UFSM

JESTA
Journal of Exact Sciences and Technological Applications

ISSN 2965-694X
ACESSO ABERTO

JESTA, Cachoeira do Sul, v. 4, e93920, 2026 • https://doi.org/10.5902/2965694X93920
Submissão: 01/10/2025 • Aprovação: 22/10/2025 • Publicação: 19/12/2025

Aplicações Tecnológicas

Influência do tempo de desmolde na microestrutura e dureza do ferro fundido cinzento em condições industriais

Influence of shakeout time on the microstructure and hardness of gray cast iron under industrial conditions

Renan Pfeifenberg[I], Márcio Medeiros de Magalhães[II], Guilherme Vieira Braga Lemos[I], Camila dos Santos Torres[I]

[I] Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
[II] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

RESUMO

O ferro fundido cinzento é amplamente empregado devido à sua usinabilidade e baixo custo, e suas propriedades dependem da microestrutura formada durante o resfriamento. Este estudo avaliou o efeito do tempo de desmolde (2, 24 e 48 h) na microestrutura e na dureza Brinell (HB) de peças produzidas em moldes de areia de cura a frio com carga de sucata de aço, fundidas em forno cubilô. A morfologia da grafita foi classificada conforme a ASTM A247 e a dureza determinada segundo a ASTM E10. Observou-se evolução microestrutural ao longo do desmolde: em 2 h, matriz ferrita + perlita, grafita A/E e 201,16 ± 2,63 HB; em 24 h, matriz perlítica, grafita A e 198,83 ± 2,92 HB; em 48 h, matriz perlítica com ferrita residual, grafita A/E e 214,33 ± 2,16 HB. Os resultados indicam que o desmolde modula a taxa de resfriamento, alterando as frações de fases e a dureza com comportamento não monotônico no intervalo estudado. Portanto, o tempo de desmolde é um parâmetro de processo relevante para o controle da microestrutura e das propriedades do ferro fundido cinzento.

Palavras-chave: Ferro fundido cinzento; Tempo de desmolde; Microestrutura; Grafita (ASTM A247); Dureza Brinell (ASTM E10)

ABSTRACT

Gray cast iron is widely used due to its machinability and low cost, and its properties depend on the microstructure formed during cooling. This study evaluated the effect of shakeout time (2, 24, and 48 h) on the microstructure and hardness Brinell (HB) of parts produced in no-bake sand molds, using steel scrap as metallic charge and cast in a cupola furnace. Graphite morphology was classified according to ASTM A247, and hardness was measured as per ASTM E10. A microstructural evolution with shakeout time was observed: at 2 h, ferrite + pearlite matrix, Type A/E graphite, and 201.16 ± 2.63 HB; at 24 h,

Artigo publicado por JESTA sob uma licença CC BY-NC 4.0.

pearlitic matrix, Type A graphite, and 198.83 ± 2.92 HB; at 48 h, predominantly pearlitic matrix with residual ferrite, Type A/E graphite, and 214.33 ± 2.16 HB. The results indicate that shakeout time modulates the cooling rate, changing phase fractions and hardness with a non-monotonic response over the range studied. Therefore, shakeout time is a relevant process parameter for controlling the microstructure and properties of the gray cast irons.

Keywords: Gray cast iron; Shakeout time; Microstructure; Graphite (ASTM A247); Brinell hardness (ASTM E10)

INTRODUÇÃO

No Brasil, a fundição é um elo relevante da cadeia industrial, com destaque para o ferro fundido, o aço e os não ferrosos. Segundo a ABIFA, a produção de ferro fundido passou de 2,02 milhões t (2023) para 2,08 milhões t (2024), o que representa ~3% de crescimento no período [1]. Esses números reforçam a importância de otimizar parâmetros de processo para sustentar produtividade e qualidade.

O ferro fundido cinzento se destaca pela boa usinabilidade, fluidez e viabilidade econômica, mas suas propriedades mecânicas são limitadas pela presença de grafita lamelar, que pode atuar como concentrador de tensões [2] [4]. A microestrutura final resulta da interação entre composição química, taxa de resfriamento, características do molde e condições térmicas após a solidificação. Entre essas, o tempo de desmolde (shakeout time), o intervalo entre a solidificação completa e a retirada da peça do molde, altera o caminho de resfriamento e, consequentemente, a morfologia da grafita e a fração de fases da matriz (ferrita/perlita). Em linhas gerais, resfriamentos mais rápidos tendem a aumentar a fração perlítica, enquanto resfriamentos mais lentos favorecem ferrita [5].

