

**IX BRASIL NOS TRILHOS**

**METALIZAÇÃO DE EIXOS FERROVIÁRIOS EM  
VAGÕES DE CARGA: INOVAÇÃO NA  
RECUPERAÇÃO DE EIXOS E DESENVOLVIMENTO  
DE MARCO REGULATÓRIO**

**Raidam Pereira Fernandes, Edilson Jun Kina, Bruno Teixeira Barros**

**VITÓRIA-ES  
2025**

## SUMÁRIO

SUMÁRIO	2
RESUMO	3
ABSTRACT	4
1 INTRODUÇÃO	4
2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROCESSO DE METALIZAÇÃO	4
3 DESENVOLVIMENTO do processo de metalização	5
3.1 IDENTIFICAÇÃO E INSPEÇÃO DO MATERIAL	6
3.2 LIMPEZA E PREPARAÇÃO DOS EIXOS	6
3.3 USINAGEM E PROTEÇÃO DAS MANGAS	6
3.4 DEPOSIÇÃO DO MATERIAL METÁLICO POR ASPERSÃO	7
3.4.1 Pré aquecimento do eixo	7
3.4.2 Tratamento do ar comprimido	7
3.4.3 Ângulo e posição de aplicação dos revestimentos	7
3.4.4 Aplicação das camadas metálicas	7
3.5 RESFRIAMENTO DOS EIXOS METALIZADOS	8
3.6 ACABAMENTO SUPERFICIAL	8
3.7 INSPEÇÃO FINAL DA METALIZAÇÃO	8
4 ESTUDOS DE ENGENHARIA E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO	8
4.1 AVALIAÇÃO DO PERFIL DE USINAGEM DA MANGA	9
4.1.1 Eixo <i>baseline</i> ( sem intervenção)	9
4.1.2 Eixo com <i>groover</i>	10
4.1.3 Eixo com perfil de usinagem	10
4.2 LIMITE DE FADIGA	11
4.3 OTIMIZAÇÃO DO PERFIL DE USINAGEM	12
5 VALIDAÇÃO DO PROCESSO DE METALIZAÇÃO	13
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO	13
5.2 ADERÊNCIA DO REVESTIMENTO NO METAL BASE	14
6 INSPEÇÃO POR ULTRASSOM PHASED ARRAY	16
7 DESENVOLVIMENTO DE REGULAMENTAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA	16
8 CONCLUSÃO	17
9 REFERENCIAS	18

# METALIZAÇÃO DE EIXOS FERROVIÁRIOS EM VAGÕES DE CARGA: INOVAÇÃO NA RECUPERAÇÃO DE EIXOS E DESENVOLVIMENTO DE MARCO REGULATÓRIO

## *METALIZATION OF RAILWAY AXLES IN CARGO WAGONS: INNOVATION IN AXLE REPAIR AND DEVELOPMENT OF REGULATORY FRAMEWORK*

### **RESUMO**

A metalização de mangas de eixos ferroviários é uma solução inovadora que visa restaurar o diâmetro de eixos desgastados devido à montagem e desmontagem de rolamentos, corrosão e atrito, prevenindo assim o sucateamento prematuro desses componentes essenciais. Este processo restaura o eixo às suas dimensões originais, prolongando sua vida útil e reduzindo o impacto ambiental em comparação ao método tradicional aprovado pela AAR, que enfrenta desafios ambientais significativos para operar. Este trabalho também desempenha um papel crucial no suporte ao arcabouço regulatório para o processo no Brasil, formando a base para as normas brasileiras sobre este procedimento, incluindo o estabelecimento de critérios para aprovação de fornecedores e a manutenção do processo de metalização. Esta abordagem não apenas fornece uma solução sustentável e eficiente para a indústria ferroviária, mas também contribui para a padronização e o desenvolvimento da regulamentação brasileira, garantindo a qualidade e a segurança dos eixos recuperados. Os resultados do estudo demonstram que a metalização, combinada com rigorosos processos de inspeção ultrassônica, é uma alternativa viável e ambientalmente consciente para a recuperação de eixos ferroviários, promovendo maior durabilidade e confiabilidade operacional.

**Palavras-chave:** Metalização de eixos; Aspersão térmica; Manutenção preditiva; Material rodante; Inovação.

### **ABSTRACT**

*The metallization of railway axle sleeves is an innovative solution aimed at restoring the diameter of worn ax-les caused by repeated bearing assembly and disassembly, corrosion, and friction, thereby preventing the premature scrapping of these essential components. This process restores the axle to its original dimensions, extending its service life and reducing environmental impact compared to the traditional method approved by the AAR, which faces significant environmental challenges to operate. This work also plays a crucial role in supporting the regulatory framework for the process in Brazil, forming the foundation for national standards related to this procedure,*

*including the establishment of criteria for supplier approval and process control for metallization. This approach not only provides a sustainable and efficient solution for the railway industry but also contributes to the standardization and development of Brazilian regulations, ensuring the quality and safety of recovered axles. The results of the study demonstrate that metallization, combined with rigorous ultrasonic inspection procedures, is a viable and environmentally conscious alternative for railway axle recovery, promoting increased durability and operational reliability.*

**Keywords:** *Axle metallization; Thermal spray; Predictive maintenance; Rolling stock; Innovation.*

## 1 INTRODUÇÃO

A metalização por aspersão térmica tem se mostrado uma alternativa eficaz e sustentável para a recuperação de mangas de eixos ferroviários, com o objetivo de reduzir o índice de sucateamento prematuro desses componentes. O desgaste da região da manga é um fenômeno recorrente, resultante principalmente de processos de *fretting*, corrosão e remoção de material durante as sucessivas montagens e desmontagens dos rolamentos.

