



REVISTA

Naval e Oceânica

<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/rno>

ANÁLISE METALGRÁFICA DE FERROS FUNDIDOS CINZENTO E NODULAR: UMA PERSPECTIVA DE APLICAÇÕES NO SETOR NAVAL:

Metallographic Analysis of Gray and Nodular Cast Irons: a perspective of applications in the naval sector

Beatriz Francisco de Assis^a, Luiza Alves Gaiga^a, Maria Eduarda Alexandrino Alves^a,
Bruno Sousa da Cunha^b, Juliana Carera Marin^a

Recebido em: 10 nov. 2024 | Aceito em: 25 nov. 2024

RESUMO

Apesar do constante desenvolvimento de novos materiais, o ferro fundido permanece indispensável em diversas aplicações devido ao seu baixo custo de produção, elevada resistência mecânica e durabilidade. Este artigo tem como objetivo caracterizar a microestrutura do ferro fundido, amplamente utilizado em áreas como a naval. Trata-se de uma liga ternária ferro-carbono-silício, com teor de carbono superior a 2,14%, cujas propriedades estruturais e mecânicas variam conforme a forma e a distribuição da grafita em sua microestrutura. Os tipos de ferro fundido cinzento e nodular possuem aplicações específicas, destacando-se pela resistência ao desgaste, boa fluidez e capacidade de suportar ciclos térmicos. A análise micrográfica realizada nas amostras confirmou que uma delas apresenta grafita lamelar do tipo B, conforme a Norma ASTM A247, caracterizando-a como ferro fundido cinzento e confirmando suas propriedades mecânicas típicas. Na amostra correspondente ao ferro fundido nodular, foi identificada a formação de grafita esferoidal, corroborando sua classificação e as propriedades associadas a esse material. A correlação entre as características microestruturais e as propriedades mecânicas é essencial para avaliar a viabilidade do uso do ferro fundido em aplicações específicas, reforçando sua relevância em diferentes setores.

Palavras-chave: Ferro Fundido. Cinzento. Nodular. Microestrutura.

ABSTRACT

Despite the constant development of new materials, cast iron remains indispensable in various applications due to its low production cost, high mechanical strength, and durability. This article aims to characterize the microstructure of cast iron, which is widely used in fields such as the naval industry. It is a ternary iron-carbon-silicon alloy with a carbon content exceeding 2.14%, whose structural and mechanical properties vary according to the shape and distribution of graphite in its microstructure.

^aUniversidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

^bInstituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro - RJ, Brasil.



Gray and nodular cast irons have specific applications, standing out for their wear resistance, excellent fluidity, and ability to withstand thermal cycles. Micrographic analysis of the samples confirmed that one of them contained lamellar graphite of type B, in accordance with ASTM A247, classifying it as gray cast iron and confirming its typical mechanical properties. In the sample corresponding to nodular cast iron, the formation of spheroidal graphite was identified, corroborating its classification and the properties associated with this material. The correlation between microstructural characteristics and mechanical properties is essential for evaluating the feasibility of using cast iron in specific applications, reinforcing its relevance across different sectors.

Keywords: Cast Iron. Gray. Nodular. Microstructure.

1 INTRODUÇÃO

Apesar do desenvolvimento constante de novos materiais, o ferro fundido permanece indispensável em diversas aplicações devido ao seu baixo custo de produção, elevada resistência mecânica e durabilidade. Este artigo tem como objetivo caracterizar a microestrutura do ferro fundido, amplamente utilizado em áreas como a indústria naval. Trata-se de uma liga ternária ferro-carbono-silício, com teor de carbono superior a 2,14%, cujas propriedades estruturais e mecânicas variam conforme a forma e a distribuição da grafita em sua microestrutura. Os tipos de ferro fundido cinzento e nodular possuem aplicações específicas, destacando-se pela resistência ao desgaste, boa fluidez e capacidade de suportar ciclos térmicos.

