IX Simpósio de Engenharia Ferroviária
24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

EFEITO DA GEOMETRIA, COMPOSIÇÃO QUÍMICA E TEMPERATURA DE TRATAMENTO ISOTÉRMICO NA DUREZA E MICROESTRUTURA DE AÇOS MICROLIGADOS PARA RODAS FERROVIÁRIAS

J. V. R. Silva e Silva [1], D. N. Oliveira [1], C. A. R. Neto [1], M. José-Bueno [2], P. R. Mei [2], C. Scandian [1], N. F. Strey [1]

[1] Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (Tricorrmat), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil
[2] Laboratório de Tribologia da Unicamp (LTU), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil

RESUMO

O transporte ferroviário de cargas demanda elevada confiabilidade de rodas submetidas a severas condições de contato roda-trilho, sendo os aços perlíticos microligados AAR Classe D amplamente empregados nessas aplicações. Considerando que propriedades mecânicas, morfologia microestrutural e descontinuidades metalúrgicas influenciam diretamente o desempenho frente a danos em rodas ferroviárias, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de rotas de tratamento isotérmico aplicadas a estes aços forjados e fundidos, com diferentes composições químicas e geometrias, em sua microestrutura e dureza. Os materiais foram submetidos à isotermas em banho de sal fundido (560 °C) ou estanho (420 °C). A caracterização incluiu ensaios de dureza Brinell, metalografia quantitativa via Microscopia Óptica e Eletrônica de Varredura, além de Difração de Raios-X. Os resultados indicaram que temperaturas isotermas mais baixas (420 °C) resultam em microestrutura não desejável (bainita, martensita e perlita), embora mantenham a dureza na faixa de durezas exigida para aços AAR Classe D. Para alcançar a dureza de (365 ± 6) HBW 2,5/187,5, mantendo-se uma microestrutura majoritariamente perlítica, é necessário um controle rigoroso da composição, geometria e temperatura (560 °C).

Palavras-chave: *Roda ferroviária; Aço microligado; Tratamento isotérmico; Dureza; Microestrutura.*

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário de cargas está intimamente ligado ao crescimento econômico de um país. No Brasil, foram transportadas cerca de 47 milhões de toneladas de cargas em dezembro de 2025 (ANTF, 2026), evidenciando, assim, a importância de uma gestão eficiente de manutenção ferroviária como, por exemplo, a de elementos rolantes e de via (MIRANDA et al., 2022).

Neste contexto, rodas de aços ferroviários perlíticos microligados Classe D têm sido objeto de estudo (MIRANDA et al., 2024; XAVIER et al., 2025, OLIVEIRA et al., 2025) em sistemas de transporte de carga pesada devido à sua elevada resistência a danos sob condições severas de contato roda-trilho (XAVIER et al., 2025). Tal resistência está intimamente relacionada com a uniformidade de dureza e microestrutura destes aços, onde é conhecido, por exemplo, que heterogeneidades microestruturais resultantes de deformação plástica e encruamento são pontos preferenciais para nucleação de microtrincas subsuperficiais (STREY et al., 2021).

Tratamentos térmicos são técnicas reconhecidas para se uniformizar dureza e microestrutura, principalmente no que se refere ao refinamento da microestrutura perlítica (diminuição do espaçamento interlamelar), aumentando, assim, a dissipação de energia durante a deformação plástica superficial (STREY et al., 2021). Estas técnicas, por sua vez, são consideravelmente dependentes da geometria, massa e composição química das peças, além da temperatura de tratamento (WANG et al., 2020; COSTA E MEI, 2010).

Em relação à composição química, especialmente ao teor de enxofre, este exerce influência relevante na formação de sulfetos de manganês (MnS), os quais constituem uma das principais classes de inclusões não-metálicas presentes em aços (COSTA E SILVA, 2019; ZHANG et al., 2020). Sua presença não apenas altera a natureza e a distribuição das descontinuidades metalúrgicas (inclusões não-metálicas e porosidades), mas também pode influenciar tanto os mecanismos de transformação metalúrgica, como o comportamento mecânico e tribológico do material como, por exemplo, sob condições de carregamento cíclico, onde tais descontinuidades podem atuar como sítios preferenciais para nucleação de trincas, influenciando significativamente a vida em fadiga de componentes ferroviários (WALKER, 2014; REZENDE et al., 2025; GERMINARI, 2025).