O método adotado utiliza a fusão de arame metálico por meio de arco elétrico, sendo o metal fundido projetado em alta velocidade, na forma de partículas, sobre a superfície do eixo por meio de ar comprimido. As partículas fundidas aderem ao material-base, formando uma camada metálica que recompõe as dimensões originais da manga.

Para garantir a segurança operacional e a longevidade da solução, foram conduzidas análises de engenharia que possibilitaram a otimização dos parâmetros do processo, permitindo que cada eixo passe com segurança por até três ciclos de recuperação. Os estudos envolveram ensaios de fadiga, análises de concentração de tensões e simulações computacionais que validaram o comportamento mecânico dos eixos recuperados.

Além disso, foi desenvolvido um sistema de controle de qualidade baseado em inspeção ultrassônica utilizando tecnologia *phased array*, com o objetivo de monitorar a integridade estrutural da camada aplicada e garantir sua adesão ao substrato. O conjunto dessas abordagens assegura a viabilidade técnica e a confiabilidade do processo, promovendo uma solução inovadora para a manutenção de ativos ferroviários críticos.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROCESSO DE METALIZAÇÃO

A metalização por aspersão térmica, no processo conhecido como arco spray, consiste na fusão de dois arames metálicos por meio de um arco elétrico. O metal fundido é pulverizado na forma de partículas incandescentes e propelido por ar comprimido em direção à superfície da peça. As partículas aderem mecanicamente ao substrato, formando um revestimento constituído por lamelas metálicas sobrepostas, sem ocorrência de união metalúrgica entre o revestimento e o material-base. Esse processo é especialmente aplicável à recuperação de eixos ferroviários de vagões de carga, fabricados com aços termicamente tratados do tipo grau F, frequentemente utilizados no setor de transporte de carga pesada. A definição do sistema de revestimento adequado exigiu uma análise metalúrgica detalhada do material-base, com o objetivo de garantir a compatibilidade metalúrgica e mecânica entre o substrato e os materiais aplicados. Os principais critérios

técnicos considerados para a escolha do revestimento foram: ● Aderência mecânica eficaz à superfície do eixo;

- Resistência ao desgaste por atrito e *fretting*;
- Resistência à corrosão em ambientes operacionais agressivos;
- Espessura ideal da camada aplicada, de forma a garantir desempenho sem comprometer a geometria funcional da manga do eixo.

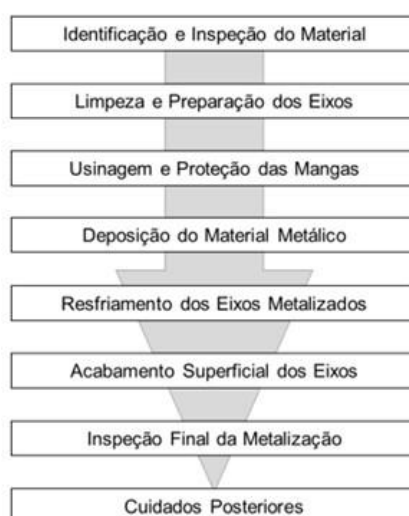
Foram avaliadas diversas combinações de arames metálicos quanto à sua composição química, estrutura metalúrgica e comportamento durante a aplicação. Como resultado, definiu-se o uso de um sistema bi-camada, composto por:

- Camada de aderência: liga de níquel-alumínio (Ni-Al), responsável por promover maior fixação do revestimento ao substrato.
- Camada de revestimento funcional: liga de aço inoxidável martensítico AISI 420, selecionada por sua elevada dureza, resistência ao desgaste e à corrosão, além da estabilidade estrutural após aplicação

### **3 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE METALIZAÇÃO**

O processo de metalização por aspersão térmica, aplicado à recuperação de mangas de eixos ferroviários, é composto por oito etapas sequenciais, conforme ilustrado na Figura 1. A padronização e o controle rigoroso de cada fase são fundamentais para garantir a qualidade do revestimento, a aderência ao substrato e a integridade estrutural da manga do eixo.

Figura 1 - Etapas do processo de metalização



Fonte: ABNT NBR 17204

### 3.1 IDENTIFICAÇÃO E INSPEÇÃO DO MATERIAL

Todos os eixos devem ser identificados com numeração sequencial, de forma a garantir a rastreabilidade ao longo de todas as etapas do processo. A identificação é essencial para o controle de qualidade, rastreamento de não conformidades e histórico de recuperação de cada componente.