Apesar da relevância prática, há poucos estudos que isolam o efeito do desmolde em condições industriais com moldagem em areia de cura a frio. Assim, este trabalho avalia a influência do tempo de desmolde (2, 24 e 48 h) na microestrutura, com classificação da grafita segundo a ASTM A247, e na dureza Brinell (HB) determinada conforme a ASTM E10, de um ferro fundido cinzento produzido em ambiente fabril. O objetivo é relacionar o desmolde às variações de grafita e de matriz e quantificar o impacto na dureza, fornecendo subsídios para o controle do processo em fundições [6][7].

BY-NC

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram produzidas amostras de ferro fundido cinzento em forno cubilô, a partir de sucata de aço como carga metálica, seguindo o procedimento rotineiro da empresa parceira. A composição da carga por corrida é mostrada na Tabela 1. O calcário ($CaCO_3$) foi utilizado como fundente, favorecendo a formação de escória e auxiliando a dessulfuração, o aditivo de Ferro Silício (FeSi) atuou como inoculante.

Tabela 1

Composição típica da carga por corrida

Material	Quantidade (kg)	Fração mássica (%)	Observação
Coque	20	8,62	Combustível
Sucata	200	86,21	Carga metálica
Calcário	10	4,31	Fundente (escória/ dessulfuração)
FeSi	2	0,86	Inoculação

As amostras foram moldadas em areia de cura a frio. A cavidade do molde foi gerada com barra cilíndrica como modelo. O tempo de desmolde (2, 24 e 48 h) foi definido operacionalmente como o intervalo desde o término do vazamento até a retirada da peça do molde, em ambiente de [23 ± 2] °C. Todos os demais parâmetros (composição e sistema de moldagem) foram mantidos constantes. Após o vazamento e o desmolde nas três condições, as peças foram usinadas em discos de 30 mm de diâmetro e 10 mm de espessura, e, em seguida destinadas aos ensaios de metalografia e de dureza Brinell. O preparo seguiu a norma ASTM E3 (lixamento com carbeto de silício (SiC) 200-2000 com lubrificação e polimento com óxido de alumínio até superfície especular). A avaliação foi feita sem ataque (para grafita, conforme a norma ASTM A247-24) e com ataque Nital 2% (para matriz, conforme a norma ASTM E407). As micrografias foram obtidas em microscópio óptico Zeiss Axio Imager 2.

A dureza foi determinada conforme a norma ASTM E10 em durômetro EMCOTEST DV30. Utilizou-se a escala HB e superfície preparada conforme a norma. Em cada amostra,

BY-NC

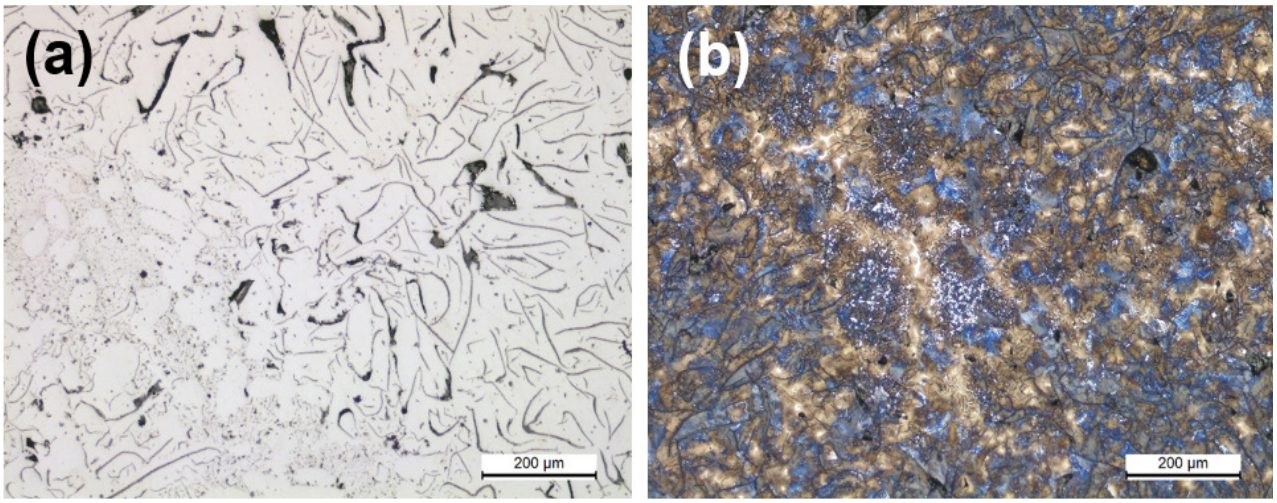
realizaram-se seis indentações uniformemente distribuídas, respeitando distância mínima entre centros de ≥ 3d e da borda de ≥ 2,5d (d = diâmetro da impressão) e espessura mínima compatível com a profundidade da impressão. Cada impressão foi medida em duas direções perpendiculares pelo sistema óptico do equipamento, reportando-se o valor médio por amostra e a média ± desvio-padrão por condição (6 indentações/amostra).

