

Desenvolvimento e Implementação de Cruzeta Conjugada para Vagões Ferroviários de Carga: Projeto, Materiais e Desempenho Dinâmico

Giovanni Auguto Ferreira Dias – VALE/SA

Paulo Sergio Costa – VALE/SA

Herbert Jesus – VALE/SA

Resumo

A Estrada de Ferro Carajás (EFC), operada pela VALE, é uma das maiores e mais exigentes ferrovias de carga do mundo, com trens de até 330 vagões transportando minério de ferro por mais de 890 km. Nessa operação de alta demanda dinâmica, o sistema de engate rotativo é submetido a esforços intensos de tração e compressão, exigindo componentes robustos e confiáveis. Este artigo apresenta o desenvolvimento, validação e homologação da cruzeta conjugada para vagões ferroviários de carga, componente patenteado a partir da união funcional das cruzetas fixa e rotativa do conjunto de choque e tração. A solução foi motivada por falhas recorrentes na cruzeta rotativa, que comprometiam a confiabilidade operacional e a integridade dos lotes de vagões. A cruzeta conjugada foi projetada para manter a dinâmica do sistema de tração, reduzir folgas, evitar quebras e aumentar a vida útil dos componentes adjacentes, como braçadeira, colar e aparelho de choque. Após testes laboratoriais e de campo em vagões tipo Gôndola, com circulação por 675 dias, a cruzeta demonstrou desempenho superior e foi aprovada para uso em operação regular na EFC.

Palavras-chave: cruzeta conjugada, engate ferroviário, simulação estrutural, desempenho operacional

Abstract

The Carajás Railway (EFC), operated by VALE, is one of the largest and most demanding freight railways in the world, with trains of up to 330 gondola cars transporting iron ore over more than 890 kilometers. In this high-demand dynamic operation, the rotary coupler system is subjected to intense traction and compression forces, requiring robust and reliable components. This paper presents the development, validation, and approval of the *conjugated follower* for freight railcars a patented component resulting from the functional integration of the fixed and rotary followers within the draft gear assembly. The solution was driven by recurring failures in the rotary follower, which compromised operational reliability and the integrity of wagon sets. The conjugated follower was designed to preserve the dynamic behavior of the traction system, reduce slack, prevent breakage, and extend the service life of adjacent components such as the yoke, collar, and draft gear. After laboratory and field testing on gondola-type railcars, with 675 days of operation, the follower demonstrated superior performance and was approved for regular use on the EFC.

Keywords: follower, coupler, structural simulation, operational performance

Sumário

Resumo	1
Abstract.....	2
1. Introdução.....	4
2. Revisão bibliográfica	6
3. Metodologia	10
3.1 Diagnóstico de Falhas.....	10
3.2 Projeto e Modelagem:.....	11
3.3 Seleção de Materiais	11
3.4 Validação Experimental.....	12
4. Resultados	13
4.1. Resultados Simulação Elementos Finitos	13
4.2. Resultados Testes Laboratoriais.....	15
4.3. Resultados de Projeção de falhas.....	15
4.4. Resultados do indicador de Desgaste da cruzeta	16
5. Conclusões	17
Referências	18

1. Introdução

A Estrada de Ferro Carajás (EFC), operada pela VALE, é uma das maiores e mais exigentes ferrovias de carga do mundo. Com trens que chegam a 330 vagões tipo Gôndola, cada composição pode atingir 3,5 km de extensão e transportar até 34 mil toneladas de minério de ferro por viagem. Essa operação impõe desafios extremos à confiabilidade dos sistemas mecânicos, especialmente ao conjunto de choque e tração, responsável por transmitir os esforços longitudinais entre os vagões e absorver os impactos dinâmicos durante acelerações, frenagens e variações de velocidade.

O conjunto de choque e tração dos engates rotativos utilizados na EFC é composto por dois tipos de cruzeta: a fixa, que transmite os esforços de tração e compressão diretamente ao aparelho de choque, e a rotativa, que permite o movimento angular do engate, essencial para a negociação de curvas e irregularidades da via.

No entanto, a cruzeta rotativa tem se mostrado um ponto crítico de falha, com quebras recorrentes que geram folgas excessivas, desconfiguração de lotes de vagões e desgaste prematuro de componentes como braçadeiras, colares e amortecedores.

