

# **De peças obsoletas a soluções sob demanda: A convergência entre Manufatura Aditiva e Ferrovia 4.0**

Larissa Fernandes, Matheus H. Calderario, Jonas M. da Silveira - MRS

## **Resumo**

O setor ferroviário tem enfrentado desafios crescentes relacionados à obsolescência de componentes, longos prazos de fornecimento e dependência de cadeias de suprimento. Neste contexto, a Ferrovia 4.0, conceito que incorpora tecnologias digitais, conectividade e manufatura avançada, desponta como uma solução estratégica para modernizar a operação e manutenção dos ativos. Este artigo apresenta a manufatura aditiva (popularmente conhecida como impressão 3D) como um pilar essencial dessa transformação, destacando sua aplicação na produção sob demanda de peças com difícil acesso financeiro e técnico no mercado. A manufatura aditiva (MA) apresenta potencial para reduzir o capital imobilizado em estoques, diminuir *lead time* de componentes e mitigar a dependência de fornecedores, promovendo, assim, maior autonomia e agilidade nos processos ferroviários. Neste trabalho, será discutido um caso real da utilização de manufatura aditiva via deposição a arco (WAAM) para componentes ferroviários, com ênfase na melhoria da qualidade, sustentabilidade e flexibilidade produtiva. Os resultados demonstram que a convergência entre MA e Ferrovia 4.0 não apenas resolve gargalos de manutenção, mas também impulsiona a resiliência e eficiência das operações ferroviárias frente a cenários de incerteza logística.

**Palavras-chave:** Ferrovia 4.0; Manufatura Aditiva; Sustentabilidade Ferroviária

## **Abstract**

The railway sector has been facing growing challenges related to component obsolescence, long supply lead times, and dependence on supply chains. In this context, Railway 4.0—a concept that incorporates digital technologies, connectivity, and advanced manufacturing—emerges as a strategic solution to modernize asset operation and maintenance. This article presents additive manufacturing (commonly known as 3D printing) as an essential pillar of this transformation, highlighting its application in the on-demand production of parts that are financially and technically difficult to source in the market. Additive manufacturing (AM) has the potential to reduce capital tied up in inventory, shorten component lead times, and mitigate supplier

dependence, thereby promoting greater autonomy and agility in railway processes. This paper discusses a real case of using additive manufacturing via Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) for railway components, with an emphasis on improving quality, sustainability, and production flexibility. The results show that the convergence of AM and Railway 4.0 not only addresses maintenance bottlenecks but also drives resilience and operational efficiency in the face of logistical uncertainty.

**Keywords:** Railway 4.0; Additive Manufacturing; Railway Sustainability

## Sumário

1.	Introdução.....	2
2.	Metodologia.....	4
2.1.	Seleção da peça.....	4
2.2.	Seleção do material para impressão.....	5
2.3.	Impressão da roda.....	6
2.4.	Ensaio mecânicos e microestruturais.....	7
2.4.1.	Ensaio de tração.....	7
2.4.2.	Ensaio de dureza Vickers.....	8
2.4.3.	Análise microestrutural.....	9
3.	Desenvolvimento e Resultados.....	9
3.1.	Comportamento mecânico.....	10
3.1.1.	Ensaio de dureza Vickers.....	10
3.1.2.	Ensaio de tração.....	11
3.2.	Avaliação microestrutural.....	12
3.3.	Testes em campo.....	14
4.	Conclusões.....	15
5.	Referências.....	16

### 1. Introdução

O setor ferroviário é um dos pilares fundamentais para o transporte de cargas e passageiros em escala global, desempenhando papel crucial no desenvolvimento econômico e na sustentabilidade dos sistemas logísticos (UIC, 2021). Entretanto, a indústria enfrenta desafios complexos, como a crescente obsolescência de componentes, a dependência de fornecedores e os longos prazos de fornecimento, que impactam diretamente a eficiência operacional e a disponibilidade dos ativos (Silva *et al.*, 2021; Costa & Almeida, 2020). Tais dificuldades são exacerbadas pela volatilidade das cadeias globais de suprimento e pela necessidade crescente de manutenção preditiva e customizada, impostas pelas demandas contemporâneas por maior confiabilidade e redução de custos operacionais (Zhang *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a adoção do conceito de Ferrovia 4.0 emerge como uma resposta estratégica e disruptiva, alinhada aos princípios da Indústria 4.0, que visa a integração de tecnologias digitais avançadas, automação, Internet das Coisas (IoT), análise de dados e manufatura avançada para

transformar a operação, manutenção e gestão dos ativos ferroviários (Gomes *et al.*, 2022; Rodrigues *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2020).

Dentro desse cenário, a manufatura aditiva (MA), popularmente conhecida como impressão 3D, destaca-se como um elemento chave da Ferrovia 4.0. A MA permite a produção rápida e sob demanda de peças complexas e personalizadas, superando limitações de fabricação convencionais e oferecendo alternativas para componentes obsoletos ou com difícil acesso no mercado (Pereira & Santos, 2019; Gupta & Kumar, 2018). Além disso, a redução do capital imobilizado em estoques, a diminuição do lead time e a mitigação da dependência de fornecedores promovem maior autonomia e agilidade operacional, aspectos fundamentais para a competitividade e sustentabilidade do setor ferroviário (Lima *et al.*, 2020).