RESULTADOS

Micrografias representativas das três condições de desmolde foram obtidas em pares: imagem (a) sem ataque, para classificação da grafita segundo a ASTM A247, e imagem (b) após ataque com Nital 2%, para evidenciar a matriz.

Figura 1

Ferro fundido cinzento, desmoldado após 2 h: (a) Sem ataque: grafita A+E; (b) Nital 2%: matriz ferrita + perlita

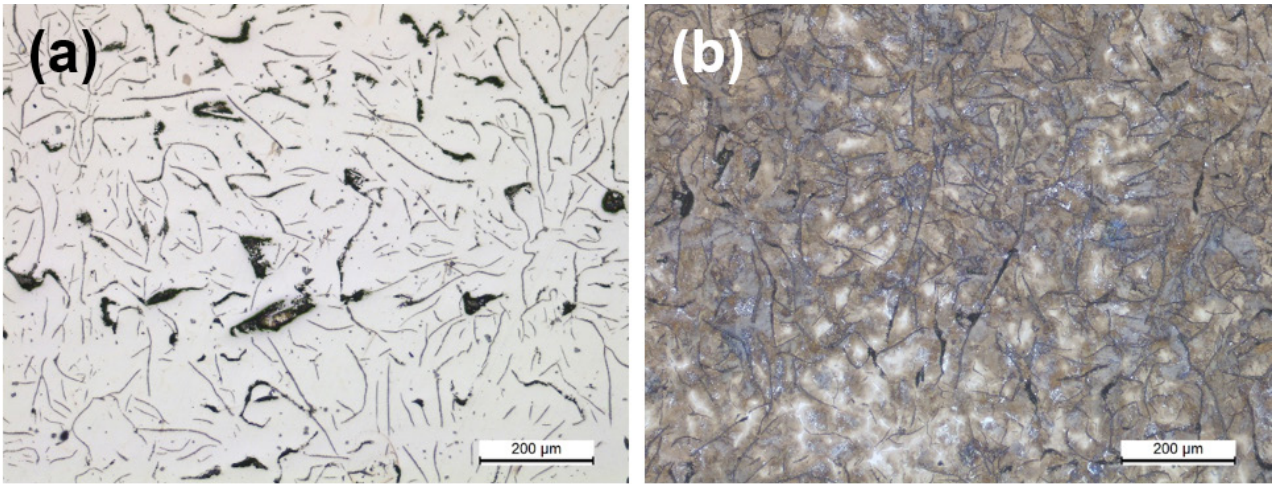


Na condição de 2 h, a grafita apresenta mistura dos tipos A e E (Fig. 1a): flocos lamelares tipo A distribuídos pela matriz e regiões interdendríticas com leve alinhamento, características do tipo E. Após o ataque (Fig. 1b), observa-se matriz mista ferrita + perlita; a ferrita é vista como áreas claras contínuas, enquanto a perlita forma colônias lamelares mais escuras. Essa microestrutura está em linha com a dureza média de 201,16 ± 2,63 HBW para esta condição [8][9].