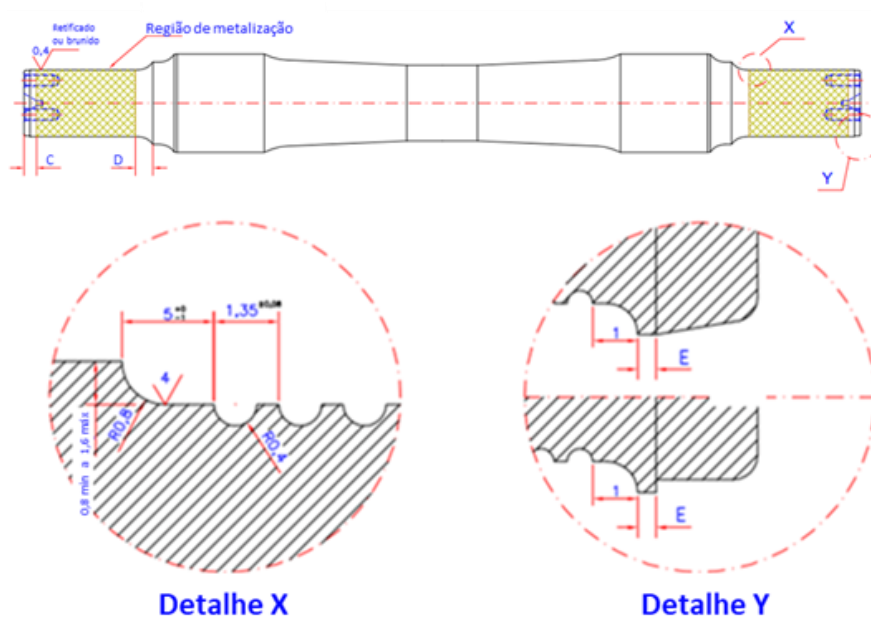
### 3.2 LIMPEZA E PREPARAÇÃO DOS EIXOS

Antes de iniciar o processo, é imprescindível a remoção de quaisquer contaminantes oleosos por meio de limpeza com solventes específicos ou desengraxantes voláteis. Contaminantes remanescentes comprometem a aderência do revestimento, resultando em falhas localizadas na camada depositada. As áreas que não devem receber revestimento metálico devem ser protegidas com verniz isolante apropriado, isento de ativos oleosos.

### 3.3 USINAGEM E PROTEÇÃO DAS MANGAS

A superfície a ser metalizada deve ser previamente usinada em formato de rosca, de forma a aumentar a área de contato e favorecer a ancoragem mecânica das partículas metálicas. A rugosidade resultante também dificulta o cisalhamento das camadas depositadas. A geometria da rosca e os parâmetros de usinagem adotados estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Perfil de rosca da manga para ancoragem do revestimento



Fonte: ABNT NBR 17204

### 3.4 D EPOSIÇÃO DO MATERIAL METÁLICO POR ASPERSÃO

#### 3.4.1 Pré aquecimento do eixo

Antes da aplicação do revestimento, a superfície deve ser preaquecida à temperatura de  $110\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ , durante um período mínimo de 5 minutos. A medição deve ser feita com instrumento calibrado, O pré-aquecimento tem como função eliminar umidade residual e garantir a adesão adequada do revestimento.

#### 3.4.2 Tratamento do ar comprimido

O ar comprimido utilizado para projeção do metal fundido deve estar limpo e seco, conforme especificado na norma ABNT NBR ISO 8573-1, classe mínima [3:4:2].

#### 3.4.3 Ângulo e posição de aplicação dos revestimentos

O revestimento deve ser aplicado em passes controlados e uniformes, iniciando a partir do topo da região usinada. As primeiras camadas devem ser aplicadas a um ângulo de  $45^\circ$ , alternando a direção da aplicação de forma a preencher adequadamente as quinas e a área roscada da manga.

Figura 3 - Aplicação e Preenchimento de áreas de rosca



Fonte: ABNT NBR 17204

#### 3.4.4 Aplicação das camadas metálicas

O processo de deposição é dividido em duas fases:

1. Camada de aderência: aplicação de liga Ni-Al sobre a superfície ainda preaquecida, garantindo aderência à base.
2. Camada funcional: aplicação sucessiva de liga inoxidável martensítica AISI 420, com espessura controlada de  $0,4 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  por camada.

O processo deve gerar um sobremetal controlado, de modo que a espessura final do revestimento permita posterior usinagem para ajuste dimensional. O tempo total de aplicação das camadas não deve ultrapassar 4 horas, a fim de evitar oxidação superficial e contaminação.

#### 3.5 R ESFRIAMENTO DOS EIXOS METALIZADOS

Após a metalização, os eixos devem ser submetidos a resfriamento lento e controlado, evitando a formação de trincas por tensões térmicas. O resfriamento deve ocorrer em ambiente natural, sem ventilação forçada, e com proteção contra intempéries. Recomenda-se a cobertura das mangas com mantas térmicas por um período de 24 horas, até o completo retorno à temperatura ambiente.

#### 3.6 A CABAMENTO SUPERFICIAL

O eixo metalizado deve ser submetido a usinagem e retífica final, visando remover o sobremetal e atingir as dimensões e tolerâncias especificadas. A remoção do excesso deve ser feita até que reste 0,6 mm acima da medida final do diâmetro, em seguida, a manga é retificada ou brunida até atingir a rugosidade superficial especificada.

### 3.7 INSPEÇÃO FINAL DA METALIZAÇÃO

Finalizado o processo, deve-se realizar uma inspeção visual e dimensional completa do revestimento. Serão rejeitados eixos que apresentem:

- Trincas, porosidade excessiva ou delaminações;
- Descascamento do revestimento ou falhas de aderência;
- Ovalizações fora de tolerância ou rugosidade fora da faixa especificada.

Eixos com não conformidades devem ser retrabalhados, reiniciando o ciclo a partir da etapa de usinagem. A rastreabilidade e os registros de inspeção devem ser mantidos para todos os eixos recuperados

## 4 ESTUDOS DE ENGENHARIA E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

A adoção da metalização como técnica de recuperação de eixos ferroviários impõe desafios técnicos que devem ser compreendidos e controlados para garantir a integridade estrutural dos componentes. Como qualquer processo que envolve intervenção em componentes críticos, há riscos associados a alterações geométricas, introdução de concentradores de tensão e potenciais perdas no limite de fadiga do material.

Com o objetivo de mitigar esses riscos, foi conduzido um conjunto de estudos analíticos e computacionais, com foco nos pontos mais sensíveis do processo de recuperação. As análises consideraram geometrias reais de operação, perfis de desgaste, e os efeitos introduzidos pela usinagem necessária à ancoragem do revestimento.

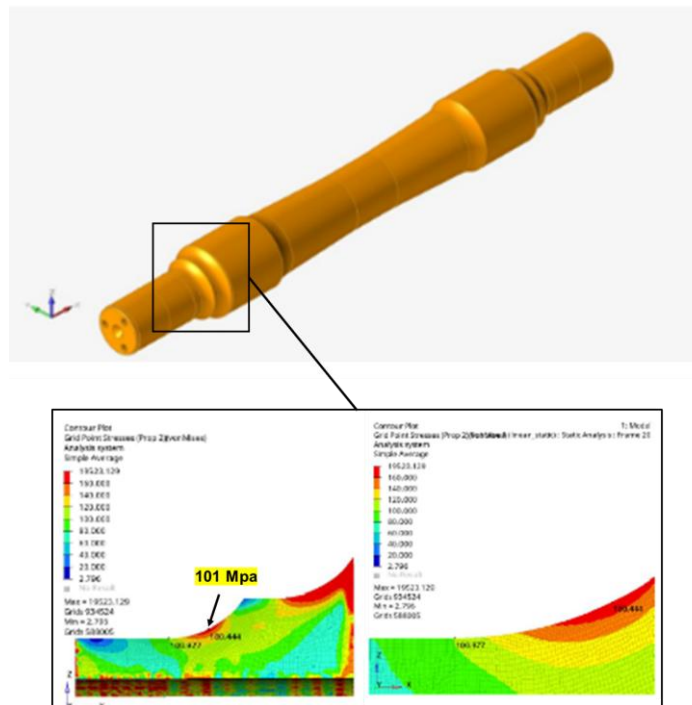
### 4.1 A VALIAÇÃO DO PERFIL DE USINAGEM DA MANGA

A aderência do revestimento da metalização depende diretamente da rugosidade da superfície do metal base, visto a característica de adesão mecânica, essa propriedade é inversamente proporcional ao dano, fadiga do eixo. Ou seja, melhor adesão maior dano (menor limite de fadiga) visto isso, a análise ao perfil a ser usinado é de suma importância, sendo a análise sobre os impactos da geometria do eixo e das usinagens nas zonas críticas, utilizando elementos finitos, ajudou no entendimento se esse dano poderia ou não interferir na vida do eixo.

#### 4.1.1 Eixo *baseline* (sem intervenção)

Como referência inicial, foi modelado um eixo ferroviário padrão, sem nenhum tipo de desgaste ou usinagem, com geometria nominal conforme especificações da AAR para eixos Classe E 6"x11", amplamente utilizados em frotas brasileiras, como a da EFVM. Essa configuração representa o estado original de fabricação, permitindo quantificar os efeitos das intervenções subsequentes.

Figura 4 - Modelo do eixo baseline

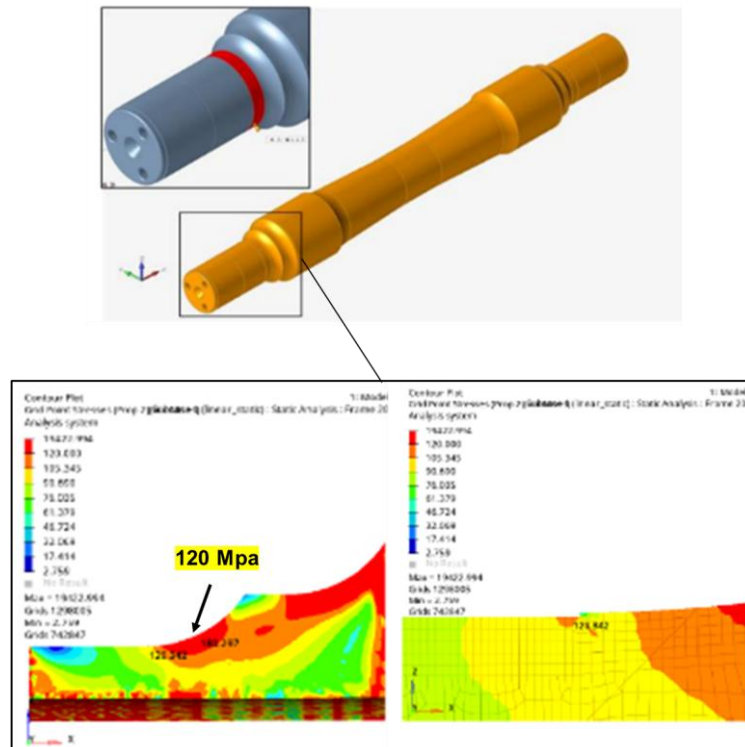


Fonte: Autores (2022)

#### 4.1.2 Eixo com *groover*

Um dos tipos mais recorrentes de desgaste em mangas de eixos ferroviários é a formação de "*grooves*" sulcos causados por movimento relativo e fretting entre o eixo e o rolamento. Para este caso, foi modelada uma geometria com sulco de 0,004" (limite estabelecido pela norma AAR, seção G2). A simulação demonstrou um aumento da tensão local em comparação com o eixo baseline.