Os produtos siderúrgicos mais comuns são ligas de ferro-carbono com teores de 0% a 4,5% de carbono, sendo os principais representantes o aço e o ferro fundido (Meira, Lima & Nascimento, 2021). De modo geral, os ferros fundidos são considerados ligas ternárias Fe-C-Si, já que o silício está muitas vezes presente em quantidades superiores às do próprio carbono (Silva & Resende, 2023). De acordo com Callister (2016), o ferro fundido corresponde ao grupo de ligas ferro-carbono cujo teor de carbono é superior a 2,14%, além de conter outros elementos de liga.

O ferro fundido pertence a um grupo fundamental para a indústria. Do ponto de vista comercial, o teor de carbono atinge até 4,5%, pois acima disso as ligas apresentam alta dureza, razoável fragilidade e baixo uso industrial. Devido ao maior teor de carbono, sua temperatura de fusão é menor que a do aço, o que reduz o custo de produção (energia e refratário) e permite a fundição de peças complexas que seriam difíceis de obter por outros processos (Colpaert, 2008; Meira et al., 2021).

Segundo Chiaverini (1986), o ferro fundido tende a ser quebradiço, exceto nas versões maleáveis. No geral, apresenta ponto de fusão entre 1.175 °C e 1.290 °C, boa fluidez,

fundibilidade, excelente usinabilidade, resistência à deformação e ao desgaste, além de resistência à oxidação.

A classificação do ferro fundido é feita de acordo com a forma, distribuição e orientação de suas partículas de grafita, que afetam diretamente suas propriedades térmicas e mecânicas (Oliveira, 2021). Tanto a microestrutura quanto o comportamento mecânico do material dependem da composição e do tratamento térmico. A tendência de formar grafita é regulada pela composição e pela taxa de resfriamento. A presença de silício em concentrações superiores a aproximadamente 1% promove a formação de grafita, enquanto taxas de resfriamento mais lentas favorecem a grafitização (Callister, 2016).

A classificação do ferro fundido é feita de acordo com a forma, distribuição e orientação de suas partículas de grafita, que afetam diretamente suas propriedades térmicas e mecânicas (Oliveira, 2021). Tanto a microestrutura quanto o comportamento mecânico do material dependem da composição e do tratamento térmico. A tendência de formar grafita é regulada pela composição e pela taxa de resfriamento. A presença de silício em concentrações superiores a aproximadamente 1% promove a formação de grafita, enquanto taxas de resfriamento mais lentas favorecem a grafitização (Callister, 2016).

Os tipos mais comuns de ferro fundido são: cinzento, nodular, branco, maleável e vermicular (grafita compacta), com foco neste estudo nos ferros fundidos cinzento e nodular. Ferros fundidos cinzentos e nodulares são ligas de ferro-carbono-silício, com teores de carbono acima de 2,5% e 4,0%, e silício entre 1,0% e 3,0%. Esses teores resultam na formação de grafita em veios (lamelas) ou nódulos (esferas) (Callister, 2016).

A estrutura do ferro fundido cinzento é composta por uma matriz com flocos de grafita dispersos, geralmente envolvidos por uma matriz de ferrita α ou perlita. Esses flocos conferem à superfície fraturada uma aparência acinzentada, originando sua denominação. A concentração, tamanho e quantidade de grafita definem as propriedades finais do material, que podem ser ajustadas por meio da composição e de tratamentos térmicos apropriados (Callister, 2016).

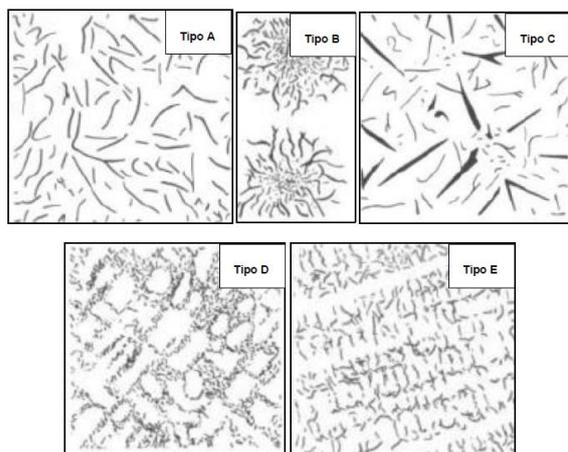
Técnicas de metalografia quantitativa e estereologia têm sido aplicadas para melhor caracterizar a grafita e correlacioná-la às propriedades mecânicas. A grafita é classificada de A a E (Figura 1), conforme a ASTM A247. O tipo A apresenta lamelas distribuídas aleatoriamente e de tamanho uniforme, associadas às melhores propriedades mecânicas para aplicações de engenharia. Já o tipo B possui veios em forma de roseta e orientação aleatória, indicando baixa nucleação. O tipo C ocorre em ferros hipereutéticos devido à nucleação primária. Os tipos D e

E apresentam lamelas finas, geralmente formadas por resfriamento rápido e nucleação insuficiente, o que impede a formação de uma matriz perlítica completa (Brown, 2000).

