

Avaliação prática da efetividade da nodularização *in mold* e sua aplicação na definição da microestrutura e das características dos ferros fundidos nodulares

Cláudio Lúcio Pereira dos Santos ^{1*} 

Elaine Carballo Siqueira Corrêa ² 

Joel Lima ² 

Resumo

Uma das etapas mais importantes da tecnologia de fabricação de ferros fundidos nodulares está relacionada aos processos de nodularização. Entretanto, há escassez de fontes de informações técnicas que sintetizem e comparem as características dos processos de nodularização, induzindo sua realização de modo empírico (tentativa e erro), e levando à adoção de processos com baixo desempenho, altos custos, elevados riscos e impactos ambientais. O presente artigo descreve os principais processos de nodularização, destacando o rendimento residual de magnésio em cada um deles. A partir deste levantamento, foi desenvolvido procedimento experimental para avaliar e comprovar a maior eficiência da nodularização “*in mold*”, em relação aos demais processos descritos, por meio do rendimento do magnésio. Nos experimentos foram utilizados corpos de prova escalonados com diferentes seções para verificar a influência da velocidade de resfriamento na formação da grafita esferoidal e na constituição da matriz metálica, de forma a demonstrar a eficácia da nodularização *in mold* e apresentar os resultados de microestrutura para cada espessura. Constatamos que o processo “*in mold*” possibilita um eficiente controle da nodularização, alcança maior rendimento do magnésio (acima de 80%), conforme descrito na bibliografia e, como consequência, elevado grau de nodularização (acima de 90%).

Palavras-chave: Processos de nodularização; Ferro fundido nodular; Nodularização *in mold*.

Practical evaluation of the effectiveness of nodularization in mold and its application in defining the microstructure and characteristics of ductile iron

Abstract

One of the most important steps in the manufacturing technology of ductile iron is related to the nodularization processes. However, there is a scarcity of sources of technical information that synthesize and compare the characteristics of the nodularization processes, inducing their realization in an empirical way (trial and error), and leading to the adoption of processes with low performance, high costs, high risks and environmental impacts. This article describes the main nodularization processes, highlighting the residual magnesium yield in each of them. From this survey, an experimental procedure was developed to evaluate and prove the greater efficiency of “*in mold*” nodularization, in relation to the other processes described, through the magnesium yield. In the experiments, staggered specimens with different sections were used to verify the influence of the cooling rate on the formation of spheroidal graphite and on the constitution of the metallic matrix, in order to demonstrate the effectiveness of nodularization in mold and present the microstructure results for each thickness. We found that the “*in mold*” process allows for an efficient control of nodularization, achieves a higher yield of magnesium (above 80%), as described in the bibliography and, as a consequence, a high degree of nodularization (above 90%).

Keywords: Nodularization processes; Ductile iron; In mold nodularization processes.

¹TUPY-MG Ltda., Betim, MG, Brasil.

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Departamento de Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

*Autor correspondente: santosclps44@gmail.com



1 Introdução

O crescente interesse nas três últimas décadas pelo estudo do ferro fundido nodular se fundamenta na capacidade deste material de combinar, no estado bruto de fundição, ductilidade e resistência mecânica, características propiciadas pela forma esferoidal ou nodular da grafita. Esta combinação de propriedades posiciona esse tipo de ferro fundido como uma alternativa potencial para substituir os aços em muitas aplicações industriais, com ganhos como menor peso final e custo de produção reduzido, além de aspectos estratégicos, uma vez que sua logística de produção é também diferente, se comparada à dos aços [1-3]. Em adição à resistência mecânica e à capacidade de deformação, essa última considerada excepcional para um ferro fundido, a ponto de ser denominado ferro dúctil, o ferro fundido nodular reúne ainda as especificidades dos ferros fundidos em geral, como a fluidez, que viabiliza a obtenção de geometrias complexas, e a resistência à oxidação, devendo ainda ser considerada a questão econômica [4].

Entretanto, um item importante para garantir a qualidade dos componentes produzidos em ferro fundido nodular são os métodos ou tratamentos de nodularização, processo no qual ocorre a adição de elementos de liga responsáveis pelo mecanismo de modificação da morfologia da grafita, ou sua esferoidização, chamados; nodularizantes, como o magnésio, capaz de definir a microestrutura do material durante a fundição sem a necessidade de tratamentos térmicos prolongados e elevados custos [3]. O cenário mundial, por motivos diversos, acena com a expectativa e demanda por materiais de engenharia com combinação de propriedades mecânicas e tecnológicas excepcionais e o ferro fundido nodular se enquadra como uma atraente opção para atender aos padrões de engenharia e às novas considerações de design [5]. A utilização de ferros fundidos nodulares, por exemplo, na fabricação de componentes automotivos em todo o mundo tem sido ampliada desde as décadas de 1970 e 1980 [6].

A principal característica metalúrgica do ferro fundido nodular é a presença de grafita na forma de esferóides distribuídos na matriz metálica que, por sua vez, pode exibir

diferentes constituintes de acordo com as necessidades de aplicação [7]. O ferro fundido nodular apresenta matriz predominantemente ferrítica e matriz composta de ferrita e perlita. Contudo, ainda é possível obter matrizes predominantemente perlíticas e mesmo alterá-las, por meio de tratamentos térmicos, como a austêmpera [5].

Um parâmetro considerado importante é o chamado rendimento do magnésio, que pode ser entendido pela medida da razão entre a quantidade de magnésio adicionada à liga e o conteúdo final deste elemento químico no ferro fundido. Quanto maior a recuperação do magnésio obtida nesta razão, maior será seu rendimento. Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos desvios de microestrutura que podem comprometer as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular se a técnica empregada no processo de nodularização não for analisada quanto aos objetivos desejados e bem elaborada tecnicamente [8].

Para a determinação do processo a ser empregado, é importante conhecer os métodos existentes e promover a escolha de acordo com as instalações disponíveis e, principalmente, em função das especificações do produto quanto à aplicação e suas características de forma e dimensão (velocidade de solidificação) que em conjunto com a composição base e nodularização definirão a microestrutura resultante e, conseqüentemente, as propriedades do material no estado bruto de fundição [9].

Ressalta-se que o grau de nodularização em cada processo está estreitamente ligado ao rendimento do magnésio. Sendo este reduzido o grau de nodularização fica dependente da conjunção favorável de outros fatores (espessura – velocidade de resfriamento/solidificação, composição do ferro base, tempo e temperatura de vazamento), tornando-se quase aleatório [8]. Nesse caso, é importante considerar que as principais normas internacionais usadas como referência para produção dos ferros fundidos com grafita e, particularmente, dos ferros fundidos nodulares, não definem a composição química para o produto, ficando a definição da liga e dos teores dos elementos químicos a cargo do fornecedor em função da espessura/geometria do

Tabela 1. Tipo e razão dos desvios das microestruturas do ferro nodular [8]

Desvios na microestrutura - grafita	Causas potenciais
Formação insuficiente de nódulos – grau de nodularização	- Teor de magnésio inferior a 0,03%. - Carbono equivalente baixo.
Grafita explodida	- Metal líquido com composição química hipereutética. - Teores elevados de magnésio residual.
Flotação da grafita – acumulação primária dos nódulos separados do banho fundido	- Metal líquido com composição química hipereutética. - Tempos longos de resfriamento e solidificação
Grafita chunky – grafita intracelular finamente distribuída em partículas arredondadas	- Tempo longo de solidificação. - Teores de silício, níquel e cálcio elevados.
Grafita lamelar na periferia da peça	- Tempos longos de resfriamento e solidificação. - Excesso de enxofre.
Grafita de formato irregular	- Inoculação insuficiente. - Presença de elementos que degeneram a grafita

produto. Em alguns casos, somente os elementos considerados contaminantes são limitados.

As características dos principais processos de nodularização habitualmente utilizados pelo setor de fundição, com seus respectivos rendimentos de magnésio serão apresentadas para que se permita compará-los.

1.1 Principais tipos de nodularização

Na Tabela 2 são apresentados os principais tipos de processos de nodularização e suas características.

A Tabela 3 mostra um comparativo entre os processos de nodularização citados considerando o percentual de rendimento do magnésio [8,10-13,16,19-21].

Diante do rendimento estimado para o método de nodularização *in mold* e também por fatores positivos que o método apresenta como, por exemplo, menor impacto ambiental e maior segurança, elaborou-se um procedimento experimental para verificar a eficiência do tratamento de

nodularização *in mold* e a eficácia do controle deste processo em relação à microestrutura desejada, apresentado a seguir.

2 Materiais e métodos

Considerando o fato de que a efetividade da nodularização é dependente do método escolhido e seus resultados podem variar conforme a espessura do componente, optou-se pela utilização de um corpo de prova com escalonamento de espessura elaborado pelo autor, conforme a Figura 1a. Nesse caso, foi elaborado o projeto de alimentação e enchimento compatível com as recomendações com auxílio do software de simulação MAGMASOFT®, seguindo as práticas usuais de fundição, ou seja, o massalote foi posicionado na região de maior massa do corpo de prova, conforme a Figura 1b. O ferramental (modelo e canais) foi fabricado pelo processo de usinagem em placa de resina ZCON-WB-1404 e montado em placa metálica.

Tabela 2. Principais tipos de processos de nodularização e suas características

Processo Simples Transferência
A liga nodularizante é colocada do lado oposto ao que recebe o metal do forno, retardando o início da reação entre a liga e o banho metálico. O processo é simples, mas apresenta efeito pirotécnico intenso (emissão de gases, fumos, explosões e luminosidade) [10].
Processo Sandwich
A liga nodularizante é adicionada na cavidade no fundo da panela e em seguida faz-se a cobertura com chapas de aço. O objetivo da cobertura é retardar a reação do metal líquido com a liga, reduzindo as perdas de magnésio por oxidação e vaporização [11].
Processo Tundish Cover
Baseia-se em uma panela com tampa de orifício afunilado, limitando o volume de ar em contato com o metal líquido dentro da panela [9]. A panela dotada com tampa diminui a quantidade de fumos de magnésio e o efeito pirotécnico da reação, reduzindo problemas ambientais [12].
Processo Tratamento no Fluxo de Metal – Flotret
Utiliza-se um reator para nodularização no fluxo de metal. A liga nodularizante é colocada em uma câmara no reator que funciona de forma contínua [13]. As áreas de entrada e saída do fluxo de metal da câmara devem ter um controle apurado para favorecer uma perfeita dissolução da liga [4,14,15].
Processo Panela Rotativa
Um reator cilíndrico é utilizado, com uma capacidade de 500 kg a 3 toneladas, que gira em torno do seu próprio eixo [16]. Com o giro do reator aproximadamente a 120 graus, o metal líquido entra em contato com a liga nodularizante, até que a câmara volte à sua posição inicial [16].
Processo Plug Poroso
Permite a adaptação de uma panela, que apresenta na parte inferior um <i>plug</i> poroso de refratário [17]. Injeta-se nitrogênio para agitar o banho, realizando o processo de dessulfuração [18]. A escória é retirada após a dessulfuração e quando é reiniciada a injeção de nitrogênio, adiciona-se a liga nodularizante na superfície do banho metálico.
Processo Injeção
A liga nodularizante é introduzida no metal líquido através de correntes de gás inerte. O transporte da liga é uma espécie de lança de grafita dotada de orifícios, que é mergulhada no metal líquido [10]. Os tratamentos de nodularização e dessulfuração podem ser realizados simultaneamente [11].
Processo Imersão por Sino
É dotado de uma panela com uma tampa na parte superior e um sino de aço com vários orifícios fixado na tampa, revestido com material refratário de grafite que contém a liga nodularizante [17]. A reação de nodularização ocorre quando o sino é submerso no banho líquido [7].
Processo Conversor Georg Fischer
Apresenta um conversor com uma câmara de reação refratária composta de orifícios, situada na extremidade oposta à bica do reator, que sofre movimento de rotação de quase 180° em torno do eixo horizontal. Após o preenchimento do reator com metal líquido, ele é fechado e efetua-se a rotação de 90° para iniciar a reação do metal com a liga nodularizante [18].
Processo Arame contendo Magnésio
Um arame tubular é utilizado contendo a liga nodularizante que é introduzido no metal líquido para realizar o tratamento de nodularização. Definido o peso do metal, a composição química e o teor de magnésio residual, calcula-se o comprimento e a velocidade do arame tubular a ser mergulhado no metal líquido na panela [18].
Processo Nodularização <i>in Mold</i>
A liga nodularizante é adicionada no molde por meio de uma câmara de reação junto ao sistema de canais projetada com dimensões calculadas. À medida que o metal líquido flui pelos canais, este entra em contato com a liga nodularizante promovendo sua reação. Após a reação na câmara, o metal tratado segue o fluxo pelas cavidades dos canais e peças [10].

Com o objetivo de analisar o rendimento do magnésio para o processo *in mold*, a câmara de reação foi dimensionada para comportar o correspondente a 0,8% de liga nodularizante sobre o volume de metal a ser vazado (feixe da peça), exceto a bacia e a coluna de vazamento. Os escalonamentos do corpo de prova foram nas espessuras de 5mm, 12mm, 25mm, 50mm e 70mm. Para evitar a formação dos defeitos de fundição de junta fria e bolhas, na região de menor espessura do corpo de prova foi projetada

Tabela 3. Comparativo entre os processos de nodularização considerando o rendimento do magnésio

Processos de nodularização	Rendimento do magnésio (%)
Simple transferência	20 a 25
Sandwich	40 a 45
Tundish cover	60 a 70
Flotret	55 a 70
Panela rotativa e Georg Fischer	45 a 50
Plug poroso, Injeção e Imersão por sino	50 a 55
Arame	40 a 60
In mold	80 a 100

a saída de gás. A massa de todo o sistema de canais, bacia de vazamento e corpos de prova foi de 87,9 kg e a vazão prevista foi de 6,5 kg/s. A Figura 2 ilustra o projeto do ferramental, os componentes do sistema de alimentação, o enchimento e a câmara de reação.

Os moldes foram confeccionados em máquina utilizando areia aglomerada com argila. Foi utilizado 302,5 gramas de liga FeSiMg, contendo aproximadamente 5,5% de Mg e granulometria predominante de 1,0 mm, distribuída em cada câmara de reação. O controle da região da altura do extra câmara foi conduzido com régua milimetrada, conforme ilustrado na Figura 3. Foram utilizados filtros cerâmicos com diâmetro de 60 mm e altura de 17mm para auxiliar na retenção de impurezas.

A composição química de referência do ferro fundido nodular está descrita na Tabela 4, especificada para atender aos requisitos da norma ASTM A 536 (80-55-06).

Para a fusão em forno elétrico à indução, a temperatura da liga no forno foi de 1480 °C a 1500 °C. A temperatura estipulada para o vazamento dos moldes foi de 1410 °C a 1430 °C, o vazamento foi realizado com panela revestida com refratário sem tampa ou cobertura isolante. A medição da temperatura foi realizada/monitorada com pirômetro de

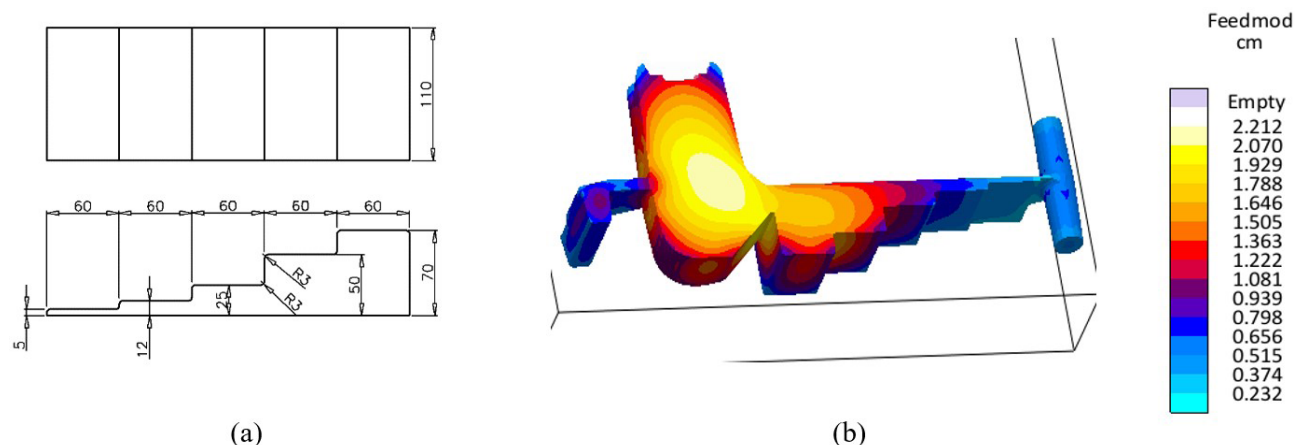


Figura 1. (a) Detalhes do corpo de prova escalonado; (b) Simulação computacional de fundição.

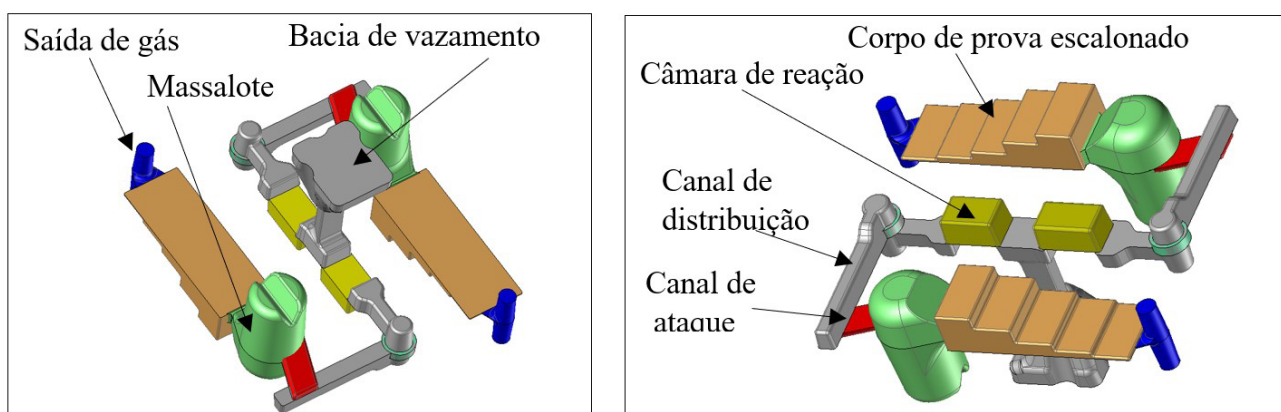


Figura 2. Projeto do ferramental e componentes do sistema de alimentação, enchimento e câmara de reação.

imersão, utilizando termopares descartáveis. Os percentuais de carbono e enxofre foram obtidos pela combustão de amostras no equipamento analisador de carbono e enxofre CS744 da marca LECO.

As concentrações dos demais elementos químicos foram determinadas pelo método da espectrometria de emissão óptica empregando o equipamento Spectrolab do fabricante Spectro. Na Figura 4 pode ser observado o material solidificado. Na Figura 4a é mostrado o feixe fundido (corpo de prova e canais), não sendo observados indícios de falha de alimentação nas regiões dos corpos de prova. Na Figura 4b é apresentado o corpo de prova (com seu massalote) seccionado, evidenciando a superfície submetida à análise metalográfica.



Figura 3. Distribuição da liga nas câmaras de reação.

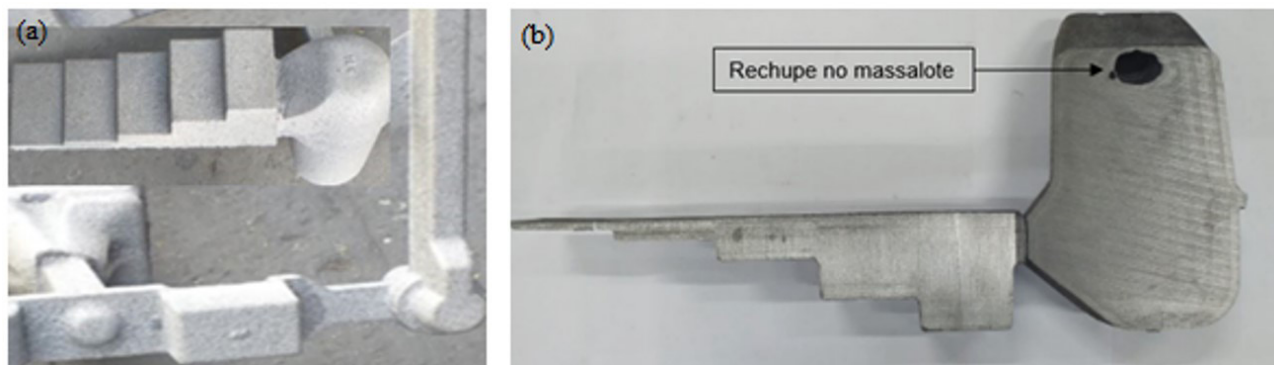


Figura 4. (a) Canais e corpo de prova fundido; (b) Corpo de prova escalonado e massalote seccionados.

Tabela 4. Composição química de referência do ferro fundido nodular

Elemento químico	%C	%Si	%Mn	%Cu	%P	%S	%Sn	%Mg residual
Faixa: mín.	3,55	2,09	0,19	0,36	0,000	0,000	0,004	0,030
máx.	3,83	2,38	0,25	0,43	0,059	0,012	0,007	0,041

Tabela 5. Resultados de composição química (% em peso) comparados à faixa pretendida

Elemento químico	%C	%Si	%Mn	%Cu	%P	%S	%Sn	%Mg residual
Faixa: mín.	3,55	2,09	0,19	0,36	0,000	0,000	0,004	0,030
máx.	3,83	2,38	0,25	0,43	0,059	0,012	0,007	0,041
Resultado	3,57	2,37	0,23	0,37	0,050	0,011	0,0042	0,031

Para a avaliação da microestrutura do material, amostras foram retiradas da região central de cada espessura do corpo de prova escalonado utilizando-se uma cortadora metalográfica. Essas amostras foram avaliadas quantitativamente quanto a fatores relacionados tanto às características da grafita (amostra sem ataque químico) como às características da matriz desenvolvida (amostra com ataque químico). O procedimento de preparação metalográfica conduzido foi o convencional, envolvendo embutimento a frio, lixamento e polimento com pasta de diamante. O ataque químico foi realizado com o reativo Nital 3%. Dez imagens de cada condição foram avaliadas. Em relação às características da grafita, verificou-se o grau de nodularização. Em relação à matriz, determinou-se a proporção dos constituintes perlita e ferrita conforme norma ASTM A247-17. As análises empregaram um microscópio óptico Olympus e o software Olympus Stream.

3 Resultados e discussão

Na Tabela 5 podem ser observados os resultados de composição química (% em peso) do ferro fundido estudado com as faixas pretendidas para cada elemento. Verifica-se que a composição química obtida é coerente com o que foi planejado.

A partir dos resultados obtidos, foi possível calcular o percentual de rendimento do magnésio por meio da seguinte Equação 1 [22]:

$$Q = P \times \left[\frac{0,76(\%S - 0,01) + K + 1 \times 10^{-3}}{R \times \%Mg} \right] \times \left(\frac{T}{1450} \right)^2$$

$$0,605 = 87,9 \times \left[\frac{0,76(0,011 - 0,01) + 0,031 + 0,25 \times 10^{-3}}{[(R \times 5,5) / 100]} \right] \times \left(\frac{1420}{1450} \right)^2 \quad (1)$$

Rendimento R = 81%

Onde: i) Q: quantidade, em quilogramas, da liga de magnésio (0,3025 para cada câmara de reação); ii) P: quantidade, em quilogramas, do metal líquido a ser tratado (87,9kg); iii) S: teor em enxofre do ferro fundido base (0,011%); iv) K: teor residual em magnésio no ferro fundido tratado (0,031%); v) t: tempo, em minutos, entre o tratamento e o vazamento da última peça (0,25 minutos); vi) T: temperatura média do metal líquido, em °C, no momento do tratamento (1420 °C); vii) R: rendimento do magnésio, em porcentagem, no tratamento; viii) Mg: porcentagem de magnésio na liga utilizada no tratamento (5,5%).

O experimento evidenciou que, por meio do processo de nodularização *in mold*, é possível atingir um rendimento do magnésio superior a 80%, conforme a literatura [10,21].

Os resultados da avaliação da microestrutura do corpo de prova de ferro fundido nodular escalonado nas regiões de 1 a 5 podem ser observados no Figura 5, no qual são mostradas imagens obtidas por microscopia óptica com e sem ataque químico para cada condição avaliada e os resultados médios da análise quantitativa realizada quanto ao grau de nodularização e à matriz desenvolvida no material.

Esses resultados evidenciam que o grau de nodularização foi superior a 90%, variando de 91% a 93%. Segundo a Norma ASTM A247-17, os dados apresentados caracterizam o material como um ferro fundido nodular. Verifica-se que a espessura e a taxa de resfriamento, não influenciaram no grau de nodularização do ferro fundido.