Segundo dados operacionais da VALE, essas falhas impactam diretamente a disponibilidade da frota e a confiabilidade da composição, exigindo intervenções corretivas não programadas e aumentando o custo de manutenção. A literatura técnica reforça essa preocupação: Hungria (2020) destaca que, com o aumento do comprimento e da lotação dos trens, os esforços de tração e compressão se intensificam, exigindo aparelhos de choque e tração (ACT) com maior capacidade de absorção de energia e controle de choques internos.

Estudos internacionais também apontam para a necessidade de evolução dos sistemas de amortecimento ferroviário. Pesquisas publicadas em periódicos como Springer Railway Engineering e IEEE Transactions on Transportation Systems discutem o uso de ACTs híbridos, com amortecimento por fricção e polímeros, e a importância de curvas de desempenho otimizadas para diferentes perfis operacionais. A análise da resposta dinâmica dos ACTs frente a vibrações e impactos oscilatórios é considerada essencial para reduzir a fadiga cíclica e prolongar a vida útil dos componentes.

Apesar dos avanços em materiais e amortecedores, poucas abordagens tratam da integração funcional das cruzetas, que permanecem como elementos críticos em composições longas e pesadas. Diante desse cenário, foi desenvolvido um novo componente: a cruzeta conjugada, uma solução patenteada que unifica as funções das cruzetas fixa e rotativa em um único corpo, com geometria otimizada para suportar os esforços dinâmicos sem comprometer a flexibilidade do engate.

Este artigo tem como objetivo geral apresentar o projeto, os critérios normativos, os ensaios laboratoriais e os resultados de campo da cruzeta conjugada, aplicada em vagões tipo Gôndola da EFC.

A proposta visa demonstrar os ganhos em confiabilidade, padronização e desempenho dinâmico, contribuindo para a evolução dos sistemas de choque e tração ferroviários em operações de alta demanda.

Os resultados obtidos após 675 dias de circulação indicam que a cruzeta conjugada não apresentou nenhuma anomalia estrutural ou funcional, evidenciando sua robustez e eficácia. A solução foi homologada para uso regular e representa um avanço significativo na engenharia ferroviária aplicada à manutenção de ativos.

2. Revisão bibliográfica

Esta seção tem como objetivo apresentar o estado da arte sobre sistemas de choque e tração ferroviários, com foco nas cruzetas fixa e rotativa utilizadas em engates rotativos. São abordadas as principais normas técnicas, equações de desempenho e estudos nacionais e internacionais que fundamentam o desenvolvimento da cruzeta conjugada. A revisão permite contextualizar os desafios operacionais e as soluções existentes, justificando a proposta técnica deste trabalho.

2.1 Funcionamento do Sistema de Choque e Tração Ferroviário

O sistema de choque e tração (ACT) é responsável por transmitir os esforços longitudinais entre os vagões e absorver os impactos dinâmicos gerados durante acelerações, frenagens e variações de velocidade. Em composições esses esforços são amplificados, exigindo componentes com alta capacidade de absorção de energia e resistência à fadiga.

Segundo as normas da *Association of American Railroads (AAR)*, especialmente MSRP Section B e S-III, o ACT é composto por:

- **Mandíbula**
- **Engate**
- **Braçadeira**
- **Colar**
- **Cruzeta Rotativa**
- **Cruzeta Fixa**
- **Aparelho de choque**

O detalhamento da composição dos componentes do sistema de choque e tração é ilustrado na figura 1.

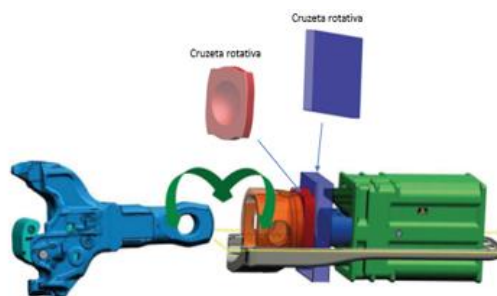


Figura 1. Sistema de Choque e Tração (Fonte: Autor)

A curva de desempenho do ACT é definida pela relação força × deslocamento, obtida por meio de testes de impacto com martelo. Essa curva permite calcular:

Esses parâmetros são essenciais para avaliar a resposta dinâmica do ACT frente aos choques internos gerados na composição ferroviária.