BY-NC

Figura 2

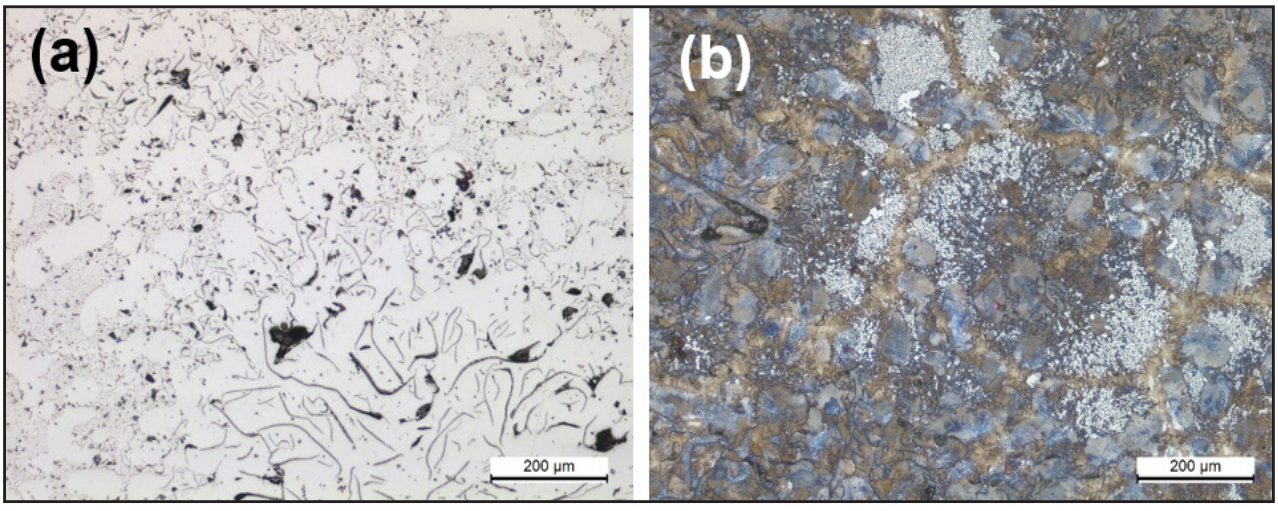
Ferro fundido cinzento, desmoldado após 24 h: (a) Sem ataque: grafita tipo A; (b) Nital 2%: matriz predominantemente perlítica



Para 24 h, nota-se predominância de grafita tipo A, com distribuição mais homogênea e redução de regiões tipo E (Fig. 2a). O ataque com Nital 2% revela matriz majoritariamente perlítica, com ferrita pontual/entre colônias (Fig. 2b). A dureza média foi 198,83 ± 2,92 HBW. A comparação entre 2 h e 24 h indica mudanças simultâneas na morfologia da grafita e na fração de fases da matriz; as diferenças de dureza são pequenas e não seguem tendência monotônica, o que é discutido à luz de gradientes térmicos locais e variações de nucleação [5][10][11].

Figura 3

Ferro fundido cinzento, desmoldado após 48 h: (a) Sem ataque: grafita A + E; (b) Nital 2%: matriz perlítica com ferrita residual