A manufatura aditiva (MA) teve sua introdução inicial no mercado como uma metodologia de fabricação voltada principalmente para a produção de souvenirs em materiais poliméricos. Contudo, a MA apresenta um potencial significativo não apenas para a fabricação de brinquedos já disponíveis comercialmente, mas também para a produção de componentes metálicos de alta engenharia, especialmente aplicados ao setor ferroviário.

A técnica de *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), uma modalidade da MA que utiliza deposição de arame metálico por arco elétrico, tem ganhado relevância na fabricação de componentes metálicos de grandes dimensões, oferecendo vantagens como alta produtividade, custo competitivo e propriedades mecânicas adequadas para aplicações estruturais (Martins *et al.*, 2019). Sua aplicação em peças ferroviárias apresenta potencial para revolucionar a cadeia de suprimentos, especialmente para reparos e reposições rápidas, consolidando-se como um pilar fundamental na modernização da manutenção ferroviária. Além disso, a aplicação da manufatura aditiva permite a utilização seletiva de diferentes materiais conforme as especificações funcionais de cada região da peça. Por exemplo, quando um determinado componente requer uma área com características mecânicas mais flexíveis e outra com maior rigidez, é possível realizar a impressão integrando materiais distintos nessas regiões específicas, de modo a alcançar as propriedades desejadas e otimizar o desempenho funcional do produto.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar o papel da manufatura aditiva no contexto da Ferrovia 4.0, com ênfase em sua contribuição para o aprimoramento da eficiência operacional, sustentabilidade e resiliência das atividades ferroviárias. Para isso, é apresentado um estudo de caso que aborda a aplicação da tecnologia de WAAM na fabricação de rodas utilizadas nos carros de medição acoplados às socadoras de linha.

## **2. Metodologia**

Neste capítulo será apresentado a metodologia para desenvolvimento do trabalho.

### **2.1. Seleção da peça**

Tendo em vista que a manufatura aditiva metálica ainda não se encontra plenamente consolidada como uma tecnologia madura para aplicações críticas no setor ferroviário, optou-se por iniciar os estudos com um componente cuja eventual falha em campo não compromettesse a segurança e operação do sistema. Para tanto, foi realizada uma análise criteriosa de diferentes componentes ferroviários, considerando sua viabilidade técnica para fabricação por meio do processo WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), bem como o impacto operacional de uma eventual falha

Com base nesses critérios, a roda do carro de medição utilizado em socadoras de linha foi selecionada como objeto de estudo. Essa escolha se justifica pelo fato de tratar-se de um componente de complexidade intermediária, sujeito a desgaste recorrente e cuja substituição pode ser realizada de forma programada, sem prejuízo à continuidade das atividades operacionais.

A partir da definição do componente, foram conduzidas análises em campo com o intuito de identificar os potenciais benefícios decorrentes da adoção da manufatura aditiva em sua produção. Entre as principais melhorias esperadas com a aplicação da tecnologia WAAM, destacam-se:

- Aumento da resistência ao desgaste superficial;
- Redução do tempo de fabricação (*lead time*);
- Diminuição da necessidade de manutenção de estoques;
- Redução da dependência de fornecedores externos.

### **2.2. Seleção do material para impressão**

Com a definição do componente a ser produzido, iniciou-se a etapa de seleção do material mais adequado para sua fabricação via WAAM, considerando critérios de desempenho mecânico, compatibilidade com o processo e viabilidade econômica.

Inicialmente, estabeleceu-se um conjunto de requisitos mínimos que o componente impresso deveria atender para ser considerado funcional e seguro em sua aplicação. Em virtude da ausência de normas específicas para rodas de carros de medição, adotou-se, de forma conservadora, a norma AAR M-107/208 – Classe L, usualmente aplicada à fabricação de rodas ferroviárias para vagões de carga. Essa escolha visa garantir a confiabilidade estrutural do componente, utilizando como referência uma norma mais exigente.

A Tabela 1 apresenta a composição química típica das rodas Classe L, conforme especificado pela norma mencionada.