Desta forma, variações no teor de enxofre podem modificar tanto a distribuição de descontinuidades metalúrgicas quanto a resposta microestrutural dos materiais a ciclos de tratamento térmico. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o efeito da geometria, composição química e temperatura de tratamento isotérmico aplicado a aços ferroviários microligados AAR Classe D, com diferentes teores de enxofre e retirados de rodas forjadas e de lingotes fundidos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

A Tabela 1 traz a composição química das amostras trabalhadas neste estudo. Nos lingotes fundidos o teor de enxofre foi propositalmente ampliado, com o objetivo de aumentar a fração de MnS presentes no material e, assim, permitir avaliar a resposta microestrutural destes materiais frente a rotas de tratamento isotérmico em condições de maior teor de descontinuidades metalúrgicas. Nos aços forjados, provenientes de rodas comercialmente disponíveis, o controle do teor de enxofre foi maior.

Tabela 1: Composição química das amostras de roda forjada e de lingote fundido (% em peso).

#	C	S	P	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Si	V	Al	Nb	Ti	W
***AAR Classe D**	0,67 – 0,77	0,005 – 0,040	Máx. 0,03	0,60 – 0,90	Máx. 0,25	Máx. 0,25	Máx. 0,10	Máx. 0,35	0,15 – 1,00	Máx. 0,04	Máx. 0,06	Máx. 0,05	Máx. 0,03	–
Roda forjada	0,78	0,002 – 0,010	0,02	0,94	0,19	0,08	0,030	0,11	0,98	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Lingote fundido	0,73	0,004 – 0,108	0,02	0,61	0,08	0,03	0,005	0,01	1,07	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01

*Norma AAR M-107/M-208 Section G (2011).

Corpos-de-prova foram confeccionados a partir de amostras de rodas ferroviárias forjadas e de lingotes fundidos. As dimensões podem ser vistas na Figura 1 e foram selecionadas de tal forma a serem utilizadas em posteriores ensaios de desgaste por deslizamento (geometria A) e por rolamento (geometria B), com massas de 41,9 g e 37,2 g, respectivamente.