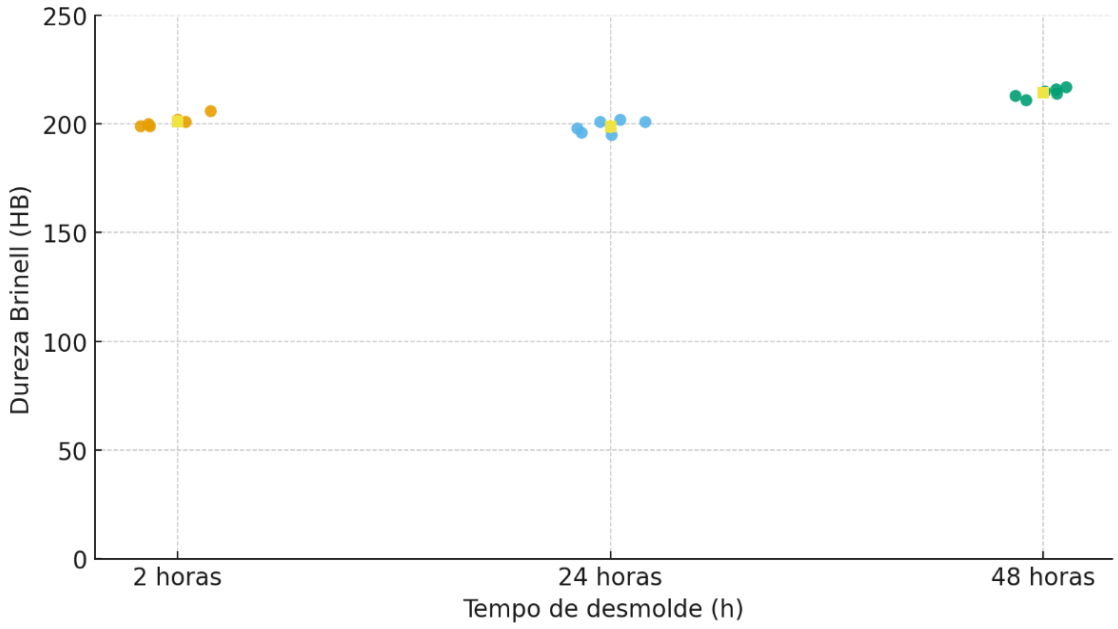
BY-NC

Para 48 h de desmolde, a amostra apresenta mistura de grafita A + E (Fig. 3a): flocos lamelares distribuídos na matriz e regiões interdendríticas com leve alinhamento, coerentes com resfriamento heterogêneo durante a permanência prolongada no molde. Após o ataque com Nital 2% (Fig. 3b), observa-se matriz predominantemente perlítica, com ferrita residual ao longo de contornos celulares/colônias. Essa configuração está alinhada com a maior dureza média medida para esta condição (≈214 HB).

A dureza Brinell variou de forma não monotônica com o tempo de desmolde (Figura 4): valores próximos em 2 h e 24 h e maior dureza em 48 h.

Figura 4

Dureza Brinell (HB) por tempo de desmolde (n = 6 por grupo).Pontos individuais e média ± IC95%; eixo 0–250 HB



DISCUSSÕES

Os resultados indicam que o tempo de desmolde impacta a microestrutura e a dureza do ferro fundido cinzento com resposta não monotônica: valores próximos em 2 h e 24 h e maior dureza em 48 h (Figura 4). As dispersões foram baixas (CV ≈ 1–1,5%), o que sugere boa repetibilidade das medições de HB.

BY-NC

Para a morfologia da grafita (ASTM A247), observou-se mistura A + E em 2 h e 48 h, e tipo A predominante em 24 h (Figuras 1–3 (a)). Essa combinação é típica de heterogeneidade de resfriamento: o tipo A reflete nucleação abundante e resfriamento moderado, enquanto o tipo E surge em regiões interdendríticas sob sub-resfriamento ou inoculação menos efetiva. Essa leitura é coerente com a literatura de fundidos cinzentos, que associa gradientes térmicos do molde e fade de inoculação à convivência de A/E [10-13]. Como limitação, não se quantificou a fração de área de grafita por imagem, tal métrica ajudaria a correlacionar diretamente volume/tamanho de floco com dureza.

As microestruturas atacadas com Nital 2% revelaram ferrita + perlita em 2 h, predominância perlítica em 24 h e perlita com ferrita residual em 48 h (Figuras 1–3 (b)). Em termos de mecanismo, maior taxa de extração de calor tende a aumentar a fração perlítica, enquanto resfriamentos mais lentos favorecem ferrita. Além da fração perlítica, o espaçamento interlamelar da perlita influencia a dureza: perlita mais grossa em 24 h pode explicar a HB ligeiramente menor que em 2 h, apesar da maior fração de perlita; em 48 h, a perlita efetiva mais fina e ferrita residual discreta justificam o maior HB.

A 48 h apresentou HB mais alta (~214 HB) que 2 h (~201 HB) e 24 h (~199 HB), diferença ≈ +13 a +16 HB (≈ 6–8% em relação a ~200 HB). Esse ganho é compatível com a maior fração perlítica efetiva e, possivelmente, menor espaçamento interlamelar em 48 h. A convivência A + E não impediu o aumento de dureza, o que sugere que, nesta condição, o efeito de matriz superou o efeito da morfologia da grafita.

O tempo de desmolde mostrou-se um parâmetro de ajuste de microestrutura e dureza em condição industrial. Para obter HB mais alta, as evidências apontam para a janela 48 h nas condições estudadas; contudo, recomenda-se padronizar inoculação e posição de retirada de amostra e monitorar a variação de lamelas da perlita para garantir reprodutibilidade.