Figura 5 - Eixo com desgaste tipo groove

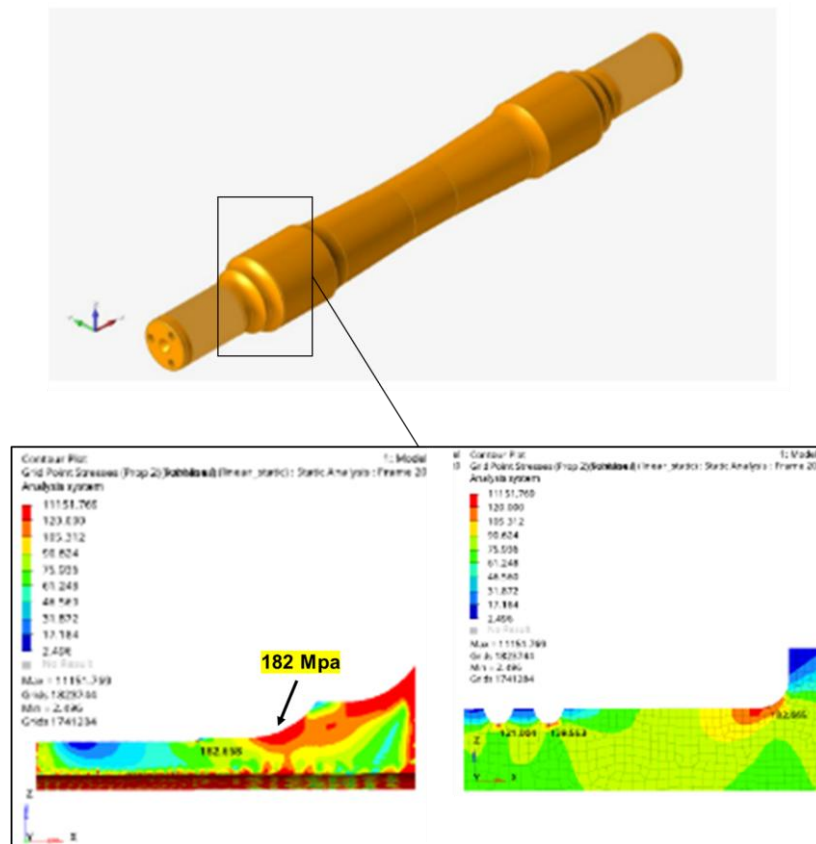


Fonte: Autores (2022)

#### 4.1.3 Eixo com perfil de usinagem

Na terceira análise, foi simulado o eixo com o perfil de usinagem adotado para o processo de metalização (rosca helicoidal), próximo ao raio de concordância da manga, região reconhecida por apresentar tensões máximas. Essa simulação foi essencial para quantificar o impacto estrutural da usinagem de preparação da superfície.

Figura 6 - Eixo com perfil usinado para ancoragem do revestimento

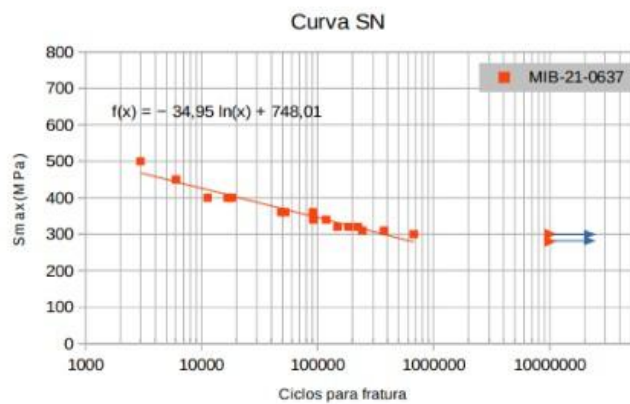


Fonte: Autores (2022)

#### 4.2 LIMITE DE FADIGA

Com base nas tensões obtidas por FEA, foi necessário relacioná-las ao comportamento em fadiga do material. Para isso, foi conduzido ensaio de fadiga por flexão rotativa com o aço do eixo, resultando na curva S-N mostrada na Figura 7.