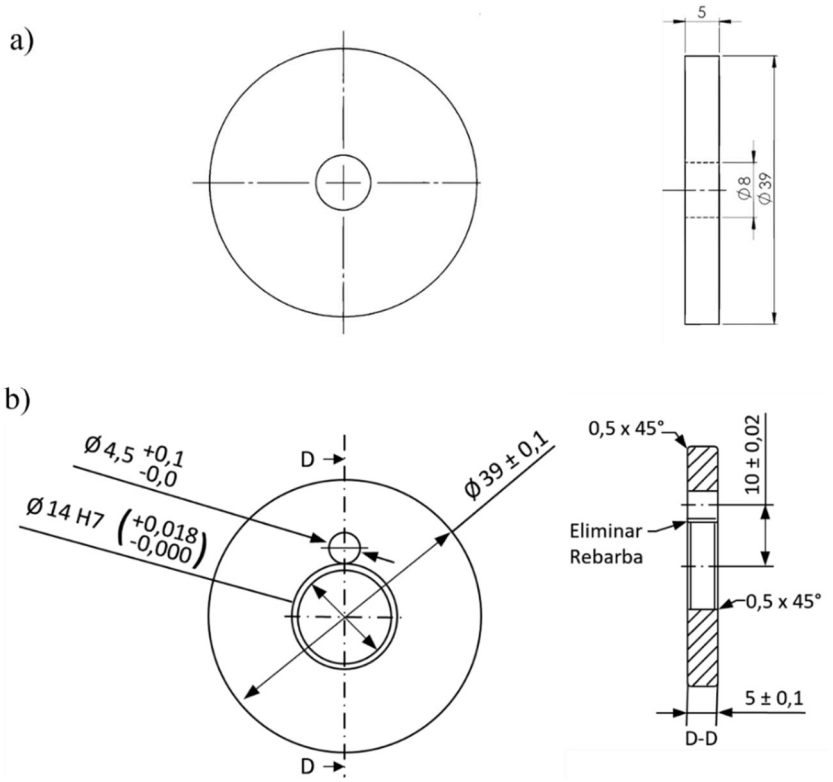


Figura 1. Dimensões (mm) e geometria dos corpos-de-prova. (a) Geometria A; (b) geometria B (fora de escala).

2.2. Métodos

Para executar o tratamento isotérmico, utilizou-se um forno do tipo mufla Grion para a austenitização, além de banho de sal fundido à base de cloretos ($BaCl_2$-NaCl-$CaCl_2$) e de estanho, como mostrado na Figura 2.

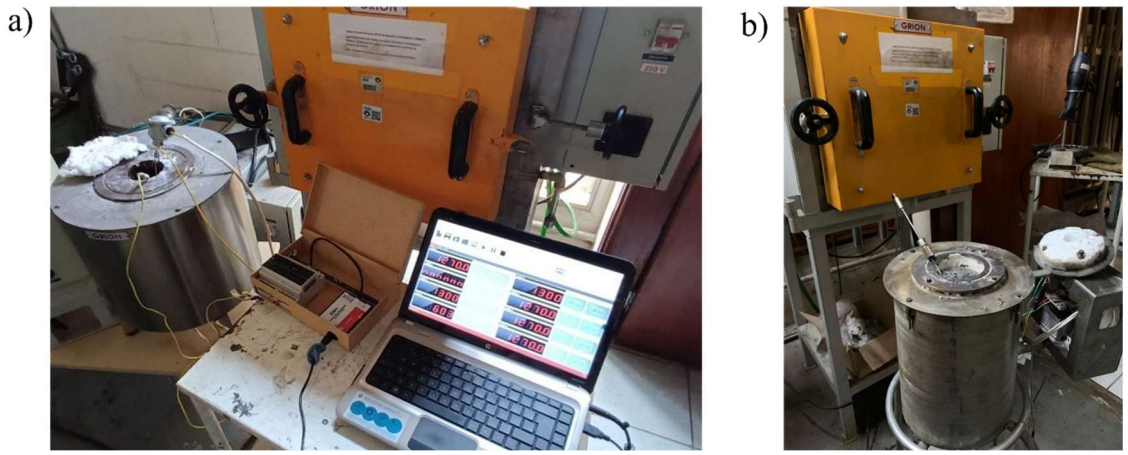


Figura 2. Sistema de tratamento térmico: (a) forno tipo mufla e banho de sal fundido; (b) forno tipo mufla e banho de estanho.

Definiram-se as rotas de tratamento isotérmico dos corpos-de-prova confeccionados de amostras da roda forjada e do lingote fundido de acordo com Rezende et al., (2020) e Vander Voort (1991), respectivamente. A Figura 3 apresenta tais rotas.

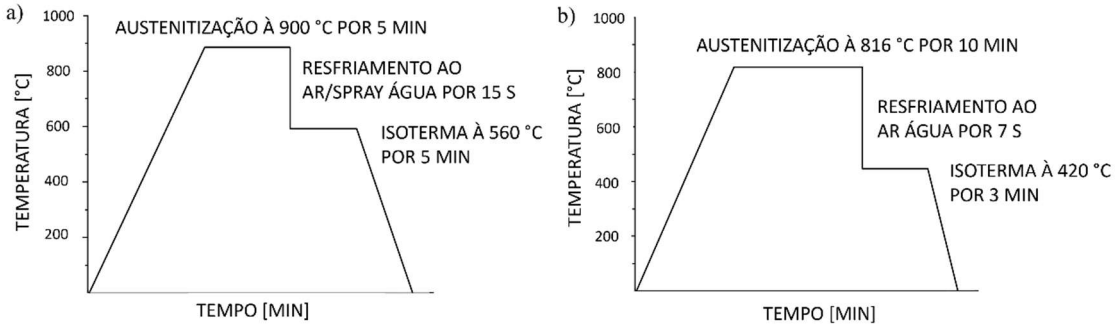


Figura 3. Rotas de tratamento isotérmico: (a) Rota 01 para amostras retiradas de roda forjada com austenitização em forno mufla e isoterma em banho de sal fundido; (b) rota 02 para amostras retiradas de lingotes fundidos com austenitização em forno mufla e isoterma em banho de estanho.