Element	Ladle Analysis (%)			
	Class L	Class A	Class B	Class C
Carbon	0.47 max.	0.47–0.57	0.57–0.67	0.67–0.77
Manganese	0.60–0.90	0.60–0.90	0.60–0.90	0.60–0.90
Phosphorous	0.030 max.	0.030 max.	0.030 max.	0.030 max.
Sulfur	0.005–0.040	0.005–0.040	0.005–0.040	0.005–0.040
Silicon	0.15–1.00	0.15–1.00	0.15–1.00	0.15–1.00
	Residual Elements			
Nickel	0.25 max. <sup>a/l</sup>	0.25 max. <sup>a/l</sup>	0.25 max. <sup>a/l</sup>	0.25 max. <sup>a/l</sup>
Chromium	0.25 max. <sup>a/l</sup>	0.25 max. <sup>a/l</sup>	0.25 max. <sup>a/l</sup>	0.25 max. <sup>a/l</sup>
Molybdenum	0.10 max. <sup>a/l</sup>	0.10 max. <sup>a/l</sup>	0.10 max. <sup>a/l</sup>	0.10 max. <sup>a/l</sup>
Vanadium	0.040 max. <sup>a/l</sup>	0.040 max. <sup>a/l</sup>	0.040 max. <sup>a/l</sup>	0.040 max. <sup>a/l</sup>
Copper	0.35 max.	0.35 max.	0.35 max.	0.35 max.
Aluminum	0.060 max.	0.060 max.	0.060 max.	0.060 max.
Titanium	0.03 max.	0.03 max.	0.03 max.	0.03 max.
Columbium (niobium)	0.05 max.	0.05 max.	0.05 max.	0.05 max.

Tabela 1 – Composição química típica da roda Classe L segundo AAR M-107/208 (2020)

Além da composição química, a dureza superficial é um parâmetro relevante para o desempenho em serviço, sobretudo no que diz respeito à resistência ao desgaste. A Tabela 2 apresenta a faixa de dureza esperada para rodas produzidas segundo essa especificação normativa.

Brinell hardness of rim		
Class	Minimum Hardness	Maximum Hardness
L	197 HBW	277 HBW
A	255 HBW	321 HBW
B	302 HBW	341 HBW
C	321 HBW	363 HBW
D	341 HBW	415 HBW

Tabela 2 – Faixa de dureza da roda Classe L conforme AAR M-107/208 (2020)

Entretanto, ao se avaliar o carbono equivalente (CE) da liga prescrita pela norma, verificou-se que seu alto teor de elementos de liga inviabiliza a utilização direta no processo WAAM, devido à maior propensão à formação de trincas e tensões residuais durante a solidificação do metal depositado.

Diante dessa limitação técnica, e considerando a disponibilidade de consumíveis metálicos no mercado, optou-se pelo uso de um arame com composição química mais adequada ao processo WAAM, conforme demonstrado na Tabela 3.

C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
0,06	1,36	0,79	0,016	0,011	0,02	0,02	0,5	0,01

Tabela 3 – Composição química do arame utilizado na impressão da roda

O material selecionado apresenta menor carbono equivalente, o que reduz significativamente o risco de trincas e deformações durante a impressão. Além disso, a presença de elementos como manganês (Mn), cromo (Cr) e níquel (Ni) contribui para o aumento da resistência ao desgaste e da tenacidade, aproximando-se do desempenho requerido pela norma AAR Classe L.

### 2.3. Impressão da roda

A etapa seguinte consistiu na fabricação da primeira roda por meio de deposição pelo processo WAAM, utilizando o arame previamente selecionado. A fabricação foi conduzida nas instalações do CIT-SENAI BH, no IST Metalmecânica. A Figura 1 ilustra o início do processo de deposição, enquanto a Figura 2 apresenta a roda ao final da impressão.



Figura 1 – Início do processo de impressão da roda do carro de medição



Figura 2 – Roda após o processo de impressão por WAAM

Os parâmetros operacionais adotados para o processo foram os seguintes:

- Gás de proteção: mistura de 98% Ar e 2% CO<sub>2</sub>
- Vazão do gás: 15 L/min
- Diâmetro do arame: 1,2 mm
- Velocidade de soldagem: variável
- Stick-out: 15 mm
- Tensão média: 14 V
- Corrente média: 105 A

Concluído o processo de impressão, a roda foi submetida à usinagem da pista de rolamento, etapa necessária para garantir as tolerâncias dimensionais e o acabamento superficial adequado, sendo posteriormente encaminhada para os ensaios laboratoriais.

#### **2.4. Ensaios mecânicos e microestruturais**

Foram realizados ensaios de tração, dureza Vickers e análises microestruturais no material impresso, com o objetivo de avaliar seu desempenho mecânico e estrutural.

##### **2.4.1 Ensaio de tração**

Os corpos de prova foram extraídos em duas direções distintas: no sentido longitudinal, ao longo do comprimento dos cordões depositados, e no sentido transversal, perpendicular ao sentido de deposição. O ensaio foi conduzido conforme os critérios estabelecidos pela norma

ASTM A370, utilizando corpos de prova do tipo *subsize*, obtidos por eletroerosão a fio. As dimensões dos CPs são apresentadas na Figura 3.

