. *Archives of Foundry Engineering*. 2020;20(1):105-110.
- 11 Vicente AA, Sartori Moreno JR, Santos TFA, Espinosa DCR, Tenório JAS. Nucleation and growth of graphite particles in ductile cast iron. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;775:1230-1234. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.136>.
- 12 Campbell J. *Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design*. 1st ed. Waltham: Elsevier; 2011.
- 13 Kocatepe K, Ceraç M, Erdogan M. Effect of martensite volume fraction and its morphology on the tensile properties of ferritic ductile iron with dual matrix structures. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;178(1-3):44-51. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.019>.
- 14 Martinez Celis M, Valle N, Lacaze J, Thorbjornsson IÖ, Johannesson B, Thorgrimsson JT. Microstructure of as-cast reinforced ductile iron. *International Journal of Cast Metals Research*. 2011;24(2):76-82. <http://doi.org/10.1179/136404610X12738456167384>.
- 15 Shamanian M, Mousavi Abarghouie SMR, Mousavi Pour SR. Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron. *Surface and Coatings Technology*. 2010;204(18-19):2910-2919.
- 16 Nascimento D, Santana PI. *Ferros fundidos cinzento e branco*. Joinville: Nova Letra; 2016.
- 17 Stefanescu DM. *Science and engineering of casting solidification*. 2nd ed. New York: Springer; 2009.

- 18 Tabrett CP, Sare IR, Ghomashchi MR. Microstructure-property relationships in high chromium white iron alloys. *International Materials Reviews*. 1996;41(2):59-82. <http://doi.org/10.1179/imr.1996.41.2.59>.
- 19 Oliveira LMO. Comportamento mecânico dos ferros fundidos avançados. Joinville: Ed. Univille; 2016.
- 20 Santos ABS. Efeitos da composição química na produção de ferros fundidos nodulares. In: *Anais do 55º Congresso Anual da ABM; 2000; Rio de Janeiro, Brasil*. São Paulo: ABM; 2000.
- 21 American Society for Testing and Materials. ASTM A536-84: standard specification for ductile iron castings. West Conshohocken: ASTM International; 2019.

Recebido em: 9 Mar. 2025

Aceito em: 8 Jul. 2025

Editor responsável:

André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva 