

ESTUDO SOBRE A NUCLEAÇÃO E CRESCIMENTO DE NÓDULOS DE GRAFITA EM FERROS FUNDIDOS NODULARES

André de Albuquerque Vicente ¹

Victor Bridi Telles ¹

Amilton Barbosa Botelho Junior ¹

Susana Marraccini Giampietri Lebrão ²

Denise Croce Romano Espinosa ¹

Jorge Alberto Soares Tenório ¹

Resumo

Foram estudadas três corridas comerciais de ferro fundido nodular. Para produção das corridas, partiu-se do mesmo metal base e utilizou-se a mesma liga nodularizante. Cada uma das corridas foi feita com inoculantes diferentes. Os percentuais em peso de inoculante e liga nodularizante foram, respectivamente, 1,0% e 1,3%. Estudou-se a nucleação e o crescimento dos nódulos de grafita. Várias técnicas complementares de análise microestrutural foram utilizadas, tais como microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS). Observou-se a sequência de crescimento dos nódulos de grafita, evidenciando-se a formação de silicatos complexos ricos em alumínio, cálcio e bário ao redor dos núcleos, gerando uma interface favorável à solidificação heterogênea de grafita a partir destas partículas de tamanho superior ao raio crítico.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular; Solidificação heterogênea; Nucleação.

STUDY ON NUCLEATION AND GROWTH OF NODULAR GRAPHITE PARTICLES IN DUCTILE CAST IRON

Abstract

Three commercial ductile cast iron heats were studied. The same base metal and nodularization alloy were used. Each of the heats was made with different inoculants. The weight percentage of inoculant and nodularization alloy were respectively 1.0% and 1.3%. The nucleation and growth of the nodular graphite particles were studied. Several complementary techniques for microstructural analysis were used, such as optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). It was observed the growth sequence of spheroid nodular graphite particles, demonstrating the formation of complex silicates rich in aluminium, calcium and barium around the core, creating a supportive interface to the heterogeneous solidification of graphite from these particles larger than the critical radius

Keywords: Ductile cast iron; Heterogeneous solidification; Nucleation.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Produção Industrial do Ferro Fundido Nodular

A principal diferença entre os processos de produção do ferro fundido cinzento e nodular está no processo de nodularização. A matéria prima geralmente utilizada para a produção do ferro fundido nodular é o ferro gusa.

Além do ferro gusa, pode-se utilizar adições de sucata de aço carbono [1]. Estas matérias primas são fundidas,

na maioria das fundições do Brasil, em fornos à indução. Estes são fornos elétricos, compostos de uma bobina de indução que transfere calor para o material em seu interior através do efeito Joule. O consumo médio de energia elétrica para fundir 1 tonelada de ferro fundido é em torno de 550 kWh [2]. Durante a fusão, são feitas as correções necessárias para ajuste da composição química, visando-se a composição final após as adições da liga nodularizante e do inoculante. O acerto da composição química é, geralmente,

¹Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: andre.vicente@usp.br; andrevic611@hotmail.com

²Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, Brasil.



necessário para o elemento silício. Esta adição pode ser feita utilizando-se FeSi75%, ou silício metálico, sendo o primeiro o de menor custo.

Segundo Olsen et al. [3], Olsen e Hartung [4], Skaland [3,5-13], Onsoien et al. [14-17] e Skjegstad e Skaland [18,19] durante a fusão, o ferro fundido não deve ser aquecido a temperaturas superiores a 1550°C, já que este super-aquecimento provoca a destruição dos sítios de grafita em solução podendo, eventualmente, resultar na diminuição do número de nódulos final.

1.2 Processo de Nodularização

O processo de nodularização consiste no processo de obtenção do ferro fundido com grafita na forma esferoidal, ou nodular. Este processo de nodularização é conseguido graças ao efeito nodularizante de alguns elementos como magnésio, cálcio, cério e outros do grupo das terras raras. O elemento nodularizante mais utilizado é o magnésio sendo, geralmente, adicionado na forma de ferro-ligas, tipicamente ligas FeSiMg, onde os demais elementos têm a função de minimizar as reações violentas entre o magnésio e o ferro fundido base e a influência dos elementos deletérios na morfologia da grafita, além de controlar a composição da matriz [7,14,16].

Nas ligas FeSiMg, o teor de magnésio varia de 3 a 12% em massa, e as quantidades necessárias de ligas nodularizantes variam conforme o tipo de processo utilizado e o tipo de liga adicionada, sendo que estas quantidades variam de 0,9 a 2,5%.

A adição das quantidades adequadas dos compostos nodularizantes é de extrema importância, já que teores excessivos de magnésio e cério, por exemplo, podem resultar na formação de carbonetos e grafita explodida ou degenerada. Os teores residuais desejados são de 0,04 a 0,08% para o magnésio, enquanto que para o cério estes teores não podem ultrapassar 0,002% [20].

Alguns grupos de pesquisa estudaram profundamente a nucleação e o crescimento de grafita em ferros fundidos. Destacam-se os trabalhos de Skaland [3,5-13], Onsoien et al. [14-17], Skjegstad e Skaland [18,19], Gerghu et al. [21], Lacaze et al. [22], Zhu et al. [23], Stefanescu et al. [24,25] e Riposan et al. [26].

Existem várias teorias para explicar o mecanismo de nucleação e crescimento da grafita em ferros fundidos, como a teoria da bolha de gás, teoria da grafita, teoria do carboneto de silício e finalmente a teoria dos sulfetos que foi melhor compreendida com as publicações de Skaland [3,5-13], Onsoien et al. [14-17] e Skjegstad e Skaland [18,19]. Este último autor propõe que o magnésio adicionado através da liga FeSiMg reage com o enxofre presente no banho e forma sulfetos estáveis que resultam em pequenas inclusões finamente dispersas pelo banho. Estas inclusões servirão de base para receber uma camada de silicatos e, finalmente servirão de sítios para crescimento da grafita [8,15].

A fase Mg_2Si é reativa no metal líquido, porém esta reatividade é menor quando comparada à reatividade do magnésio metálico. A presença de cálcio na liga nodularizante aumenta a fração volumétrica desta fase e, conseqüentemente, pode aumentar a recuperação do magnésio [9].

A concentração de aproximadamente 45% de silício nas ligas FeSiMg visa, justamente, a formação de silicatos complexos e diminui a violência das reações [9-11].

No ferro fundido nodular, durante o processo de nodularização, forma-se grande quantidade de núcleos para a precipitação da grafita. Estes núcleos são, basicamente, sulfetos de magnésio, cálcio ou cério que são recobertos por uma fina camada de silicato de magnésio. Estas partículas não servirão ainda de sítio de crescimento para a grafita devido ao fato da estrutura cristalina das mesmas não ser coerente com a da grafita. Após a inoculação, a superfície destas partículas mudará devido à formação de camadas de outros silicatos e óxidos dos elementos inoculantes adicionados [11,14-17].

Os silicatos formados têm a mesma estrutura cristalina hexagonal da grafita servindo, portanto, como sítios efetivos de nucleação para o crescimento dos nódulos de grafita durante a solidificação.

Os inoculantes mais comuns são baseados em ligas de ferro silício 75% contendo pequenas e definidas quantidades dos elementos químicos cálcio, bário, estrôncio, zircônio, terras raras e alumínio. É possível encontrar inoculantes com composições químicas variadas, entretanto, a maioria é baseada no FeSi75%. Alguns inoculantes podem ser utilizados para inoculação em ferros fundidos cinzentos e nodulares. Isto ocorre devido ao fato dos elementos químicos cálcio, bário, estrôncio e zircônio serem fortes formadores de óxidos, sulfetos e silicatos em ambos os ferros fundidos.

A efetividade dos elementos da família II-A da tabela periódica está correlacionada à estabilidade dos óxidos e sulfetos formados e à baixa divergência do reticulado cristalino destes compostos, que servirão como substrato para precipitação da grafita [6,8,11,13].

Os elementos ativos no inoculante, cálcio, bário, estrôncio e alumínio, primariamente, formam óxidos e sulfetos estáveis. Estas partículas de sulfetos servirão como núcleos para o crescimento da grafita durante a solidificação [14-17].

O processo de solidificação de um metal líquido ocorre, com a diminuição da temperatura, em duas etapas sequenciais, sendo elas a nucleação e o crescimento dos cristais.

Na solidificação de uma liga hipereutética, a primeira fase a solidificar-se é a grafita, com a formação do núcleo de grafita diretamente no metal líquido. Os nódulos de grafita que foram formados previamente no líquido são envolvidos por uma camada de austenita. Na seqüência ocorre a diminuição do teor de carbono da austenita, através da difusão do carbono desta para os nódulos de grafita. Na temperatura eutetóide ocorre a transformação da austenita em cementita e perlita [27].

Estudos de Turnbull e Vonnegut [28] demonstraram que na nucleação heterogênea de um ferro fundido, o super-resfriamento necessário para formação dos primeiros núcleos é de 2 a 10°C, quando utiliza-se inoculantes. Ainda segundo este autor, este baixo super-resfriamento está relacionado com o desajuste dos reticulados cristalinos entre os compostos formados a partir do inoculante e a grafita, que estaria entre 3 a 10% [29,30].

O baixo super-resfriamento observado na solidificação do ferro fundido nodular também é mais uma evidência que, ao menos uma quantidade mínima de nucleação heterogênea ocorre, já que, para ocorrer somente a nucleação homogênea da grafita o super-resfriamento necessário seria maior que 250°C, promovendo solidificação metaestável e promovendo a formação de carbonetos [29,30].

O presente trabalho tem como objetivos o estudo da nucleação e crescimento de nódulos de grafita em ferro fundido nodular, bem como a caracterização metalográfica dos mesmos.

Deve-se mencionar que as corridas pesquisadas no presente trabalho são ferros fundidos nodulares de matriz ferrítica conforme norma ASTM A536 [29], produzidas a partir do mesmo metal base e liga nodularizante, entretanto, com diferentes inoculantes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O metal base foi fundido em um forno de indução com potência de 1000 kVA da marca Indutec com capacidade para 6 toneladas de ferro fundido líquido, utilizando-se sucata de aço carbono e ferro gusa como matéria prima.

O teor de enxofre do metal base foi corrigido para 0,015% através de adição de pirita ao metal base inicial que apresentava teor de enxofre 0,008%, melhorando-se a eficiência do processo de inoculação [3,5-19].

O processo de nodularização foi realizado utilizando-se panela do tipo sanduíche e foi realizada a inoculação e a pós-inoculação em panelas de 600 kg e 300 kg, respectivamente.

É importante esclarecer que todas as corridas partiram do mesmo metal base utilizando-se a mesma liga nodularizante.

Cada uma das corridas foi feita com inoculantes diferentes, sendo a corrida 1 com o FeSi75%, a corrida 2 com o FeSiBa e a corrida 3 com o FeSiMg.

Para todas as corridas utilizou-se a mesma liga nodularizante Mg 5 (45%Si, 6%Mg e 1,20%Ca).

Os percentuais em peso de inoculante e liga nodularizante foram, respectivamente, 1,0% e 1,3%.

A moldagem foi feita em areia verde. Todas as corridas foram desmoldadas 80 minutos após o vazamento.

As análises químicas foram realizadas em espectrômetro de emissão óptica, marca *Spectro*, através da queima de pastilhas coquilhadas. As análises específicas de carbono e enxofre foram realizadas através de pinos coquilhados pelo processo de combustão direta por infravermelho, aparelho marca *Quimitron*.

Realizaram-se ensaios mecânicos de tração em todos os corpos de prova em máquina universal de ensaios marca EMIC, modelo DL 1000, capacidade de 100 kN. Os ensaios de tração foram realizados com carregamento constante de 10MPa/s. Em todos os ensaios utilizou-se extensômetro eletrônico marca *Emic*, modelo EEMA 25.

Os valores de dureza Brinell dos corpos de prova foram obtidos utilizando-se durômetro portátil, marca Microtest Brinella, penetrador de esfera com 10 mm de diâmetro e carga de 3000kgf.

Na preparação metalográfica, empregou-se o polimento manual convencional utilizando-se lixas d'água (180, 220, 320, 400 e 600 mesh) e pasta de diamante (6µm e 1µm). Para revelação das microestruturas escolheu-se o reagente Nital 2%, que revelou de forma satisfatória a microestrutura.

A contagem de nódulos e análise de microestrutura foi realizada baseada em fotomicrografia conforme ASTM A247A [31].

A caracterização dos nódulos foi realizada através de microscopia eletrônica de varredura com auxílio de EDS.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As composições químicas do metal base, da liga nodularizante, dos inoculantes e das corridas são apresentadas na Tabela 1.

O cálculo do carbono equivalente (CE) pode ser realizado através da Equação 1, abaixo [1]:

$$CE = \%C + (0,33*\%Si + 0,33*\%P) \quad (1)$$

Utilizando-se as composições químicas das ligas estudadas (apresentadas na Tabela 1) na fórmula do cálculo de carbono equivalente (CE), foram obtidos os valores do carbono equivalente para cada corrida (Equações 2, 3 e 4):

$$\text{Corrida 1: } CE = 3,75\% + (0,33*3,01 + 0,33*0,041) = 4,77\% \quad (2)$$

$$\text{Corrida 2: } CE = 3,74\% + (0,33*3,06 + 0,33*0,041) = 4,77\% \quad (3)$$

$$\text{Corrida 3: } CE = 3,74\% + (0,33*3,03 + 0,33*0,041) = 4,76\% \quad (4)$$

Conforme planejado, as três corridas estudadas apresentaram concentrações de carbono, silício e fósforo muito próximas, resultando assim em valores de carbono equivalente praticamente iguais.

Xue e Lie [32] apresentaram, em estudo prévio, as diferenças percentuais dos parâmetros de rede cristalinos de diversos materiais em relação à grafita. Tais valores são apresentados na Tabela 2.

A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas obtidas para as três corridas estudadas evidenciam a relação direta entre o alongamento e a quantidade de nódulos/mm². A corrida 1, inoculada com FeSi75% apresentou a menor quantidade de nódulos/mm² e, conseqüentemente, o menor alongamento.

Tabela 1. Composições químicas do metal base inicial e final (com correção do teor de enxofre), da liga nodularizante, dos inoculantes e das corridas

	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cr	%Cu	%Mg	%Al	%Ca	%Ba	%TR
Metal Base Inicial e Final (com correção do teor de enxofre)												
Metal base inicial	3,80	1,61	0,20	0,008	0,043	0,02	0,09	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
Metal base final	3,80	1,61	0,20	0,015	0,043	0,02	0,09	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
Liga Nodularizante												
Mg 5	0,54	45,02	0,10	0,003	0,052	0,00	0,00	6,04	0,6	1,22	0,00	1,10
Inoculantes												
FeSi75%	0,45	74,93	0,06	0,002	0,041	0,00	0,00	0,00	0,32	0,53	0,00	0,00
FeSiCaBa	0,43	75,12	0,07	0,002	0,043	0,00	0,00	0,00	1,06	1,16	1,25	0,00
FeSiMg	0,44	75,08	0,08	0,002	0,042	0,00	0,00	1,24	0,98	1,22	0,00	0,00
Corridas												
Corrida 1	3,75	3,01	0,23	0,012	0,041	0,02	0,09	0,05	0,06	0,00	0,00	0,00
Corrida 2	3,74	3,06	0,22	0,010	0,041	0,02	0,09	0,05	0,05	0,02	0,02	0,00
Corrida 3	3,74	3,03	0,23	0,11	0,041	0,02	0,09	0,05	0,06	0,02	0,00	0,00

Tabela 2. Diferenças percentuais dos parâmetros de rede cristalinos δ de diversos materiais em relação à grafita [32]

Material	δ (%)	Material	δ (%)
C	0,0	BaS	7,5
LaS	1,5	CaS	8,3
BaO.SiO ₂	1,5	AlN	9,5
BN	2,0	CaC ₂	9,9
CeS	2,9	MnS	10,2
CaO.Al ₂ O ₃ .SiO ₂	3,7	MgS	12,5
SrO.Al ₂ O ₃ .SiO ₂	6,2	CaO	13,3
BaO.Al ₂ O ₃ .SiO ₂	7,1	β -SiO ₂	37,1
CaO.SiO ₂	7,5	β -S ₃ N ₄	43,9

Tabela 3. Propriedades mecânicas e as respectivas contagens de nódulos por mm² das corridas estudadas desmoldadas 80 minutos após vazamento

	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell	Nódulos/mm ²
Corrida 1	516	15	173	175
Corrida 2	520	18	177	200
Corrida 3	512	18	175	200

A Figura 1 apresenta as microestruturas das corridas estudadas, evidenciando microestrutura ferrítica-perlítica com frações volumétricas aproximadas de 90% de ferrita e 10% de perlita na matriz. A contagem de nódulos revelou 175 nódulos/mm² para a corrida 1 e 200 nódulos/mm² para as corridas 2 e 3.

A Figura 2 apresenta a caracterização microestrutural de um dos nódulos de grafita da corrida 1, revelando um núcleo rico em silício, alumínio e cálcio, recoberto por grafita.

A Figura 3 apresenta a caracterização microestrutural de um dos nódulos de grafita da corrida 2, revelando formação de uma camada rica em silício, alumínio, cálcio e bário, recoberta por grafita.

A Figura 4 apresenta a caracterização microestrutural de um dos nódulos de grafita da corrida 3, revelando um

núcleo rico em silício, cálcio, oxigênio e enxofre, recoberto por grafita.

Na sequência teórica de solidificação de uma liga FeC hipereutética, o primeiro sólido a formar-se é a grafita. Desta forma, se existir uma grande quantidade de partículas com alto ponto de fusão, finamente dispersas no banho, e com raio maior que o raio crítico, a precipitação de nódulos de grafita é termodinamicamente viável.

Durante o processo de nodularização, forma-se grande quantidade de núcleos para a precipitação da grafita. Estes núcleos são, basicamente, sulfetos de magnésio, cálcio ou cério que são recobertos por uma fina camada de silicato de magnésio. Estas partículas não servirão ainda de sítio de crescimento para a grafita devido ao fato da estrutura cristalina das mesmas não ser coerente à da grafita. Após

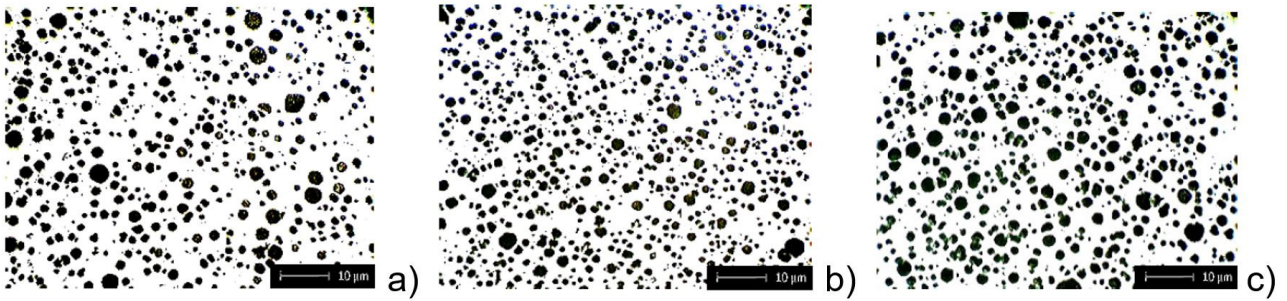


Figura 1. Microestruturas das corridas estudadas: (a) Corrida 1, (b) Corrida 2 e (c) Corrida 3- Ferro fundido nodular de matriz ferrítica-perlítica – Ataque Nital 2%.

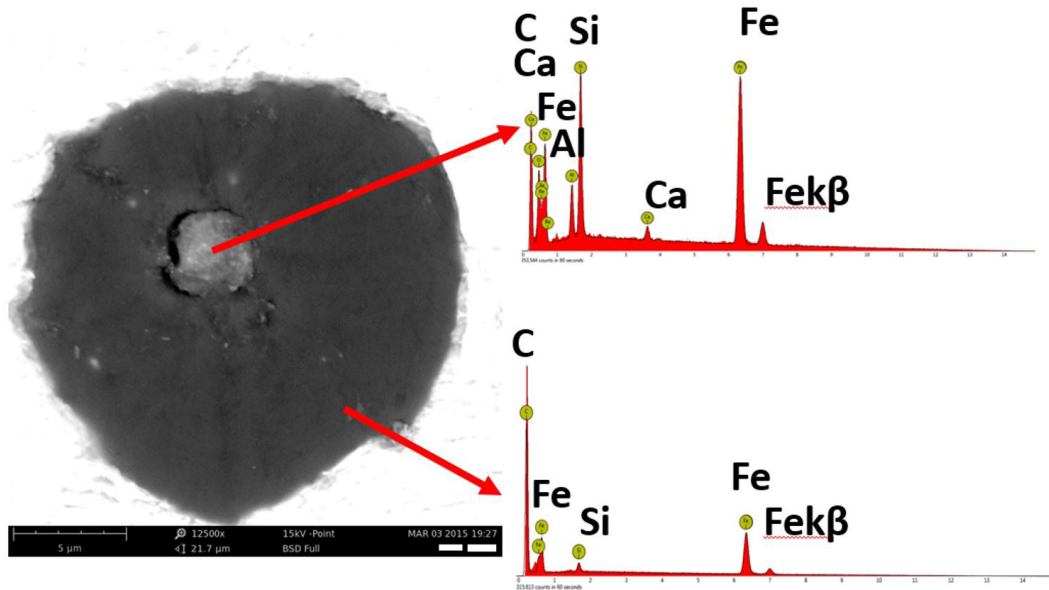


Figura 2. Nódulo de grafita da corrida 1 inoculada com FeSi75%, revelando um núcleo rico em Si, Al e Ca recoberto por uma camada externa de grafita.

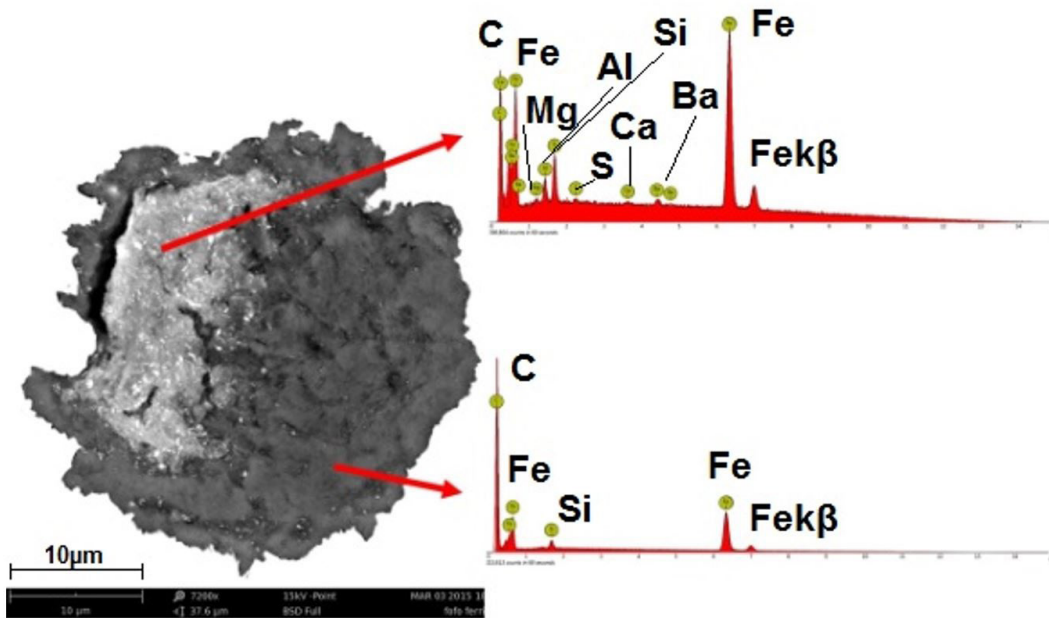


Figura 3. Nódulo de grafita da corrida 2 inoculada com FeSiCaBa, revelando um núcleo rico em Al, Ba, Ca, Mg e S recoberto por uma camada externa de grafita.

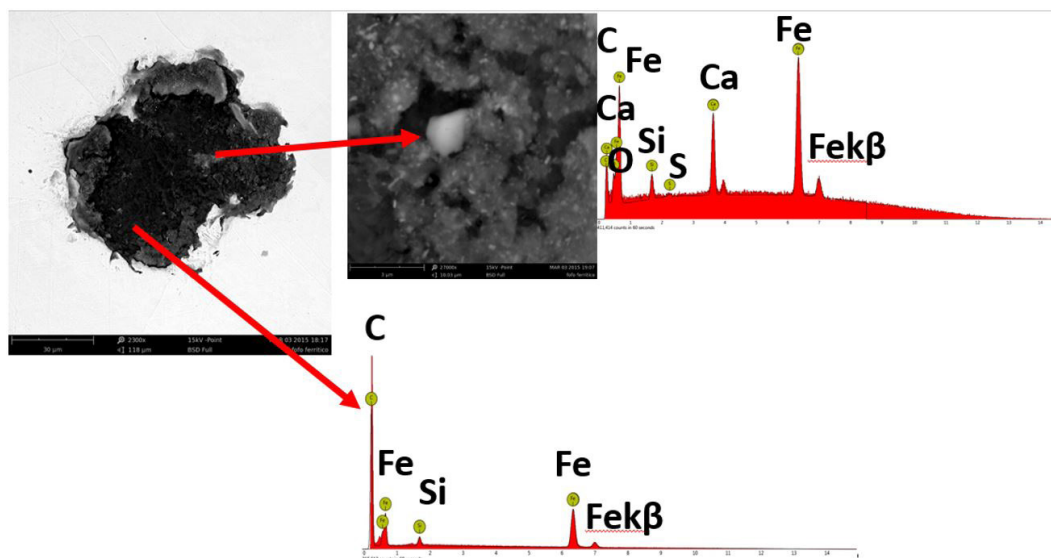


Figura 4. Nódulo de grafita da corrida 3 inoculada com FeSiMg, revelando um núcleo rico em Si, Ca, O e S recoberto por uma camada externa de grafita.

a inoculação, a superfície destas partículas mudará devido à formação de camadas de outros silicatos e óxidos dos elementos inoculantes adicionados.

Os silicatos formados têm a mesma estrutura cristalina hexagonal da grafita servindo, portanto, como sítios efetivos de nucleação para o crescimento dos nódulos de grafita durante a solidificação.

4 CONCLUSÃO

A caracterização metalográfica dos nódulos de grafita através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS acoplado, sugere que a grafita cresça a partir de silicatos complexos ricos em Al, Ca e Ba que, por sua vez, crescem a partir de sulfetos de tamanho superior ao raio crítico.

REFERÊNCIAS

- 1 Karsay SI. Ductile iron – production and practice. USA: American Foundry Society; 1985.
- 2 Edneral FP. Electrometallurgical of steel and ferro alloys. Vol. 2. Moscow: Mir Publishers; 1979.
- 3 Olsen SO, Skaland T, Hartung C. Inoculation of grey and ductile iron: a comparison of nucleation sites and some practical advises. In Proceedings of the World Foundry Congress; 2004; Turkey. Istanbul, Foundrymen's Association of Turkey; 2004.
- 4 Olsen SO, Hartung C. Recovery of magnesium in a ductile iron process. Kristiansand: Elkem; 2001. Elkem Technical Information Sheets, Elkem Foundry Products.
- 5 Skaland T. A new method for chill and shrinkage control in ladle treated ductile iron. In: Proceedings of the World Foundry Congress; 2004; Turkey. Hilton Head: American Foundry Society; 2004.
- 6 Skaland T. A model for the graphite formation in ductile cast iron [thesis]. Norway: The University of Trondheim; 1992.
- 7 Skaland T. A New Method for Chill and Shrinkage Control in Ladle Treated Ductile Iron. In: Keith Millis Symposium on Ductile Iron, Las Vegas, EUA. 2003.
- 8 Skaland T. Nucleation mechanisms in ductile iron. In: Proceeding of the AFS Cast Iron Inoculation Conference; Schaumburg, Illinois; 2005 September. Schaumburg: American Foundry Society; 2005.
- 9 Skaland T. Ductile iron production - a comparison of alternative treatment methods. Kristiansand: Elkem; 1999. Metal Casting and Surface Finishing, Elkem Technical Information Sheets, Elkem Foundry Products.
- 10 Skaland T. ductile iron shrinkage control through graphite nucleation and growth. elkem technical information. sheets. Kristiansand: Elkem Foundry Products; 2002.
- 11 Skaland T. A new approach to ductile iron inoculation. EUA: AFS Transaction; 2001.