A classificação da grafita também considera seu tamanho, com faixas de 1,5 mm a 100 μm , conforme a ASTM A247 (Figura 2). As propriedades e desempenho do ferro fundido variam conforme a microestrutura, a técnica de fundição e o processo de resfriamento, definidos de acordo com a aplicação.

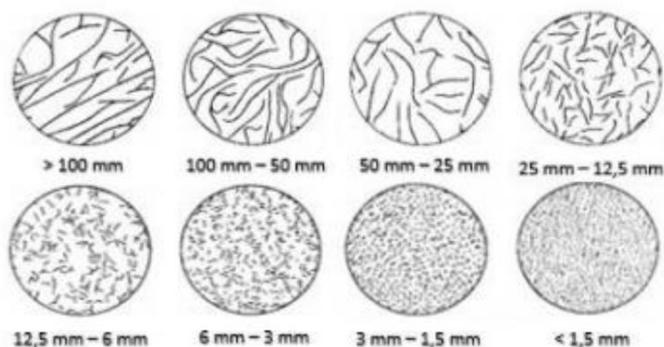
O ferro fundido cinzento é amplamente utilizado, desde tampas de bueiro a componentes de eletrodomésticos. Na indústria naval, destaca-se em engrenagens e pistões de máquinas. Apesar de ser frágil sob tração, devido às pontas afiadas dos flocos de grafita que concentram tensões, apresenta boa resistência à compressão, ao desgaste e excelente capacidade de amortecimento. Sua popularidade se deve ao baixo custo de produção e comercialização, apesar de limitações como alta condutividade térmica, que restringem seu uso em certas aplicações (Chiaverini, 2008; Callister, 2016).

Figura 1 – Distribuição da grafita no Ferro Fundido Cinzento e suas variadas classificações, ampliado em 100x



Fonte: ASM Specialty Handbook Cast Irons (1996)

Figura 2 - Classificação quanto ao tamanho das lamelas da grafita



Fonte: ASTM A 247 (2021)

As fundições de ferro cinzento são amplamente reconhecidas por sua alta capacidade de suportar ciclos térmicos. A ciclagem térmica ocorre quando o componente alterna entre temperaturas extremamente altas e baixas, uma característica ideal para aplicações na área naval. Embora a ciclagem térmica possa gerar tensões e causar falhas prematuras em alguns tipos de peças fundidas, o ferro cinzento apresenta excelente resistência à deformação resultante desse processo, deformando-se menos que outros tipos de ferro fundido. Apesar de possuir menor resistência à tração e ao impacto em comparação com outras ligas fundidas, o ferro cinzento tem resistência à compressão semelhante à do aço de baixo e médio carbono. Essas propriedades mecânicas são controladas pelo tamanho e formato dos flocos de grafita presentes em sua microestrutura, como mencionado anteriormente (Chiaverini, 2008; Callister, 2016).

A adição de pequenas quantidades de magnésio e/ou cério ao ferro cinzento antes da fundição resulta em uma microestrutura e um conjunto de propriedades mecânicas significativamente diferentes. Na liga conhecida como ferro nodular ou ferro dúctil, a grafita assume a forma de nódulos esféricos em vez de flocos. A matriz que envolve essas partículas pode ser perlítica ou ferrítica, dependendo do tratamento térmico aplicado (Callister, 2016).