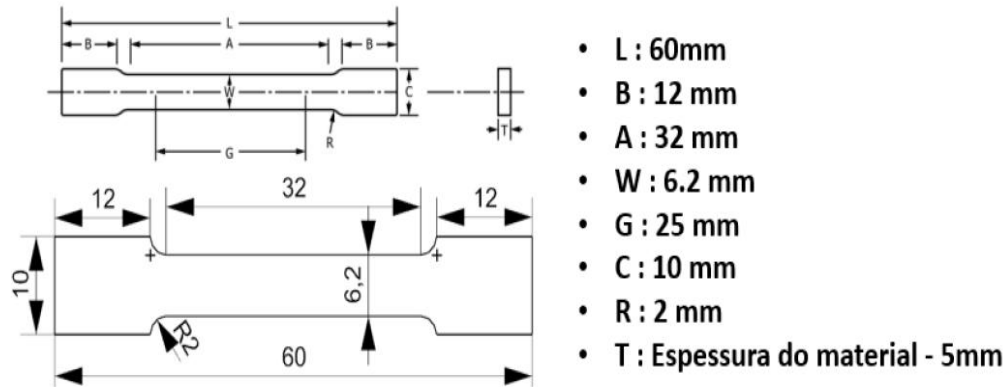


Figura 3 – Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração

Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaio universal KRATOS - KE, com capacidade máxima de 500 kN. Os principais parâmetros adotados foram:

- Taxa de aplicação da carga: aproximadamente 1,75 mm/min
- Porcentagem para definição do limite de escoamento: 0,2%
- Escala de leitura da carga: 5 kN

Como a norma AAR M-107/208 (2020) não estabelece valores mínimos para resistência à tração e ao escoamento em rodas Classe L, adotou-se como referência os valores típicos do aço AISI 1045, cuja composição é semelhante à apresentada na Tabela 1.

Foram ensaiados oito corpos de prova, sendo quatro na direção longitudinal e quatro na direção transversal.

#### 2.4.2 Ensaio de dureza Vickers

A análise de dureza Vickers foi inspirada no padrão descrito pela norma AAR M-107/208, conforme ilustrado na Figura 4.

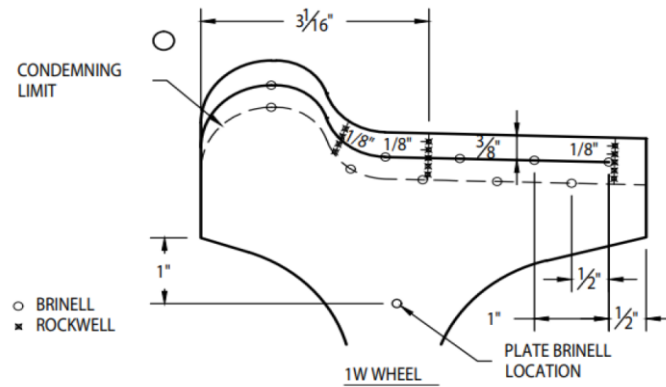


Figura 4 – Padrão de ensaio de dureza para rodas segundo AAR M-107/208

A Figura 5 apresenta o padrão inspirado na Figura 4 para obtenção do perfil de dureza da roda. As medições foram realizadas com aplicação de carga correspondente a HV10.

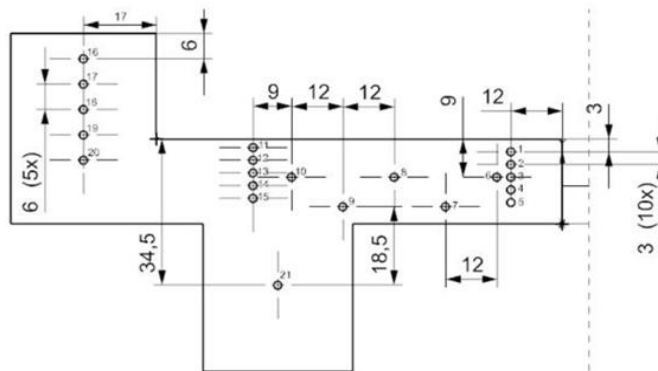


Figura 5 – Configuração do ensaio de dureza Vickers (HV10)

### 2.4.3 Análise microestrutural

As análises microestruturais foram realizadas com o auxílio de microscopia óptica, com o objetivo de investigar a evolução das fases microestruturais em função da deposição dos cordões de solda. As observações foram realizadas com ampliações de até 500x, possibilitando a caracterização das diferentes fases presentes nas regiões de interesse.

### 3. Desenvolvimento e Resultados

Após o processo de manufatura aditiva, a roda foi submetida à usinagem da pista de rolamento e, em seguida, a uma série de ensaios laboratoriais, cujos resultados são apresentados nesta

seção. Com base nas análises obtidas, foram avaliadas as condições para a continuidade dos testes em campo.

### 3.1. Comportamento mecânico

Neste capítulo será apresentado e discutido os resultados dos ensaios mecânicos obtidos para a roda fabricada.

#### 3.1.1. Ensaio de dureza Vickers

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos no ensaio de dureza Brinell (HBW), conforme o perfil de medição adotado.