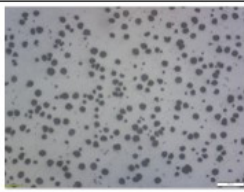
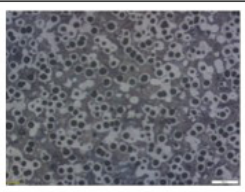
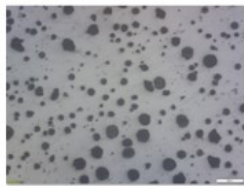
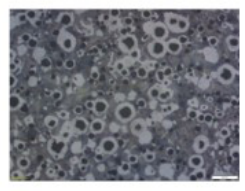
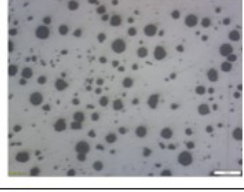
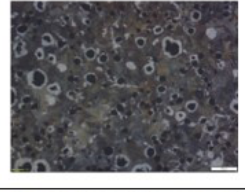
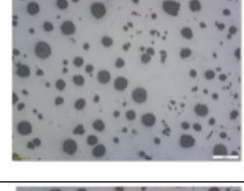
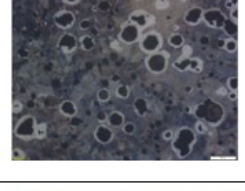
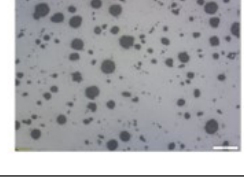
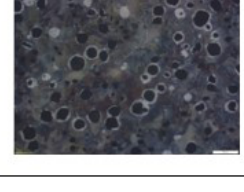
Região	Espessura do Corpo de Prova Escalonado	Microestrutura com resolução de 100 µm		Análise Quantitativa
		Imagem sem ataque químico	Imagem com ataque químico	
1	5 mm			Matriz - 60% de perlita Grafita - grau de nodularização de 93%.
2	12 mm			Matriz - 63% de perlita Grafita - grau de nodularização de 91%.
3	25 mm			Matriz - 82% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.
4	50 mm			Matriz - 89% de perlita Grafita - grau de nodularização de 91%.
5	70 mm			Matriz - 91% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.

Figura 5. Análise da microestrutura no corpo de prova de ferro fundido nodular escalonado.

Por outro lado, a matriz metálica exibiu diferentes proporções de perlita e ferrita de acordo com a espessura do corpo de prova. A quantidade maior de perlita nas regiões de maior espessura pode ser explicado por dois fatores: i) pelo tempo de desmoldagem que foi equivalente a 30 minutos pois seguiu o tempo de ciclo da linha de moldagem. As regiões de menor espessura resfriaram no molde com a presença de areia silico argilosa sintética. As regiões de maior espessura estavam em processo de resfriamento durante a desmoldagem e sofreram um pequeno “choque térmico” e ii) as regiões de menor espessura contém maior quantidade de nódulos por área do que as regiões de maior espessura e como cada nódulo é envolto por uma camada de ferrita, seu percentual é maior nas espessuras mais finas [23].

As boas práticas de fundição e a escolha de um processo adequado e devidamente controlado para a nodularização são fundamentais para o êxito da fabricação de componentes diversos e o desenvolvimento de novas aplicações para este importante material. É imprescindível que as publicações de resultados de pesquisa sobre o ferro fundido nodular informem o método de nodularização utilizado, pois a omissão dificulta a repetibilidade de resultados por outros pesquisadores ou mesmo a reprodução dos experimentos em escala de produção.

4 Conclusões

A qualidade dos ferros fundidos nodulares está diretamente relacionada ou é dependente do tratamento de nodularização. As características de cada processo em uso no setor foram apresentadas resumidamente destacando o

rendimento de magnésio como um fator de comparação e êxito entre os processos apresentados. A técnica de nodularização *in mold* é a que leva a um maior rendimento de magnésio se comparado a outros processos de nodularização, possibilitando um melhor controle do grau de nodularização, das características microestruturais, favorecendo as propriedades mecânicas e, ainda, a questão ambiental. A formação de gases é atenuada e a parte pirotécnica (explosões características da reação do magnésio durante o contato com o ferro base que ocorre em quase todos os casos) inexistente nesse processo, pois a reação ocorre dentro do molde. Além disso, nesse processo o tempo de reação da liga e a solidificação do metal é muito curto, favorecendo um excelente efeito de nucleação e nodularização, tornando inexistente o tempo de *fading* (perda do efeito da liga nodularizante).

A obtenção de ferro fundido nodular com a nodularização *in mold* no experimento realizado apresentou grau de nodularidade superior a 90% em todas as espessuras do corpo de prova escalonado. Evidenciou-se, por meio dos resultados obtidos, um rendimento do magnésio de 81%, confirmando as referências estudadas e que informam que nos processos mais utilizados, estão em torno de 50% ou menos. Este dado permite prever a redução da liga nodularizante, o que melhora a viabilidade econômica, reduz a tendência à formação de carbonetos em seções finas, eliminando, assim, a necessidade de uso de inoculante adicional.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET-MG e à TUPY-MG Ltda pelo apoio para o desenvolvimento do trabalho.