BY-NC

CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a influência do tempo de desmolde (2, 24 e 48 h) na microestrutura, com classificação da grafita (segundo a ASTM A247) e na dureza Brinell (HB) (de acordo com a ASTM E10) de um ferro fundido cinzento produzido em ambiente fabril. Os resultados desta investigação podem ser resumidos como:

- O tempo de desmolde influenciou a microestrutura e a dureza Brinell (HB) do ferro fundido cinzento produzido em molde de areia de cura a frio.
- A microestrutura evoluiu com o desmolde: 2 h – ferrita + perlita e grafita A/E; 24 h – matriz perlítica e grafita A e 48 h – perlítica com ferrita residual e grafita A/E.
- A dureza apresentou comportamento não monotônico, com valores próximos em 2 h e 24 h e maior dureza em 48 h (≈214 HB, frente a ≈20 HB em 2 h e ≈199 HB em 24 h; n = 6).
- Os resultados sugerem que o desmolde afeta a taxa de resfriamento efetiva, alterando a fração/perfil da perlita e, por consequência, a dureza.
- Implicação prática: nas condições estudadas, 48 h forneceu a maior HB; o controle/padronização do tempo de desmolde é recomendável para reduzir variabilidade e ajustar propriedades.

REFERÊNCIAS

[1] Associação Brasileira de Fundição. *Fundição registra alta de +3,4% em 2024*. São Paulo, 29 jan. 2025. Disponível em: https://abifa.org.br/site/fundicao-registra-alta-de-34-em-2024/

[2] Chiaverini, V. Tecnologia Mecânica Volume II: *Processos de Fabricação e Tratamento*.1. ed. São Paulo, Brasil: Pearson Universidades, 1995. ISBN 978-0074500903.

[3] Chiaverini, V. *Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos*. 7. ed. São Paulo: ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012. 599 p. ISBN 978-85-7737-041-2.

[4] Guesser, W. L. *Propriedades mecânicas dos ferros fundidos*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2019. ISBN 978-85-212-1623-0.

[5] Rivera, G. L., Boeri, R. E., & Sikora, J. A. Solidification of gray cast iron. *Scripta Materialia*, v. 50, n. 3, p. 331–335, 2004. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2003.10.019

[6] ASTM International. ASTM A247-19 — *Standard Test Method for Evaluating the Mi-*

BY-NC

crostructure of Graphite in Iron Castings. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019

[7] ASTM International. ASTM E10-23 — *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.

[8] International Organization for Standardization. ISO 945-1:2019 — *Microstructure of cast irons: Part 1 — Graphite classification by visual analysis*. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.

[9] ASM International (Ed.). *ASM Handbook, Volume 1A: Cast Iron Science and Technology*. Materials Park, OH: ASM International, 2017. 600 p. ISBN 978-1-62708-133-7.

[10] Jabbari Behnam, M. M., Davami, P., & Varahram, N. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of grey cast iron. *Materials Science and Engineering A*, v. 528, n. 2, p. 583–588, 2010. DOI: 10.1016/j.msea.2010.09.087

[11] Park, J. S., & Verhoeven, J. D. Transitions between type A flake, type D flake, and coral graphite eutectic structures in cast irons. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 27, p. 2740–2753, 1996. DOI: 10.1007/BF02652368

[12] Pluphrach, G., Saetung, N., Suriyapala, E., Maloghagi, R., & Chawangpho, W. Effects of cooling rate on impact properties and microstructures of gray cast iron ASTM A48. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, v. 44, n. 4, p. 929–935, 2022 https://sjst.psu.ac.th/journal/44-4/4.pdf

[13] Jelínek, R., Bořil, P., Kaněra, M., Doubrava, J., & Záděra, A. Fading of Inoculation Effect in Grey Cast Iron. *Archives of Foundry Engineering*, v. 25, n. 1, p. 138–143, 2025. DOI: 10.24425/afe.2025.153783

Sobre os autores:

Renan Pfeifenberg

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: renan.pfeifenberg@acad.ufsm.br - https://orcid.org/0000-0001-6141-3632

Márcio Medeiros de Magalhães

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil
Email: marcio.medeiros@ufrgs.br - https://orcid.org/0000-0002-7940-3552

Guilherme Vieira Braga Lemos

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: guilherme.lemos@ufsm.br - https://orcid.org/0000-0002-2964-362X

BY-NC

Camila dos Santos Torres

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: camila.torres@ufsm.br - https://orcid.org/0000-0001-6755-9288

Como citar este artigo

Pfeifenberg, R., de Magalhães, M. M., Lemos, G. V. B, & Torres, C. dos S. (2026) Influência do tempo de desmolde na microestrutura e dureza do ferro fundido cinzento em condições industriais. *JESTA*, Cachoeira do Sul, (4) e93920, Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/JESTA/article/view/93920/version/93920.

BY-NC