Capacidade de Impacto (C):

$$C = P \cdot h$$

Onde:

- C = capacidade de impacto (J)
- P = peso do martelo (N)
- h = altura da queda (m)

Energia Absorvida (Ea)

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta s}$$

Onde:

- k = rigidez do sistema (N/m)
- ΔF = variação de força (N)
- Δs = variação de deslocamento (m)

Índice de Amortecimento (ζ):

$$\zeta = \frac{\Delta E}{2\pi k x^2}$$

Onde:

- ζ = índice de amortecimento (adimensional)
- ΔE = energia dissipada por ciclo (J)
- k = rigidez (N/m)
- x = amplitude do movimento (m)

2.2 Tipos de ACT

Os ACTs podem ser classificados em:

- **Por fricção:** dissipa energia por atrito seco entre componentes metálicos.
- **Polimérico:** utiliza fluido viscoso para absorção de impactos.
- **Híbrido:** combina fricção e amortecimento viscoso, oferecendo maior versatilidade.

A escolha do ACT ideal depende da massa do trem, perfil da via e frequência dos impactos. Em trens de alta capacidade, ACTs com maior rigidez e menor índice de amortecimento são preferíveis para reduzir o tempo de dissipação de energia. Na Figura 2 temos a Curva força \times deslocamento do aparelho de choque e tração (ACT).

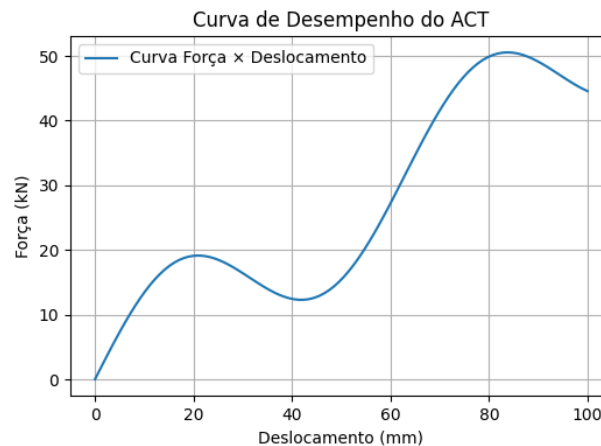


Figura 2 - Curva força \times deslocamento do aparelho de choque e tração (ACT). (Hungria, R. (2020)

2.3 Função da Cruzeta Fixa e Rotativa

A cruzeta fixa é responsável por transmitir os esforços de tração e compressão diretamente ao aparelho de choque. Já a cruzeta rotativa permite o movimento angular do engate, essencial para a negociação de curvas e irregularidades da via. Segundo a norma AAR S-119, a cruzeta deve garantir:

- Intercambiabilidade dimensional
- Resistência à fadiga
- Compatibilidade com o tipo de engate (E ou F)

A cruzeta rotativa, por sua geometria articulada, é mais suscetível a falhas por fadiga e desalinhamento. Estudos como Hungria (2020), Zhou et al. (2019) e Wang & Liu (2021) mostram que a rigidez do sistema e o índice de amortecimento influenciam diretamente na durabilidade da cruzeta.

2.4 Especificação de Materiais para Cruzetas Ferroviárias

A confiabilidade estrutural das cruzetas fixa e rotativa é diretamente influenciada pela seleção adequada dos materiais metálicos utilizados em sua fabricação. Segundo as normas da *Association of American Railroads (AAR)*, especialmente a *MSRP Section B*, os componentes do sistema de choque e tração devem atender a requisitos rigorosos de resistência mecânica, tenacidade e durabilidade frente aos esforços dinâmicos de tração e compressão.

- **MSRP Section B – M-118:** Especifica os requisitos para pinos de engate e componentes de aço ligados à cruzeta, incluindo:
 - Aço tratado termicamente conforme ASTM A29 e A576.
 - Dureza Brinell entre 228 e 429 para pinos de mandíbula.
 - Resistência mínima à tração de 146 ksi e limite de escoamento de 90 ksi.
- **MSRP Section B – M-901B:** Define critérios para acondicionamento de componentes como cruzetas, incluindo inspeção dimensional, tolerâncias, limites de desgaste e requisitos de ensaios não destrutivos.
- **MSRP Section S – Part III:** Detalha os códigos de fundição e especificações para componentes como cruzetas e braçadeiras, exigindo aço fundido ou forjado com propriedades mecânicas compatíveis com aplicações ferroviárias severas.