O ferro fundido nodular é mais resistente e dúctil que o ferro cinzento, embora seu custo seja mais elevado. Sua ductilidade resulta da estrutura esferoidal da grafita, que promove a continuidade da matriz, seja ela perlítica ou ferrítica. Essa estrutura permite alcançar alongamentos de 10% a 22%, associados a um limite de resistência à tração que varia entre 380 e 450 MPa (Silva & Resende, 2023). Segundo Chiaverini (1996), a característica mais importante relacionada à resistência mecânica do ferro fundido nodular é seu limite de escoamento, que é superior ao de outros tipos de ferros fundidos.

Diante do exposto, a realização de ensaios micrográficos é essencial para avaliar a microestrutura do material e correlacioná-la com suas propriedades físicas e mecânicas. Esses ensaios seguem procedimentos normatizados e envolvem diversas etapas de análise (Gusmão, Brito, Barbosa, Arruda & Morais, 2023).

O objetivo deste artigo é caracterizar a microestrutura de materiais por meio da análise de micrografias obtidas após preparação, comparando os resultados com informações da literatura e estudos sobre ferro fundido. Com base nessas análises, busca-se avaliar as propriedades mecânicas e estruturais do material, correlacionando-as com sua aplicabilidade na área naval.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas duas amostras: uma barra retangular de ferro fundido nodular, cortada no tamanho desejado com uma serra policorte Pantec Pancut 80, e outra de ferro fundido cinzento, também cortada na mesma máquina. Posteriormente, a amostra de ferro fundido cinzento foi embutida a frio com resina epóxi.

Após o embutimento, ambas as amostras foram submetidas ao processo de lixamento utilizando uma politriz lixadeira metalográfica manual, modelo Politriz Universal PL01, e lixas de carbetto de silício. As granulações empregadas foram #220, #400, #600, #1000 e #1200, sendo cada etapa realizada com rotação padrão elevada, por aproximadamente 2 minutos. Esse procedimento teve como objetivo preparar as superfícies das amostras para a observação microestrutural final.

Em seguida, foi realizado o polimento com uma politriz Polipan 2 Pantec (nº 2), empregando feltro apropriado e alumina de granulação 3 µm, com adição de álcool etílico absoluto para limpeza final, até se obter uma superfície espelhada.

Após o polimento, as amostras foram secas com ar quente e encaminhadas para análise em microscópio óptico. A amostra de ferro fundido nodular foi analisada em um microscópio óptico invertido, com resoluções de 100x e 200x. Os resultados confirmaram que o padrão microestrutural observado estava de acordo com o esperado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ferros fundidos possuem elevada resistência ao desgaste e à abrasão, sendo amplamente utilizados na fabricação de componentes de grandes dimensões e geometria complexa. Além disso, apresentam baixa fragilidade, baixa ductilidade e custo reduzido.

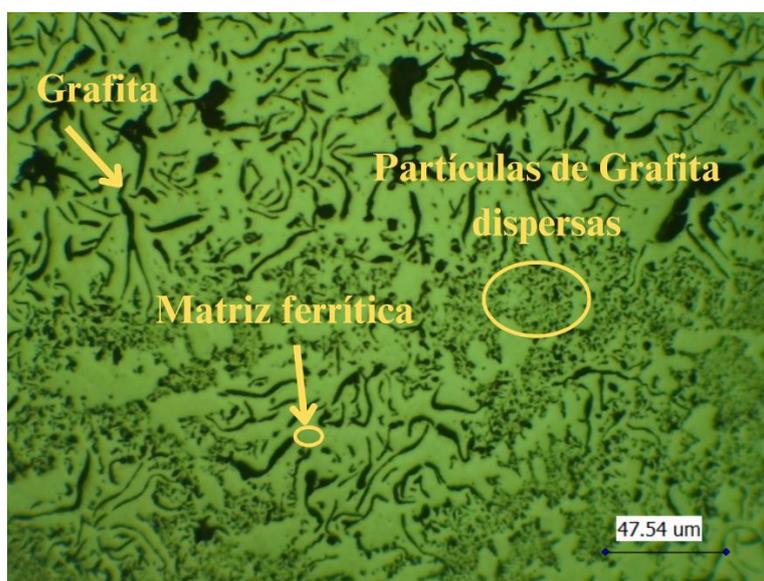
Na análise micrográfica do ferro fundido cinzento, utilizou-se o microscópio óptico (MO) para examinar detalhadamente as características estruturais da amostra. Esse equipamento é fundamental para esse tipo de análise, pois permite a observação precisa das fases e da morfologia da grafita, aspectos que exercem papel crucial nas propriedades mecânicas do material. Esse método possibilita identificar a distribuição e o formato das lamelas de grafita.