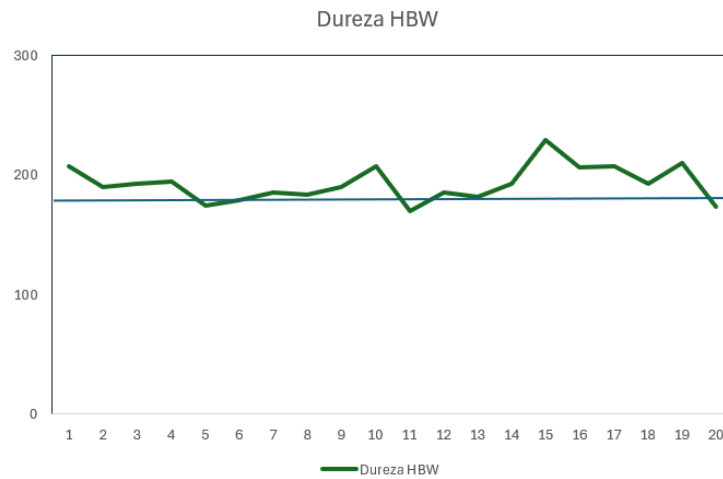


Figura 6 – Perfil de dureza HBW: linha verde representa os valores medidos; linha azul representa o valor mínimo estimado de dureza para o material

A norma AAR M-107/208 (2020) não estabelece um perfil de dureza específico para rodas Classe L, limitando-se a informar a faixa aceitável de dureza da bandagem, que deve variar entre 197 e 217 HBW. No entanto, para rodas da Classe B, a norma especifica um perfil de dureza entre 28 HRC e 40 HRC, e uma dureza de bandagem entre 302 e 341 HBW.

Considerando essa lacuna normativa, foi realizada uma extrapolação dos dados com o intuito de propor um perfil de dureza para rodas da Classe L, conforme representado na Figura 7.

	Dureza Bandagem		Perfil dureza	
	Min (HBW)	Máx (HBW)	Min (HBW)	Máx (HBW)
Dados roda classe L	197	277	NA	NA
Dados roda classe B	302	341	285	341

Dureza bandagem classe B - Dureza bandagem classe L

302	341	
-197	-277	
<b>105</b>	<b>64</b>	→ Delta durezas bandagem

Perfil dureza classe B - Delta durezas bandagem

285	341	
-105	-64	
<b>180</b>	<b>277</b>	→ Valores estimados para o perfil de dureza roda classe L

Figura 7 – Metodologia adotada para estimativa do perfil de dureza da roda Classe L

Com base nessa estimativa, verifica-se que alguns pontos do perfil obtido ficaram ligeiramente abaixo da faixa proposta. Ressalta-se, contudo, que o componente em questão é uma roda de carro de medição, e não uma roda destinada ao transporte ferroviário de cargas ou passageiros, cujos requisitos estruturais são substancialmente mais rigorosos.

### 3.1.2. Ensaio de tração

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração, realizados com corpos de prova extraídos nas direções longitudinal e transversal em relação aos cordões de deposição.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de tração do material impresso

		Escoamento (Mpa)	Resistência (Mpa)
Transversal	CP1	439,8	455,1
	CP2	304,9	317,0
	CP8	482,7	557,0
	CP3	461,9	566,1
	<b>Média</b>	450,9	506,0
Longitudinal	CP4	555,5	581,3
	CP5	494,6	586,1
	CP6	469,3	477,0
	CP7	478,2	588,0
	<b>Média</b>	486,4	583,7

Embora a norma AAR M-107/208 (2020) não especifique os limites de resistência à tração ou ao escoamento para rodas Classe L, a realização do ensaio foi considerada pertinente para uma avaliação mais completa do desempenho mecânico do material. Para fins de comparação, adotou-se como referência as propriedades do aço AISI 1045, devido à similaridade em sua composição química.

De acordo com Bejo *et al.* (2021), os valores típicos para o aço 1045 na condição laminada a quente são:

- Tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ): ~475 MPa
- Resistência à tração ( $\sigma_r$ ): ~677 MPa

Ao comparar os resultados obtidos para a condição longitudinal com esses valores de referência, observa-se que a tensão de escoamento se manteve próxima à do aço 1045, enquanto a resistência à tração apresentou uma diferença negativa de aproximadamente 90 MPa, situando-se abaixo do valor típico do aço de referência.

### 3.2. Avaliação microestrutural

As Figuras 8 e 9 apresentam as micrografias obtidas das seções transversal e longitudinal da roda impressa, com ampliações variando entre 25x e 500x.