Os ensaios de dureza Brinell foram realizados com durômetro Wolpert HT-1a, utilizando penetrador esférico de carboneto de tungstênio com diâmetro de 2,5 mm e carga aplicada de 187,5 kgf, em conformidade com a norma ASTM E10-23 (2023).

A caracterização microestrutural foi conduzida por Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em microscópio NIKON Eclipse MA300 e microscópio JEOL JSM-6010PLUS/LA, respectivamente, com medição do espaçamento interlamelar de 5 colônias perlíticas, feita através do software ImageJ®. Além disso, para os corpos-de-prova fabricados de amostras de rodas forjadas com geometria B, foi feita análise de Difração de Raios-X (DRX). Por fim, a quantificação das microestruturas foi realizada pelo método dos pontos conforme norma ASTM E562-19 (2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Dureza

Os resultados dos ensaios de dureza Brinell e seu correspondente resumo estatístico são apresentados na Tabela 2. Há de se ressaltar que, inicialmente, a rota de tratamento isotérmico 01 foi aplicada para amostras retiradas de rodas forjadas e de lingote fundido, para ambas as geometrias, porém a dureza atingida para as fundidas ficou entre 321–327 HBW. Como estes valores não condiziam com o que preconiza a norma AAR (2011), a rota precisou ser modificada. Tal alteração foi uma tentativa de controlar mais precisamente a cinética de transformação perlítica a partir do diagrama ITT de Vander Voort (1991) nas amostras de lingote, compensando os efeitos do aumento do teor de enxofre (ZHANG et al., 2020; MACIEJEWSKI, 2015) de modo a favorecer a formação de perlita fina com dureza de 341–415 HBW, dentro do esperado pela norma.

Tabela 2: Resumo estatístico dos valores de dureza Brinell.

Estatística	Roda forjada	Lingote fundido
Média (HBW 2,5/187,5)	364	365
Desvio Padrão (HBW 2,5/187,5)	6	6
Contagem	19	13
95% IC (HBW 2,5/187,5)	3	3

Os valores médios de dureza Brinell obtidos para os materiais avaliados situam-se dentro da faixa usualmente reportada para aços ferroviários Classe D. Destaca-se o elevado controle do tratamento isotérmico quanto à faixa de durezas obtidas, a qual se apresentou significativamente estreita, inclusive quando comparada aos limites estabelecidos pelas normas de referência.

3.2. Microestrutura do corpo-de-prova: Geometria A

A Figura 4 apresenta a microestrutura predominantemente perlítica das amostras, tanto daquelas extraídas da roda forjada quanto das provenientes de lingotes fundidos, com geometria A. O espaçamento interlamelar médio foi medido na amostra da roda forjada através de imagem de MEV e correspondeu a de (217 ± 54) nm, condizente com perlita fina.