Critérios de Seleção

A escolha do aço para cruzetas deve considerar:

- **Resistência à fadiga:** devido à carga cíclica em operações de longa duração.
- **Tenacidade:** para absorver impactos sem fratura.
- **Soldabilidade e usinabilidade:** para facilitar manutenção e acondicionamento.
- **Compatibilidade com ensaios não destrutivos:** como partículas magnéticas e ultrassom

Pesquisas recentes reforçam a importância da seleção de materiais para cruzetas em sistemas de engate rotativo:

- **Zhou et al. (2021) – Springer Railway Engineering:** Avaliaram ligas de aço com microestrutura bainítica para componentes de tração, com ganhos em resistência à fadiga.

- **Kim & Lee (2020)** – *IEEE Transactions on Transportation Systems*: Estudaram o comportamento de cruzetas sob cargas dinâmicas simuladas, recomendando aços com limite de escoamento superior a 100 ksi.
- **Li et al. (2022)** – *Journal of Rail and Rapid Transit*: Propuseram o uso de aços com tratamento criogênico para aumentar a tenacidade em ambientes de baixa temperatura.

3. Metodologia

O desenvolvimento da cruzeta conjugada seguiu uma abordagem integrada de engenharia aplicada, combinando análise de falhas, modelagem estrutural, seleção de materiais e validação experimental. A metodologia adotada pode ser dividida em quatro etapas principais, conforme ilustrado na Figura 3.

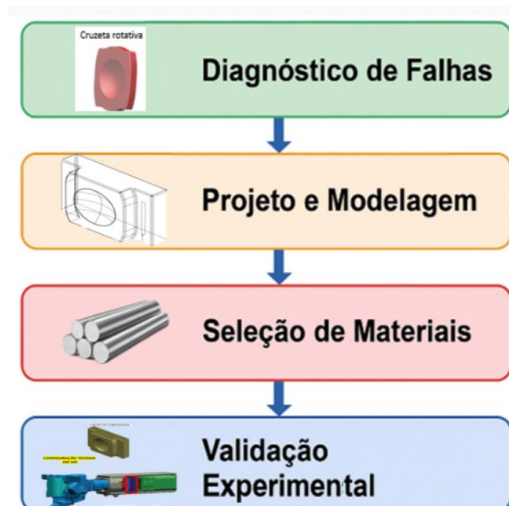


Figura 3 – Metodologia aplicada no Estudo

3.1 Diagnóstico de Falhas

Foi realizada uma análise detalhada das ocorrências de quebra nas cruzetas rotativas em operação na EFC, utilizando dados de manutenção corretiva, inspeções visuais e ensaios não destrutivos. Identificaram-se os principais modos de falha, como trincas por fadiga, desalinhamento e desgaste excessivo.

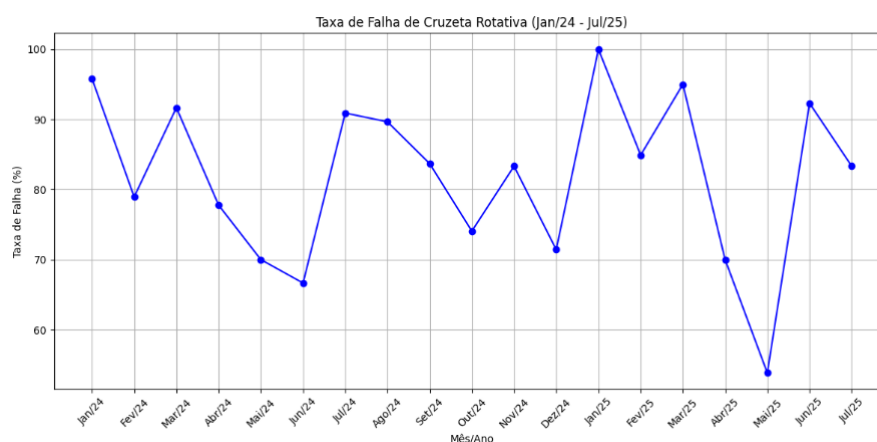


Figura 4- Gráfico da quantidade de falha de cruzetas

3.2 Projeto e Modelagem:

A cruzeta conjugada foi projetada para integrar as funções da cruzeta fixa e rotativa em um único corpo. Utilizou-se modelagem tridimensional em CAD e simulações por elementos finitos (FEA) para validar a geometria quanto à resistência mecânica, rigidez e capacidade de absorção de esforços dinâmicos. A curva força × deslocamento foi mantida dentro dos limites operacionais definidos pelas normas AAR.