Figura 7 - Curva S-N do material do eixo



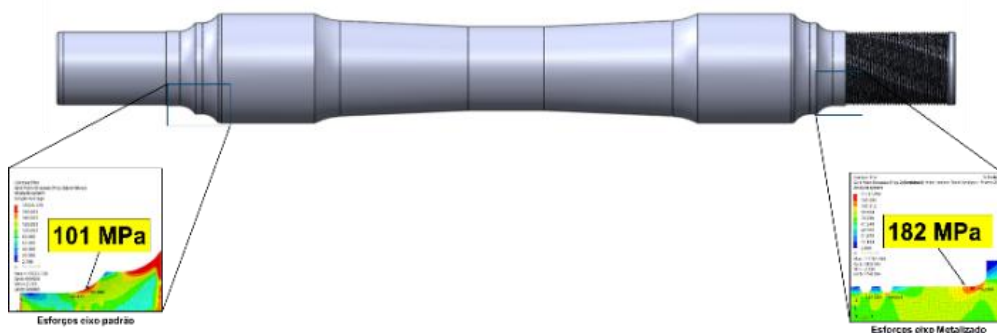
Fonte: Autores (2022)

Os resultados indicaram:

- Tensão nominal no eixo baseline: 101 Mpa; •
- Tensão máxima no perfil com usinagem: 182 Mpa; •
- Limite de fadiga do material: 280 Mpa.

Mesmo no cenário mais crítico, a tensão gerada pelo concentrador do perfil usinado representa 65% do limite de fadiga, resultando em uma margem de segurança de 35%, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Comparativo entre tensões e limite de fadiga



Fonte: Autores (2022)

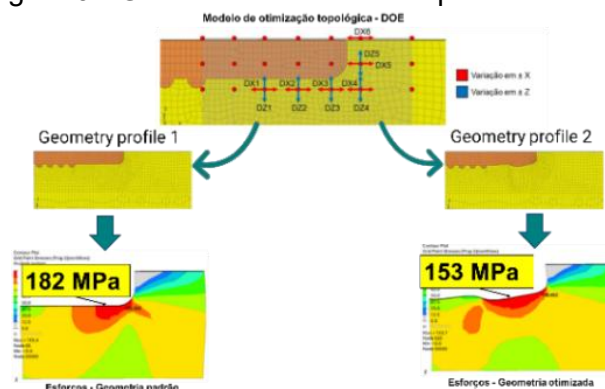
#### 4.3 OTIMIZAÇÃO DO PERFIL DE USINAGEM

Com base nos resultados anteriores, foi proposto um estudo de otimização topológica com o objetivo de reduzir os efeitos de concentração de tensão na região usinada. A geometria otimizada buscou manter a ancoragem necessária ao revestimento, ao mesmo tempo em que suavizar as transições e reduzir descontinuidades críticas.

A nova geometria resultou em:

- Redução da tensão máxima de 182 MPa para 153 Mpa;
- Aumento da margem de segurança para 45% em relação ao limite de fadiga.

Figura 9 - Geometria otimizada do perfil usinado



Fonte: Autores (2022)

## 5 VALIDAÇÃO DO PROCESSO DE METALIZAÇÃO

Para garantir a confiabilidade e repetibilidade do processo de metalização em eixos ferroviários, foi estabelecido um conjunto de critérios técnicos mínimos para homologação de fornecedores e validação do processo. Essa etapa teve como objetivo assegurar que os procedimentos aplicados são capazes de manter o desempenho estrutural dos componentes recuperados, além de permitir a padronização do processo em ambiente industrial.

Os requisitos definidos visam orientar a seleção e aprovação de fornecedores aptos a aplicar o processo de metalização descrito neste trabalho, além de servir como base técnica para futura normatização nacional.

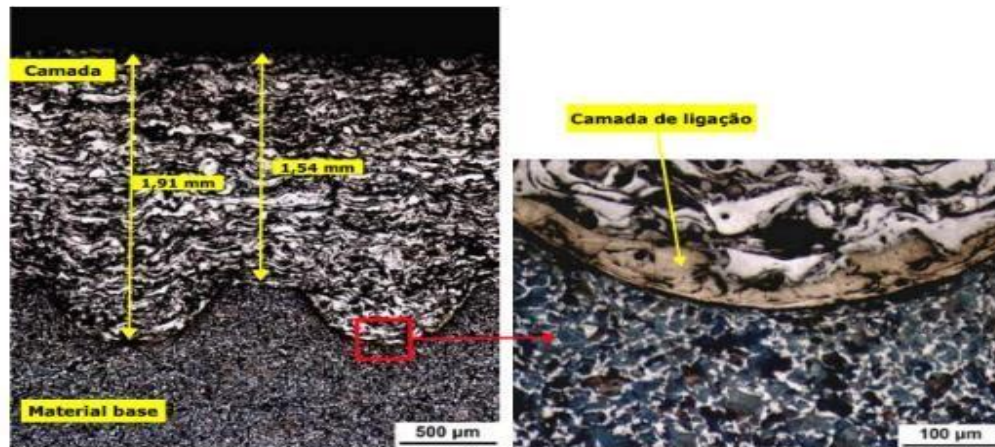
### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO

A caracterização da camada aplicada foi conduzida por meio de análises metalográficas e micrografia óptica, permitindo observar a morfologia da interface entre substrato, camada de aderência e revestimento final.

Através da análise semi-quantitativa de composição química, foi possível confirmar a conformidade das ligas utilizadas com os materiais especificados:

- A camada de aderência apresentou composição compatível com ligas de Níquel-Alumínio (Ni-Al);
- A camada funcional demonstrou microestrutura e composição próximas ao aço inoxidável martensítico AISI 420, conforme especificações.
- Esses resultados confirmam a correta aplicação das ligas metálicas e a integridade do empilhamento multicamada (substrato – liga aderente – revestimento).