Na Figura 3, com ampliação de 100x, observa-se a microestrutura do ferro fundido cinzento, contendo grafita do tipo B, conforme a norma ASTM A247. Na imagem, são visíveis

veios ou lamelas de grafita como estruturas escuras, dispostas radialmente ao redor de alguns núcleos com aspecto eutético, envolvidos por uma matriz de ferrita α , característica marcante desse tipo de ferro fundido.

A grafita em forma de lamelas apresenta extremidades pontiagudas, que atuam como pontos de concentração de tensão, contribuindo para a fragilidade do material sob esforços de tração. Sua microestrutura é formada devido à baixa velocidade de resfriamento, durante a qual o carbono se solidifica na forma de grafita (flocos), compondo uma estrutura com baixa resistência mecânica, dureza entre 180 e 260 HB, e baixa ductilidade, mas com excelente usinabilidade.

Figura 3: Microestrutura de ferro fundido cinzento, grafita tipo B. Ampliação de 100x.



Fonte: Os autores (2024).

Essa morfologia em flocos caracteriza o ferro fundido cinzento, conferindo-lhe propriedades como alta condutividade térmica e capacidade de amortecimento de vibrações. Tais características são especialmente úteis para estruturas de bases de máquinas e equipamentos pesados, expostos a vibrações constantes. No entanto, o ferro fundido cinzento apresenta menor resistência à tração em comparação a outros tipos de ferro fundido, como o nodular.

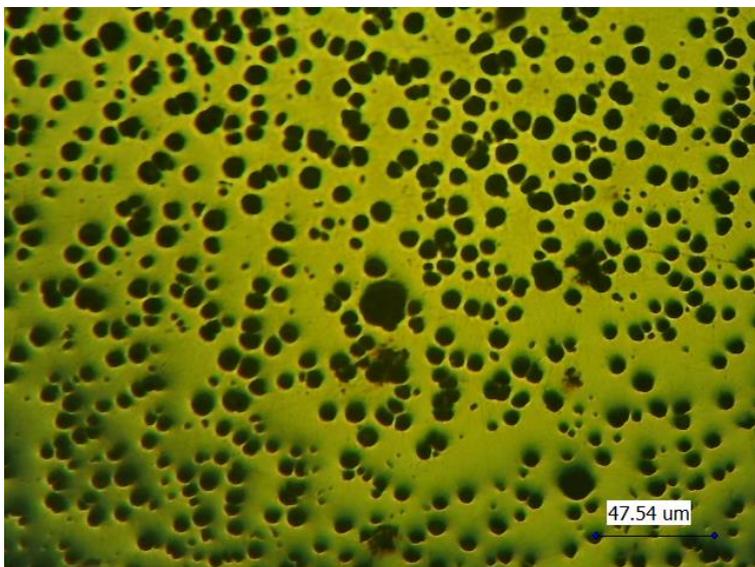
Quanto à homogeneidade, observa-se uma microestrutura heterogênea. A grafita do tipo B está associada a uma baixa nucleação, resultando em células eutéticas maiores. Inicialmente, as lamelas de grafita se formam finas, aumentando de tamanho à medida que o crescimento

progride. Assim, a presença de grafita dispersa, como evidenciado na Figura 3, pode ser atribuída ao crescimento das lamelas ao longo do processo de solidificação.

Em termos de aplicações, o ferro fundido cinzento é amplamente empregado na fabricação de peças de motores, como blocos, cabeçotes e cárteres de óleo. Também é utilizado em componentes de máquinas, como carcaças de bombas, engrenagens, eixos, polias e mancais, além de tubos e conexões para saneamento básico, água e gás. Na construção civil, é aplicado na produção de grelhas de drenagem, grades e portões.

Na Figura 4, é destacada a estrutura esferoidal da grafita no ferro fundido nodular, com uma ampliação de 200x. A forma esférica da grafita reduz a concentração de tensões e confere ao material uma maior ductilidade, quando comparado ao ferro fundido cinzento.