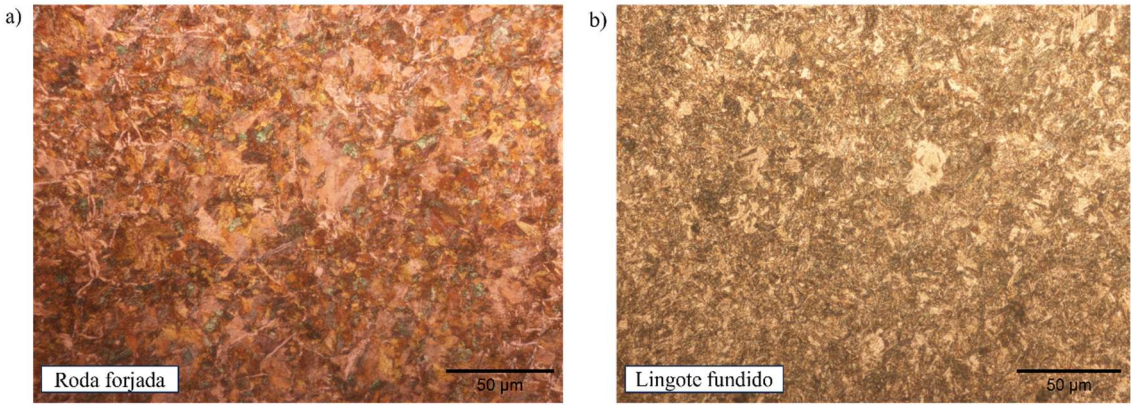


Figura 4. Amostras com geometria A retiradas: (a) de roda forjada; (b) de lingote fundido. Ataque Nital 2% por 10 s.

3.3. Microestrutura do corpo-de-prova: Geometria B

A Figura 5 mostra microestrutura de amostra retirada de roda forjada pós-tratamento térmico, evidenciando estrutura majoritariamente perlítica.



Figura 5. Amostra com geometria B retirada de roda forjada. Ataque Nital 2% por 10 s.

A Figura 6 mostra o resultado da DRX, onde é possível notar que as fases presentes na amostra pós-tratamento isotérmico são ferrita e cementita, as quais, pelas micrografias, estão estruturadas na forma de perlita.

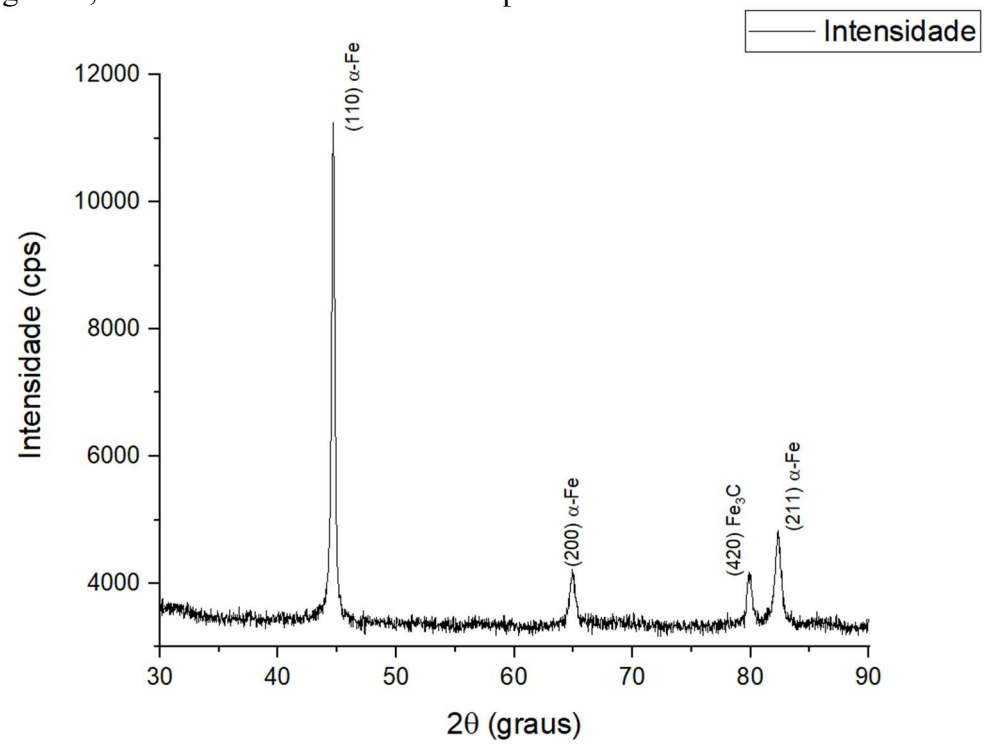


Figura 6. Difratograma de Raios-X de amostra de roda forjada.