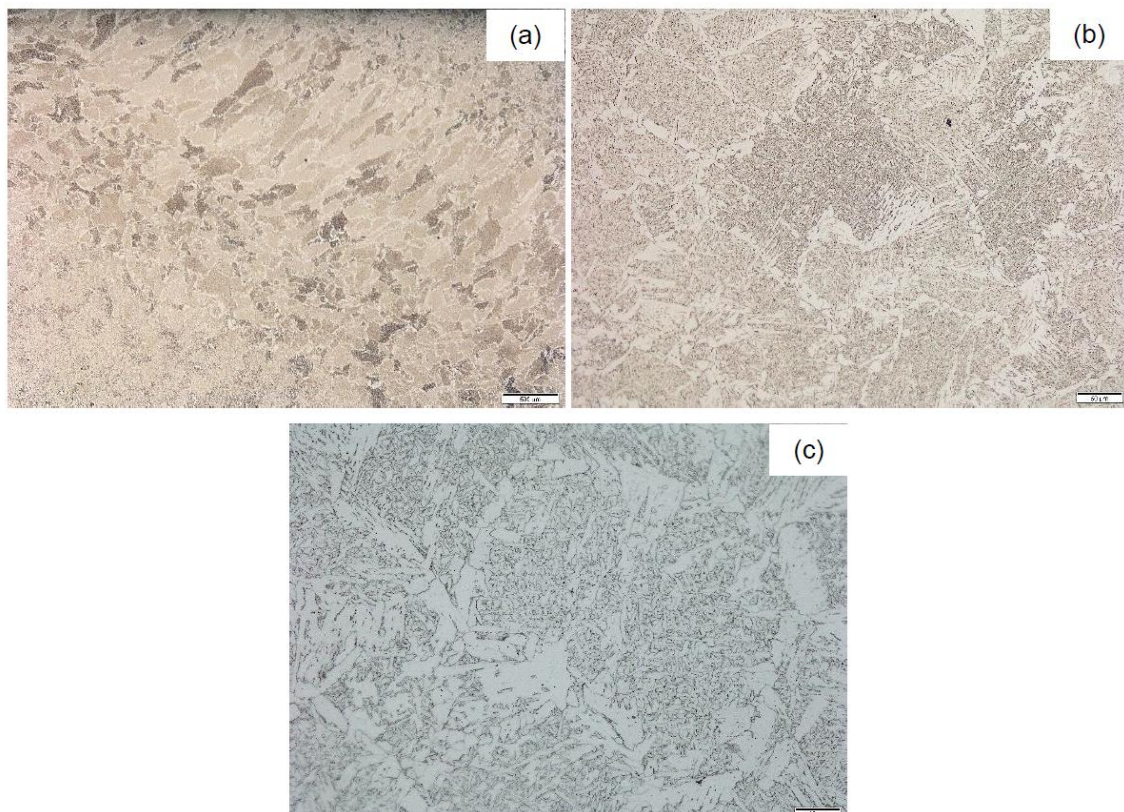


Figura 8 – Microestruturas da seção transversal: (a) 25x, (b) 200x, (c) 500x

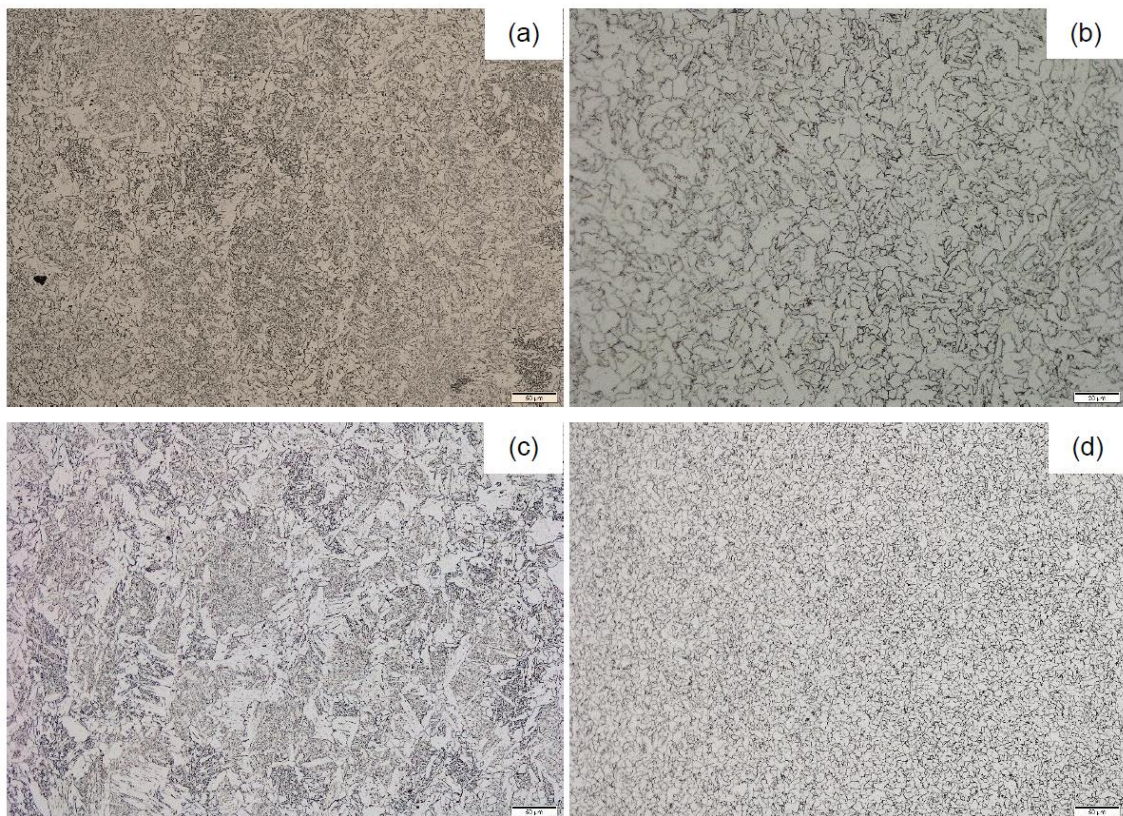


Figura 9 – Microestruturas da seção longitudinal: (a) 200x, (b) 500x, (c) 200x, (d) 200x