Figura 10 - Micrografia da interface metal-base e revestimentos



Fonte: Autores (2022)

## 5.2 A ADERÊNCIA DO REVESTIMENTO NO METAL BASE

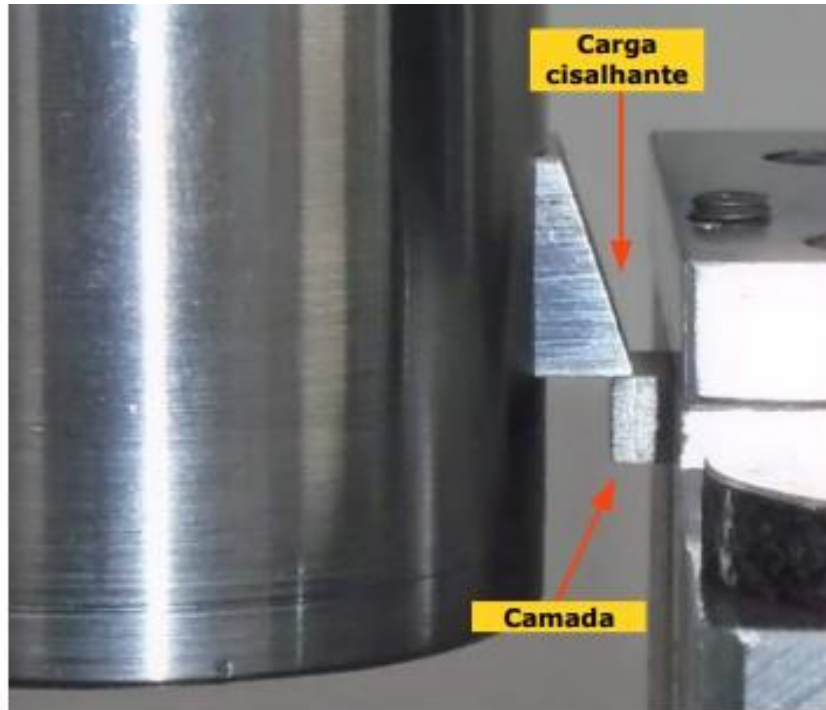
Dado que o processo de aspersão térmica não promove união metalúrgica, mas sim aderência mecânica, é fundamental verificar a resistência da interface entre o revestimento e o substrato.

Para isso, foram desenvolvidos dois ensaios destrutivos complementares:

### 5.2.1 Ensaio de cisalhamento

O ensaio de cisalhamento tem como objetivo medir diretamente a força necessária para romper a aderência entre a camada metalizada e o substrato. A ruptura da interface ocorre pela aplicação de uma carga tangencial sobre a superfície revestida do corpo de prova. Para a validação, é realizado ensaios com três corpos de prova extraídos de eixos recuperados, seguindo as dimensões especificadas para avaliação do revestimento.

Figura 11 - Esquema do ensaio de cisalhamento aplicado ao revestimento



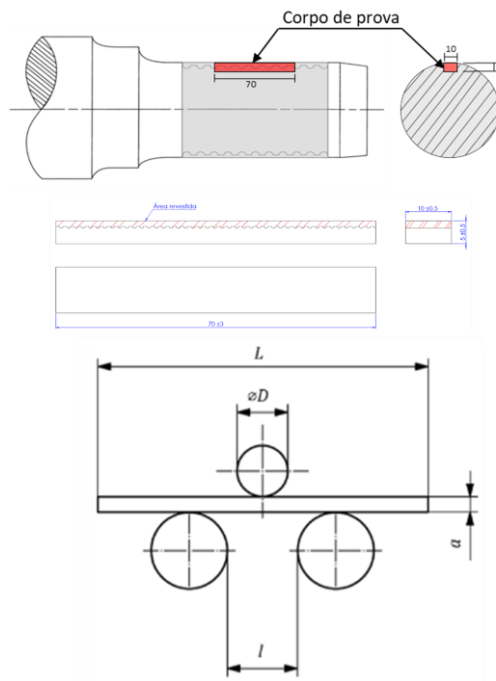
Fonte: ABNT NBR 17204

### 5.2.2 Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento foi desenvolvido com o intuito de avaliar o comportamento do revestimento sob flexão, simulando situações em que tensões de tração atuam diretamente sobre a camada aplicada. O corpo de prova foi apoiado em dois roletes e submetido à flexão por meio de um cutelo central, com a face metalizada posicionada para baixo, forçando a tração sobre o revestimento.

Foram testadas três condições de deflexão:

Figura 12 - Configuração do ensaio de dobramento



Fonte: (Adaptado) ABNT NBR 17204

Com a face metalizada voltada para baixo, de modo que a tração gerada pela flexão atue sobre o revestimento.