Figura 4: Microestrutura ferro fundido nodular. Ampliação de 200x.



Fonte: Os autores (2024).

O ferro fundido nodular distingue-se por apresentar carbono livre na forma de grafita esferoidal, graças a um tratamento realizado enquanto o material ainda se encontra no estado líquido. Essa formação esferoidal da grafita confere ao material uma característica notável de boa ductilidade. Para que essa nodularidade seja obtida, é necessário que o ferro fundido reaja com uma liga nodularizante. Na Figura 4, é possível observar os nódulos escuros de grafita envoltos por uma matriz de ferrita α , além de uma microestrutura homogênea.

Com resistência e ductilidade superiores às do ferro fundido cinzento, o ferro nodular é amplamente utilizado em diversas indústrias, mesmo apresentando um custo de produção mais elevado. Suas aplicações incluem fundição de cabeçotes de motores, anéis de pistão e

panelas de freios, além de sua utilização na fabricação de rolos de laminadores, mancais, roldanas e moendas. Esse material vem ganhando popularidade na indústria devido ao seu baixo custo de fabricação, já que pode ser produzido a partir de sucatas.

4 CONCLUSÕES

Em conclusão, tanto o ferro fundido cinzento quanto o nodular possuem características e aplicações específicas que os tornam valiosos em diversas indústrias, incluindo a naval. O ferro fundido cinzento, com suas boas propriedades de usinabilidade e resistência ao desgaste, pode ser amplamente utilizado em componentes como blocos de motor e componentes de máquinas. Por outro lado, o ferro fundido nodular, com sua maior resistência e ductilidade, é ideal para aplicações que exigem maior desempenho mecânico, como peças estruturais e componentes que suportam altas tensões. Na indústria naval, essas propriedades são indispensáveis para garantir a segurança e a durabilidade das embarcações, onde os tipos de ferros fundidos podem impactar significativamente a performance e a vida útil das estruturas. Portanto, a seleção entre ferro fundido cinzento e nodular deve ser feita com base nas exigências de cada aplicação, para garantir um bom desempenho e eficiência dos processos construtivos.

REFERÊNCIAS

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2016). *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução* (9a ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Chiaverini, V. (1986). *Tecnologia Mecânica* (2a ed.). São Paulo: McGraw-Hill.
- Chiaverini, V. (2008). *Aços e ferros fundidos* (7a ed.). São Paulo: ABM.
- Chiaverini, V. (1996). *Aços e ferros fundidos* (6a ed.). São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia.
- Colpaert, H. (2008). *Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns: Ferros Fundidos comuns* (4a ed.). São Paulo: Blucher.
- Fundição O'mil. (n.d.). Você conhece as aplicações do ferro fundido? *Fundição O'mil*. <https://www.fundicaoomil.com.br/post/54/voce-conhece-as-aplicacoes-do-ferro-fundido>

- Gusmão, G. G., Brito, T. A., Barbosa, V. R., Arruda, A. C., & Morais, D. (2023). Retrofit de dispositivo semiautomático para polimento metalográfico. *Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada*, 10(1), 17-31.
- Meira, P. M., Lima, E. A. P., & Nascimento, F. M. P. (2021). Estudo das propriedades do ferro fundido cinzento com adição de nióbio para trabalho a quente. *Revista Research, Society and Development*, 10(13), 1-2.
- Oliveira, V. C. (2021). *Cenário atual e perspectivas do ferro fundido* (Trabalho de Graduação). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP.
- Silva, J. V. M. R., & Resende, J. V. M. (2023). Análise metalográfica do ferro fundido nodular. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, 9(3), 2220-2231.
- Souza, A. D. S., & Cuevas, L. (2022). Estudo sobre o ferro fundido nodular. *Trabalho acadêmico (Curso de Engenharia Mecânica)*. Faculdade Anhanguera Pindamonhangaba.
- Brown, J. R. (2000). *Foseco ferrous foundryman's handbook* (11th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Davis, J. R. (1996). *ASM Specialty Handbook Cast Irons*. ASM International.
- ASTM A247-19. (2021). *Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings*. ASTM International.