Referências

- 1 Akinribide OJ, Olusunle SOO, Akinwamide SO, Babalola BJ, Olubambi PA. Impact of heat treatment on mechanical and tribological behavior of unalloyed and alloyed ductile iron. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;14:1809-1819.
- 2 Wang B, Qiub F, Barber GC, Pan W, Cui W, Wang R. Microstructure, wear behavior and surface hardening of austempered ductile iron. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):9838-9855.
- 3 Iacovielloa F, Di Cocco V, Favaro G. Pearlitic Ductile Cast Iron: mechanical properties gradient analysis in graphite elements. *Procedia Structural Integrity*. 2018;9:9-15.
- 4 Wang C. Spheroidal graphite crankshaft foundry and development. *Automobile Technology & Material*. 2006;(3):1-3.
- 5 Eraslan D, Balci A, Çetin B, Uçak N, Çiçek A, Yılmaz OD, et al. Machinability evaluations of austempered ductile iron and cast steel with similar mechanical properties under eco-friendly milling conditions. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;11:1443-1456.
- 6 Cai Q, Wei B. Recent development of ductile cast iron production technology in China. *China Foundry*. 2008;5(2):82-91.
- 7 Barton R. Magnesium treatment process for the production of nodular graphite SG iron. United Kingdom: British Cast Iron Research Association; 1975. (BCIRA Confidential Report; no. 1188).
- 8 Riposan I, Chisamera M, Stan S, Skaland T. Surface graphite degeneration in ductile iron castings for resin molds. *Tsinghua Science and Technology*. 2008;13(2):157-163.

- 9 Anjos VEA. Use of thermal analysis to control the solidification morphology of nodular cast irons and reduce feeding needs [thesis]. Essen: Universität Duisburg-Essen; 2015.
- 10 Ghosh S. Production aspects of spheroidal graphite iron. In: Proceedings of the Training Programme on Special Metal Casting and Forming Processes (CAFP); 2008; Jamshedpur. Jamshedpur: NML; 2008. p. 38-51.
- 11 Hansen GM, Hartung C, White D. The ductile iron treatment process revisited. In: Proceedings of the 71st World Foundry Congress: Advanced Sustainable Foundry; 2014; Bilbao. New York: Curran Associates; 2014. p. 287-294.
- 12 Cabanne PM. Magnesium cored wire treatment advantages and disadvantages vis-à-vis other processes. Illinois: Sorelmetal Technical Services, Suggestions for Ductile Iron Production; 2006. p. 1-2.
- 13 Guesser WL, Guedes LC, Duran PV, Santos ABS. Inoculação e nodulização de ferros fundidos. In: Anais do Seminário Inoculação e Nodulização de Ferros Fundidos; 1990; São Paulo. São Paulo: ABM; 1990. p. 1-20.
- 14 Baumgart W, Cunha J, Anjos V. Het enten van gietijzer. Gietwerk Perspectief Magazine. 2010;(5):5-12.
- 15 Dunks CM, Race B. Stream treatment for processing nodular iron. The British Foundryman. 1981;74:15-19.
- 16 Barton R. Análise comparativa entre processos de nodularização. United Kingdom: British Cast Iron Research Association; 1979. (BCIRA Confidential Report; no. 1350).
- 17 Santos ABS, Branco CHC. Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares. 3ª ed. São Paulo: IPT; 1989.
- 18 Brown J. Foseco ferrous foundryman's handbook. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2000.
- 19 Bex T. Ductile iron: one of the centuries's metallurgical triumphs. Modern Casting. 1991;(February):82-91.
- 20 Slaland T. Ductile iron shrinkage control through graphite nucleation and growth. International Journal of Cast Metals Research. 2003;16(1-3):11-16.
- 21 Stefanescu DM, editor. Casting. In: ASM International, editor. ASM handbook. 9th ed. Vol. 15. Ohio: ASM International; 1988.
- 22 Drumond PP. Ferro fundido de grafita esferoidal. Vol. 3. Belo Horizonte: Editora Senai; 2010. 77 p.
- 23 Kamińska J, Angrecki M, Stefański Z, Palma A. Effect of wall thickness on the microstructure of ductile iron castings manufactured by the in mold process using a reaction chamber. Archives of Foundry Engineering. 2018;18:50-54.

Recebido em: 11 Ago. 2022

Aceito em: 30 Set. 2022