- 12 Skaland T. A new method for chill and shrinkage control in ladle treated ductile iron. Kristiansand: Elkem; 1999. Elkem Technical Information Sheets, Elkem Foundry Products.
- 13 Skaland T. Developments in cast iron metallurgical treatments. Kristiansand: Elkem; 2001. Elkem Technical Information Sheets, Elkem Foundry Products.
- 14 Onsoien MI, Grong O, Gurdersen O, Skaland T. A process model for microstructure evolution in ductile cast iron - Part I - The Model. Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science. 1999;30(4):1053-1068.
- 15 Onsoien MI, Grong O, Gurdersen O, Skaland T. A process model for microstructure evolution in ductile cast iron - Part II - Applications of the Model - The Model. Metallurgical and Materials Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science. 1999;30(4):1069-1079.
- 16 Onsoien MI, Grong O, Skaland T, Jorgensen K. Mechanisms of graphite formation in ductile cast iron containing rare earth metals, materials science and technology. Journal Materials Science and Technology. 1999;15(3):253-259.
- 17 Onsoien MI, Grong O, Rorvik G, Nordmark A, Skaland T. Design and development of treatment alloys for ductile cast iron. International Journal Cast Metals Research. 1997;10(1):17-26.
- 18 Skjegstad NT, Skaland T. Inoculation of grey and ductile iron. In: Proceedings of the Bombay Foundry Congress; 1996 May 24-25; Indian; Bombay: The Institute of Indian Foundrymen; 1996.
- 19 Skjegstad NT, Skaland T. Inoculation of grey and ductile iron - a comparison of nucleation sites and some practical advises. In: Proceedings of the Bombay Foundry Congress; 1996 May 24-25; Indian. Bombay: The Institute of Indian Foundrymen, 1996.
- 20 Ecob CM. Review of common metallurgical defects in ductile cast iron. Kristiansand: Elkem; 1998. Elkem Technical Information Sheets, Elkem Foundry Products.
- 21 Gerghu R, Åberg LM, Lacaze J. A possible mechanism for the formation of exploded graphite in nodular cast irons. Materials Science Forum, 2014;790-791:435-440.
- 22 Lacaze J, Sertucha J, Åberg LM. Microstructure of as-cast ferritic-pearlitic nodular cast irons. ISIJ International, 2016;56(9):1606-1615.
- 23 Zhu M, Zhang L, Zhao H, Stefanescu DM. Modeling of microstructural evolution during divorced eutectic solidification of spheroidal graphite irons. Acta Materialia. 2015;84(1):413-425.
- 24 Stefanescu DM, Alonso G, Larrañaga P, De la Fuente E, Suarez R. On the crystallization of graphite from liquid iron-carbon-silicon melts. Acta Materialia. 2016;107:102-126.
- 25 Stefanescu DM, Alonso G, Larrañaga P, Suarez R. On the stable eutectic solidification of iron-carbon-silicon alloys. Acta Materialia. 2016;103:103-114.
- 26 Riposan I, Chisamera M, Uta V, Stan S, Naro R, Williams D. The importance of rare earth contribution from nodulizing alloys and their subsequent effect on the inoculation of ductile iron. International Journal of Metalcasting. 2014;8(2):65-80.
- 27 Colpaert H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4. ed. São Paulo: Editora Blucher; 2008.
- 28 TurnBull D, Vonnegut R. Nucleation Catalysis. Industrial & Engineering Chemistry. 1952;44(10):2265- 1952.
- 29 American Society for Testing And Materials. ASTM A536: Standards specific for ductile iron casting. West Conshohocken: ASTM; 1997.
- 30 Minkoff I. The physical metallurgy of cast iron. New York: John Wiley & Sons; 1983.
- 31 American Society for Testing and Materials. ASTM A247A: Adjunct to A247A Iron Casting Graphite Microstructure Rating Wall Chart. West Conshohocken: ASTM; 2010.
- 32 Xue W, Li Y. Pretreatments of gray cast iron with different inoculants. Journal of Alloys and Compounds. 2016;689:408-415.

Recebido em: 11 Jan 2018

Aceito em: 06 Feb 2019