Figura 13 - Exemplos de deslocamento por deflexão crescente



Fonte: ABNT NBR 17204

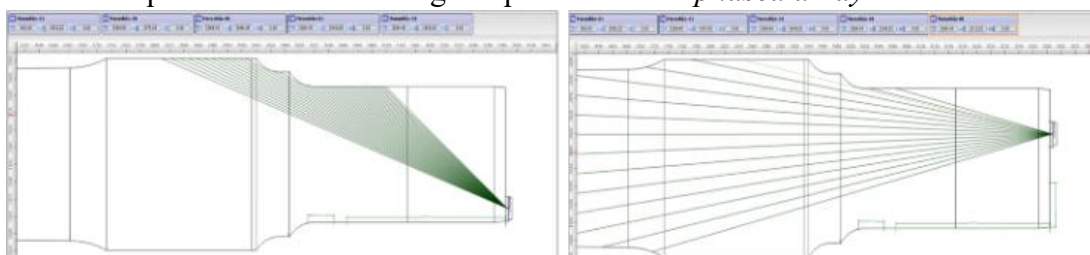
## 6 INSPEÇÃO POR ULTRASSOM PHASED ARRAY

Além dos ensaios destrutivos utilizados para qualificação inicial do processo de metalização, é fundamental a adoção de métodos de inspeção não destrutivos (END) para controle de qualidade em campo e durante a vida útil dos eixos. Nesse contexto, a técnica de ultrassom *phased array* foi empregada como ferramenta principal para inspeção de rotina dos eixos após o processo de recuperação.

A aplicação dessa tecnologia permite identificar falhas relacionadas à usinagem do perfil de ancoragem (como roscas fora da especificação, avanço excessivo ou descontinuidades internas), bem como descontinuidades na camada metalizada e início de trincas por fadiga. A técnica foi adaptada para o contexto específico de eixos metalizados, definindo-se os seguintes parâmetros operacionais:

- Tipo de onda: Longitudinal;
- Cabeçote: 2,25 a 5 MHz;
- Ângulos de varredura por classe de eixo.

Figura 14 - Esquema de varredura angular por ultrassom *phased array* em eixo ferroviário



Fonte: Autores (2022)

Durante inspeções periódicas realizadas nas oficinas de manutenção de roddeiros, o método é utilizado como ferramenta preditiva, permitindo o monitoramento contínuo da integridade estrutural do componente. O uso sistemático dessa técnica contribui para aumentar a confiabilidade da frota, antecipando falhas e evitando danos catastróficos.

## 7 DESENVOLVIMENTO DE REGULAMENTAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA

A consolidação técnica do processo de metalização, aliada ao desenvolvimento de metodologias específicas de ensaio, resultou na estruturação da primeira norma brasileira voltada à recuperação de eixos ferroviários por aspersão térmica. Antes deste trabalho, não existia no Brasil uma regulamentação técnica que definisse critérios mínimos para o revestimento de componentes críticos como eixos ferroviários. Para preencher essa lacuna, foram definidos:

- Procedimentos padronizados para execução da metalização;
- Ensaio destrutivos e não destrutivos para qualificação do processo;
- Critérios mínimos para aprovação de fornecedores e aceitação dos produtos metalizados.

A robustez dos resultados experimentais e a aderência às boas práticas internacionais conferiram base técnica sólida à proposição normativa, hoje em processo de formalização junto à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Essa iniciativa representa um marco regulatório nacional, promovendo:

- Padronização da qualidade;
- Rastreabilidade de processos;
- Redução do sucateamento;
- Sustentabilidade ambiental;
- Alinhamento com as práticas internacionais de segurança e confiabilidade no transporte ferroviário de cargas pesadas.

## 8 CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou o desenvolvimento e validação de um processo inovador para recuperação de eixos ferroviários por metalização, utilizando aspersão térmica com materiais de alto desempenho e técnicas avançadas de controle de qualidade.

Foram apresentados critérios técnicos detalhados para:

- Preparação da superfície (perfil de usinagem);
- Seleção de ligas metálicas;
- Aplicação e acabamento da camada metalizada;
- Qualificação por ensaios destrutivos (cisalhamento e dobramento); ● Inspeção por ultrassom *phased array* em campo.

A combinação de ensaios destrutivos e não destrutivos permitiu validar o desempenho da camada aplicada em termos de aderência, resistência mecânica e integridade estrutural.

Os principais resultados demonstraram:

- Boa aderência mecânica, com tensões cisalhantes;
- Resistência adequada à flexão, com deslocamento controlado;
- Redução significativa nas tensões concentradas por meio da otimização do perfil de usinagem;
- Viabilidade de aplicação em até três ciclos de recuperação por eixo.

Por fim, o trabalho contribuiu de forma decisiva para a criação da primeira norma brasileira para metalização de eixos ferroviários, elevando o nível técnico da manutenção

pesada no setor ferroviário nacional e promovendo maior segurança, sustentabilidade e longevidade dos ativos.

## 9 REFERENCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** ABNT NBR 5565:2022 — Rodeiro ferroviário — Classificação, montagem e manutenção. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** ABNT NBR ISO/IEC 17025 — Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** ABNT NBR ISO 2768 — Tolerâncias gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** ABNT NBR ISO 8573-1 — Ar comprimido — Contaminantes e classes de pureza. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** ASTM E18 — Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2023.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** ASTM E112 — Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocken: ASTM International, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** ASTM E384 — Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2023.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** ASTM E2491:2023 — Guide for Evaluating Performance Characteristics of Phased-Array Ultrasonic Testing Instruments and Systems. West Conshohocken: ASTM International, 2023.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** ASTM C633 — Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG.** DIN EN 15340 — Thermal Spraying — Powders — Chemical and Particle Size Analysis. Berlin: DIN, 2011.
- ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS.** Manual of Standards and Recommended Practices. Washington, D.C.: AAR, 2023.