Propriedade	Valor Típico	Unidade	Observações
Módulo de Elasticidade (E)	200–210	GPa	Compatível com aços estruturais de alta resistência
Coefficiente de Poisson (ν)	0,29–0,30	—	Valor padrão para aços
Densidade (ρ)	7850	kg/m ³	Aço carbono comum
Limite de escoamento	310–350	MPa	Pode variar conforme o tratamento térmico
Limite de resistência à tração	450–550	MPa	Aumenta com revenimento adequado
Dureza Brinell (HB)	241–311	HB	Pode subir para 200+ em regiões de solda sem alívio de tensão
Energia de impacto (Charpy)	20–30	J	Avaliada em corpos de prova padrão
Fator de segurança recomendado	≥ 2,0	—	Para componentes críticos ferroviários

Figura 5- Dados Técnicos para Simulação de Elementos Finitos

3.3 Seleção de Materiais

A seleção dos materiais para a cruzeta conjugada foi conduzida com base nas diretrizes das normas MSRP Section B e MSRP Section S - Part III da Association of American Railroads (AAR), que estabelecem critérios rigorosos para componentes ferroviários sujeitos a esforços cíclicos e dinâmicos.

Foram escolhidas ligas de aço com elevada resistência à fadiga, boa tenacidade e compatibilidade com técnicas de inspeção por ensaios não destrutivos (END), como ultrassom e partículas magnéticas. Entre os materiais considerados, destaca-se o aço AAR M-201 grau E, amplamente utilizado em aplicações ferroviárias devido à sua robustez e confiabilidade estrutural.

Os materiais selecionados foram submetidos a tratamentos térmicos específicos, como normalização e revenimento, com o objetivo de otimizar suas propriedades mecânicas. A caracterização foi realizada conforme as normas ASTM A29 (barras de aço carbono e liga) e ASTM A576 (barras de aço para uso estrutural), incluindo os seguintes ensaios:

- Dureza Brinell (HB): para avaliar a resistência superficial;
- Ensaio de tração: para determinar o limite de escoamento e resistência à tração;
- Ensaio de impacto Charpy: para verificar a tenacidade em diferentes temperaturas

Para a seleção dos materiais foram seguidos os passos do fluxograma da figura 6



Figura 6. Seleção dos materiais para a construção mecânica

3.4 Validação Experimental

Foram realizados ensaios laboratoriais em bancada, medindo parâmetros como capacidade de impacto, energia absorvida e índice de amortecimento. Conforme Ilustração da Figura 7

Descrição do Indicador	Cruzeta Rotativa	Desempenho esperado para a Cruzeta Conjugada
Análise físico-química e metalográfica de amostras, verificando sanidade, propriedades mecânicas e microestrutura da peça.	Aço fundido AAR-M-211 grau E temperado e revenido dureza BHN 241 a 311	Composição química dentro do especificado. Dureza dentro da faixa especificada.

Figura 7 – Indicadores para Validação Experimental Laboratorial

Em seguida, iniciou-se os testes em campo sendo que a cruzeta conjugada foi instalada em vagões tipo Gôndola e submetida a testes de campo por 675 dias de operação contínua na EFC, monitorando desempenho estrutural e funcional conforme os indicadores ilustrados na figura 8.

Descrição do Indicador	Cruzeta Rotativa	Desempenho esperado para a Cruzeta Conjugada
Desgaste	0,8 mm/mês	0,6 mm/mês
Conformidade dimensional com o desenho de referência.	NA	Todas as tolerâncias adequadas aos desenhos.
Teste de desempenho em vagões. Sendo verificado nível de desgaste.	Desgaste de até 2 mm/ano	Desgaste de até 2 mm/ano
Teste de desempenho em vagões. Sendo verificado fraturas na peça em operação.	Inexistência de trincas no teste de partícula magnética	Inexistência de trincas no teste de partícula magnética

Figura 8 – Indicadores para Validação Experimental em Campo

4. Resultados

Nesta seção, apresentamos os principais resultados obtidos por meio de simulações computacionais, análises laboratoriais e testes em campo. O objetivo é demonstrar o desempenho estrutural e operacional da cruzeta conjugada em aplicações ferroviárias.