Para as amostras provenientes dos lingotes fundidos com geometria B, a Figura 7 evidencia uma microestrutura composta predominantemente por matriz martensítica, com presença de bainita e perlita localizada em contornos de grão, apesar de dureza compatível com as amostras tratadas e retiradas de rodas forjadas. Tal resultado indica que o ciclo isotérmico aplicado não foi capaz de promover transformação perlítica homogênea, diferentemente do observado nas amostras com geometria A.

Uma hipótese para o ocorrido está relacionada à menor massa das amostras extraídas de lingote fundido e sua consequente maior taxa de resfriamento. Estudos, por exemplo, sobre efeito de espessura em chapas temperadas demonstram que variações na taxa de resfriamento ao longo da seção já são suficientes para alterar completamente os constituintes formados, promovendo, por exemplo, presença de martensita e bainita em regiões submetidas a resfriamento mais intenso (WANG et al., 2020).

Além disso, conforme discutido por Costa e Mei (2010), a formação de martensita está diretamente relacionada à temperabilidade do aço, a qual é governada principalmente pelos teores de Carbono (C), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Cromo (Cr) e Molibdênio (Mo). Do ponto de vista cinético, maior temperabilidade reduz a taxa crítica de resfriamento necessária para suprimir transformações difusionais. Levando isso em consideração, a amostra de lingote fundido exige maiores taxas de resfriamento para justificar a formação de martensita. Contudo, a trajetória térmica real das amostras pode ter sido mais severa do que a nominalmente prevista, em razão de diferenças geométricas e de extração térmica.

Outra possível explicação para a ausência de matriz perlítica após o tratamento isotérmico pode estar associada ao teor elevado de enxofre presente no material, que, como já mostrado, favorece a formação de inclusões de sulfeto de manganês (MnS). Tais

inclusões atuam como heterogeneidades microestruturais e interfaces de menor coesão com a matriz metálica, podendo alterar os mecanismos de nucleação e crescimento das fases durante as transformações da austenita. Neste contexto, o elevado teor de inclusões de sulfetos pode ter modificado localmente, também, a cinética de transformação durante o tratamento isotérmico, favorecendo a formação de constituintes distintos da perlita e contribuindo para a microestrutura observada (MACIEJEWSKI, 2015).

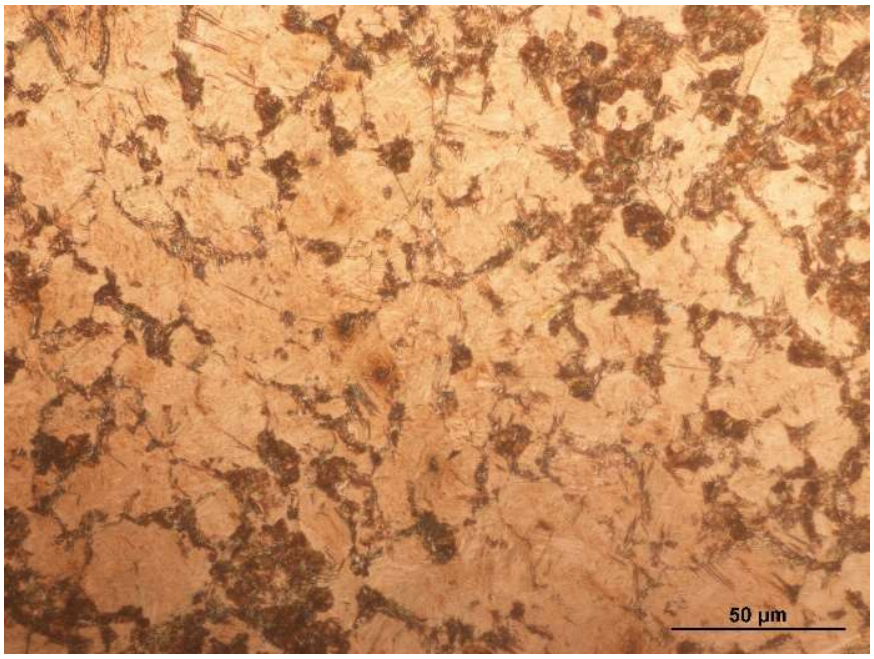


Figura 7. Amostra com geometria B retirada de lingote fundido. Ataque Nital 2% por 10 s.

Adicionalmente, a literatura sobre precipitação e cinética de transformação em aços microligados destaca que pequenas variações na velocidade de decomposição da austenita alteram significativamente os mecanismos de nucleação e crescimento de fases (HASHEMI, GHAZANI e EGHBALI, 2026).

Desta forma, a microestrutura mista observada pode ser interpretada como resultado de uma trajetória térmica não equivalente àquela assumida nominalmente pelo ciclo programado.

4. CONCLUSÕES

- Os tratamentos isotérmicos aplicados foram efetivos em padronizar a dureza, em (365 ± 6) HBW 2,5/187,5, entre as amostras oriundas de roda forjada e de lingote fundido atendendo aos valores exigidos para aços ferroviários Classe D;
- Apesar da equivalência de dureza, a microestrutura não foi homogênea entre todas as amostras, onde as com a geometria A, retiradas tanto de rodas forjadas quanto de lingotes fundidos, exibiram perlita fina enquanto as amostras de geometria B, derivadas de lingote fundido, apresentaram matriz martensítica com bainita e perlita em contornos do antigo grão austenítico;
- A diferença microestrutural observada é compatível com variação de gradientes térmicos induzidos pela geometria/massa das amostras e/ou pelos elementos de liga das amostras de lingote fundido, ou seja, um ciclo térmico com efeito esperado na dureza não produz transformações equivalentes quando a

massa/geometria/composição química do corpo-de-prova alteram a taxa de resfriamento;

- Em termos práticos, o trabalho demonstra que dureza isolada não é critério suficiente para assegurar equivalência microestrutural, sendo que controle térmico preciso, da influência geométrica e de composição são necessários para a garantia do padrão requisitado pela norma ferroviária AAR M-107/M-208 Section G (2011).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à VALE S.A, CAPES e Samarco S.A.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES FERROVIÁRIOS. **Boletim ANTF**. Brasília, 2026. Acesso em: 24 fev. 2026;

MIRANDA, R. S., REZENDE, A. B., FONSECA, S. T., FERNANDES, F. M., SINATORA, A., MEI, P. R. Fatigue and wear behavior of pearlitic and bainitic microstructures with the same chemical composition and hardness using twin-disc tests. **Wear**, v. 494, p. 204253, 2022. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204253;

MIRANDA, R. S., REZENDE, A. B., CARVALHO, A. C., FONSECA, S. T., SINATORA, A., MEI, P. R. The role of microstructure on the wear and rolling contact fatigue of railway steels: the performance of bainite. **Wear**, v. 548, p. 205398, 2024. DOI: 10.1016/j.wear.2024.205398;

XAVIER, L. M., STREY, N. F., BOHER, C., SCANDIAN, C. Evolution of surface layers during the sliding wear of wheel and rail steel under very high load. **Wear**, v. 571, p. 205772, 2025. DOI: 10.1016/j.wear.2025.205772;

OLIVEIRA, D. N., CAMPOREZ, R. M., NETO, C. A. R., STREY, N. F., SCANDIAN, C. Effects of temperature and load on sliding wear between wheel and rail steels. **Tribology International**, v. 210, p. 110804, 2025. DOI: 10.1016/j.triboint.2025.110804;

STREY, N. F.; VOLPONI, A. C. D.; CARVALHO, D. C.; NETO, C. A. R.; C. SCANDIAN, C. Caderno técnico: defeitos em rodas ferroviárias. **Universidade Federal do Espírito Santo-Vale,** 2021;

GERMINARI, V. G., MIRANDA, R. S., REZENDE, A. B., CARVALHO, A. C., MONTEIRO, D. S., JOSÉ-BUENO, M., ROCHA, R. C., SINATORA, A., MEI, P. R. Analysis of Wear in the Contact Between the Wheel Tread and the Rail Head: Influence of the Manufacturing Process of Cast and Forged Railway Wheels. **Materials Research**, v. 28, n. Suppl 1, p. e20250239, 2025. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2025-0239;