As análises revelam que ambas as seções apresentam microestrutura predominantemente ferrítica, com presença secundária de perlita na forma esferoidizada. Na seção transversal (Figura 8a), é possível visualizar nitidamente as camadas de deposição e a formação da Zona Afetada pelo Calor (ZAC), caracterizada por regiões com grãos ferríticos grosseiros, refinados, alongados e equiaxiais.

Nas demais imagens da Figura 8 (b e c), identificam-se diferentes morfologias de ferrita: equiaxial, acicular, alotriomórfica e Widmanstätten. A perlita esferoidizada encontra-se distribuída ao longo dos contornos de grão da ferrita, o que pode ser indicativo de perda local de propriedades mecânicas, em função da exposição prolongada ao calor durante a deposição (MATA, 2022).

Na seção longitudinal (Figura 9), observam-se morfologias ferríticas semelhantes. As micrografias evidenciam zonas com ferrita quase equiaxial, acicular e alotriomórfica, além de sinais de início de formação da ferrita Widmanstätten.

A presença de ferrita acicular é indicativa de regiões com resfriamento rápido, o que corrobora com a heterogeneidade observada no perfil mecânico, especialmente nos resultados do ensaio

de tração. A ferrita alotriomórfica foi observada nas zonas de refusão, típicas da interface entre camadas de deposição, onde a morfologia dos grãos muda conforme a taxa de resfriamento e a direção do crescimento da peça.

A análise revela, de forma geral, uma distribuição heterogênea dos microconstituintes, o que afeta a isotropia do material, resultado que está em consonância com as diferenças observadas entre os corpos de prova de tração testados em diferentes direções.

### **3.3. Testes em campo**

Com base nos resultados laboratoriais, foi fabricada uma segunda roda, utilizando os mesmos parâmetros de impressão da primeira. Após a usinagem da pista de rolamento, friso e sedes dos rolamentos, essa roda foi preparada para testes operacionais em ambiente real.

A Figura 10 apresenta a roda finalizada para os testes em campo.

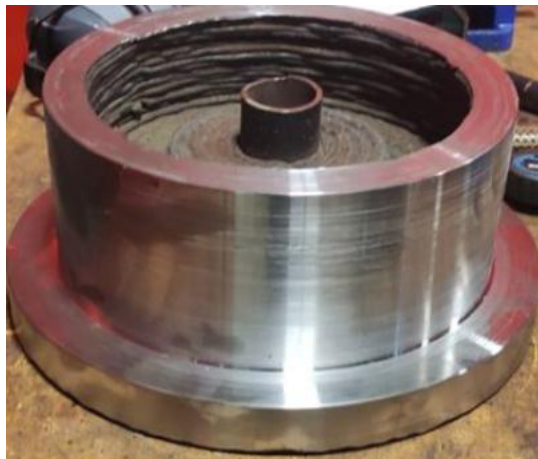


Figura 10 – Roda impressa e usinada para aplicação em campo

Em março de 2025, a roda foi instalada em uma socadora de linha, iniciando seu ciclo de operação ferroviária. A Figura 11 ilustra a roda já instalada na máquina pronta para operação.

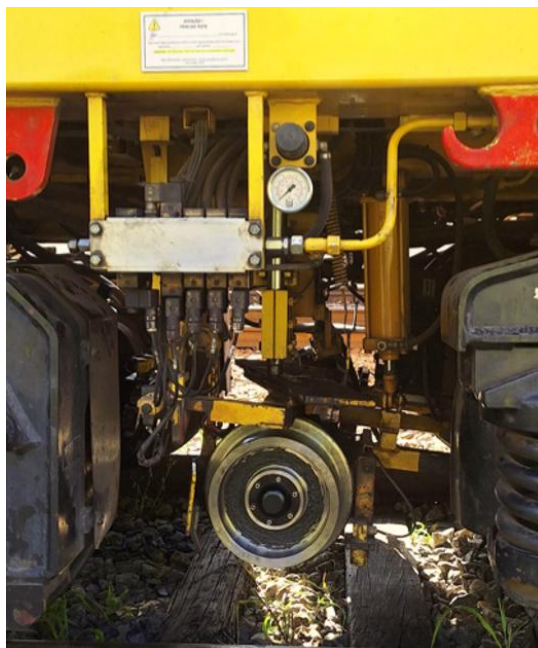


Figura 11 – Aplicação da roda em campo (socadora de linha)

Em agosto de 2025, após cinco meses de operação, foi realizada uma inspeção dimensional da roda. Verificou-se que nenhuma alteração significativa nas dimensões foi identificada até o momento. Em comparação, rodas originais do fabricante, após o mesmo período de uso, já apresentariam sinais evidentes de desgaste.