WALKER, P.F.F. Improving the reliability of highly loaded rolling bearings: The effect upstream processing on inclusions. **Materials Science and Technology**, v. 30, n4, pp. 385-410, 2014. DOI: 10.1179/1743284713Y.0000000491;

REZENDE, A. B., FERNANDES, F. M., FONSECA, S. T., FARINA, P. F. D. S., GOLDENSTEIN, H., MEI, P. R. Effect of alloy elements in time temperature transformation diagrams of railway wheels. In: **Defect and Diffusion Forum**. Trans Tech Publications Ltd, p. 11-20, 2020. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.400.11;

VANDER VOORT, George F. (Ed.). Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels. **ASM International**, 1991;

COSTA E SILVA, A. L. V. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications. **J Mater Res Technol**, v. 8, n. 2, p. 2408-2422, 2019. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.01.009;

ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (AAR). **M-107/M-208: Manual of standards and recommended practices — wheels and axles, Section G**. Washington, 2011;

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E10-23: Standard test method for Brinell hardness of metallic materials**. West Conshohocken, PA, 2023;

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E562-19: Standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count**. West Conshohocken, PA, 2019;

ZHANG, H., FENG, G., LIU, X., WANG, B., LIU, X. Effect of sulfur content on the composition of inclusions and MnS precipitation behavior in bearing steel. **Metals**, v. 10, n. 5, p. 570, 2020. DOI: 10.3390/met10050570;

MACIEJEWSKI, J. The effects of sulfide inclusions on mechanical properties and failures of steel components. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 15, n. 2, p. 169-178, 2015. DOI: 10.1007/s11668-015-9940-9;

WANG, Q., QIBIN, Y., ZHAODONG, W., LIYE, K., HONGTAO, W. Thickness effect on microstructure, strength, and toughness of a quenched and tempered 178 mm thickness steel plate. **Metals (Basel)**, 10: 1–16. 2020. DOI: 10.3390/met10050572;

DA COSTA, A. L. V.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. Editora Blucher, 2010;

HASHEMI, S. G.; SHABAN, G. M.; EGHBALI, B. The Influence of Molybdenum and Niobium on the Vanadium Precipitation Behavior in Low-Carbon Micro-alloyed Steels During Isothermal Heat Treatment. **Metallography, Microstructure, and Analysis**, p. 1-14, 2025. DOI: 10.1007/s13632-025-01277-0.

EFFECT OF GEOMETRY, CHEMICAL COMPOSITION, AND ISOTHERMAL HEAT TREATMENT TEMPERATURE ON THE HARDNESS AND MICROSTRUCTURE OF MICROALLOYED STEELS FOR RAILWAY WHEELS

ABSTRACT

Heavy haul railway transportation requires high reliability of wheels operating under severe wheel–rail contact conditions, with AAR Class D microalloyed pearlitic steels being widely employed in such applications. Considering that mechanical properties, microstructural morphology, and metallurgical discontinuities directly influence the performance of railway wheels against damage, the present study aimed to evaluate the effect of isothermal heat treatment routes applied to these forged and cast steels, with different chemical compositions and geometries, on their microstructure and hardness. The materials were subjected to isothermal treatments in molten salt (560 °C) or molten tin (420 °C) baths. Characterization included Brinell hardness testing, quantitative metallography using Optical Microscopy and Scanning Electron Microscopy, as well as X-ray Diffraction. The results indicated that lower isothermal temperatures (420 °C) lead to an undesirable microstructure (bainite, martensite, and pearlite), although maintaining hardness within the range required for AAR Class D steels. To achieve a hardness of (365 ± 6) HBW 2.5/187.5, while maintaining a predominantly pearlitic microstructure, strict control of chemical composition, geometry, and temperature (560 °C) is required.

Keywords: *Railway wheels; Microalloyed steel; Isothermal heat treatment; Hardness; Microstructure.*