Como próximos passos, a roda continuará sendo monitorada periodicamente por mais sete meses, totalizando um ano de acompanhamento em operação. Caso os resultados continuem satisfatórios ao final desse período, será possível homologar a roda em caráter condicional, possibilitando a fabricação de novos lotes de forma controlada para aplicação em campo.

A homologação definitiva da roda somente será emitida após a conclusão de sua vida útil estimada, de aproximadamente dois anos, conforme referência das rodas originais do fabricante.

#### **4. Conclusões**

Este trabalho apresentou o desenvolvimento, caracterização e avaliação preliminar de uma roda ferroviária fabricada por manufatura aditiva utilizando o processo WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*). A escolha do componente – uma roda de carro de medição – foi estratégica, tendo em vista sua menor criticidade operacional e o potencial para validação técnica da tecnologia em aplicações ferroviárias.

A partir da seleção de um material compatível com o processo WAAM e com propriedades mecânicas próximas às especificações da norma AAR M-107/208 para rodas Classe L, foi possível realizar a impressão bem-sucedida da peça. Os ensaios mecânicos indicaram que, embora a resistência à tração do material impresso tenha sido um pouco inferior (~ 90MPa) àquela observada no aço 1045, os valores de tensão de escoamento mostraram-se compatíveis, sugerindo viabilidade estrutural para aplicações de menor exigência.

A análise de dureza revelou relativa homogeneidade no perfil avaliado, ainda que alguns valores tenham ficado levemente abaixo da faixa estimada. No entanto, considerando a aplicação específica da roda impressa, tais variações não comprometem sua integridade funcional. As observações microestruturais evidenciaram a presença de uma matriz ferrítica com perlita esferoidizada, além de zonas com grãos equiaxiais, aciculares e morfologias típicas de processos com altas taxas térmicas, o que confirma a influência da natureza camada por camada da técnica WAAM.

Os primeiros testes em campo, após cinco meses de operação, indicaram bom desempenho dimensional da roda impressa, com ausência de desgaste significativo no período analisado. Este resultado reforça a viabilidade do uso da manufatura aditiva para a produção de componentes ferroviários sujeitos a condições operacionais moderadas.

Como continuidade deste trabalho, a roda permanecerá em operação por até doze meses para homologação condicional, sendo que a homologação definitiva será possível após o término de sua vida útil estimada, de aproximadamente dois anos. Os resultados obtidos até o momento demonstram o potencial da tecnologia WAAM como alternativa promissora para a fabricação de componentes ferroviários, especialmente em situações onde a reposição rápida, a redução de estoques e a dependência de fornecedores são fatores críticos.

## **5. Referências**

AAR M107/208. *Manual of Standard and Recommendation Practices Section G*, 2020.

COSTA, M.; ALMEIDA, R. Logística e cadeias de suprimento no setor ferroviário. *Revista de Engenharia Ferroviária*, v. 15, n. 2, p. 123-134, 2020.

GOMES, P. *et al.* Implementação da Ferrovia 4.0: desafios e oportunidades. *Tecnologia e Inovação*, v. 9, n. 1, p. 45-60, 2022.

- GUPTA, A.; KUMAR, S. Additive manufacturing in transportation industry: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 97, n. 5-8, p. 2009-2023, 2018.
- LIMA, F.; SOUSA, J.; ROCHA, T. Manufatura aditiva na manutenção ferroviária: um estudo de caso. *Revista Brasileira de Manufatura*, v. 7, n. 3, p. 89-101, 2020.
- MATA, Stephany Aparecida Santos da. *Análise da microestrutura e das alterações na dureza de um aço perlítico esferoidizado após tratamento térmico e laminação a frio*. 2022.
- MARTINS, L. *et al.* Wire arc additive manufacturing: state of the art and future perspectives. *Materials Science and Engineering A*, v. 763, p. 138-142, 2019.
- PEREIRA, D.; SANTOS, R. Aplicações da impressão 3D na indústria ferroviária. *Jornal de Engenharia Industrial*, v. 24, n. 4, p. 345-357, 2019.
- RODRIGUES, E. *et al.* Digitalização e automação na Ferrovia 4.0. *Revista de Sistemas Industriais*, v. 11, n. 2, p. 150-167, 2021.
- SILVA, M.; OLIVEIRA, P.; FERNANDES, L. Desafios da obsolescência no setor ferroviário. *Engenharia de Manutenção*, v. 13, n. 1, p. 27-38, 2021.
- UIC – INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS. *Railway Statistics 2021*. 2021. Disponível em: <https://uic.org/>. Acesso em: [inserir data de acesso].
- ZHANG, Y. *et al.* Smart railways: technologies and challenges. *Transportation Research Part C*, v. 111, p. 192-209, 2020.