4.1. Resultados Simulação Elementos Finitos

A Figura 9 apresenta a geometria da cruzeta conjugada desenvolvida, registrada sob a patente P011498. O modelo foi projetado para integrar as funções de tração rotativa tipo F, com foco em desempenho dinâmico, resistência estrutural e conformidade dimensional. O projeto atende aos requisitos das normas AAR M-201, M-901 e M-921, que regem materiais, processos e desempenho de componentes ferroviários. A configuração geométrica foi desenvolvida com base em modelagem CAD 3D e validada por simulações de elementos finitos. A estrutura foi otimizada para suportar esforços cíclicos e reduzir pontos de concentração de tensão.

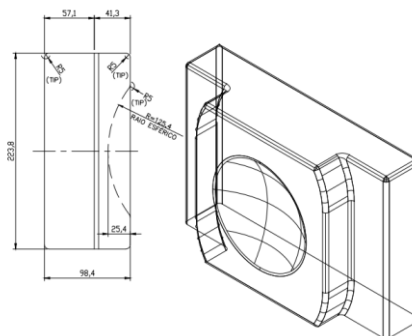


Figura 9. Geometria da Cruzeta conjugada desenvolvida (Patente: P011498)

A configuração atual emprega cruzetas lisa e rotativa, que atuam de forma independente. A nova proposta integra ambas as funções em uma cruzeta conjugada, simplificando o conjunto e reduzindo potenciais pontos de falha. Essa solução também contribui para o aprimoramento do desempenho dinâmico do sistema. A Figura 10 apresenta comparativamente a condição atual e a configuração testada com a cruzeta conjugada.

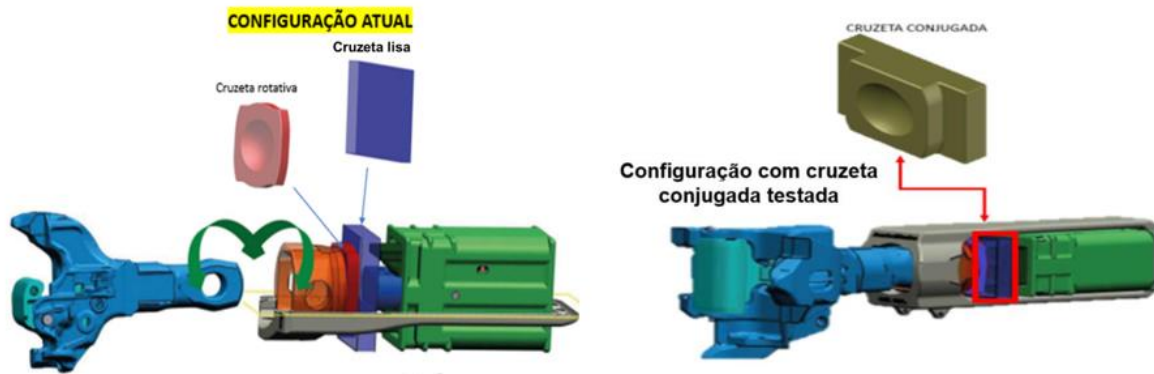


Figura 10. Configuração Proposta

Com base na análise por elementos finitos utilizando o aço AAR M-201 grau E, foram observados deslocamentos estáticos entre 0,002 mm e 0,0002 mm, concentrados em regiões específicas do modelo (ver Figura 11). Esses valores indicam excelente rigidez estrutural e comportamento dentro dos limites operacionais. A escala de distorção aplicada foi de 16.863,1, permitindo melhor visualização das áreas críticas. A análise confirma a viabilidade do projeto da cruzeta conjugada para aplicações ferroviárias.

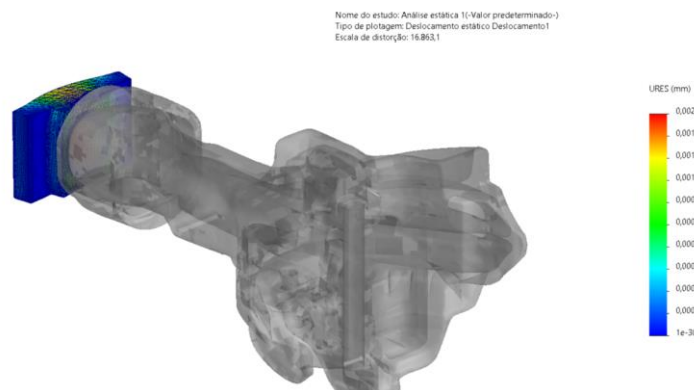


Figura 11. Simulação de Elementos Finitos (Deslocamento)

4.2. Resultados Testes Laboratoriais

Os testes laboratoriais realizados na cruzeta conjugada apresentaram resultados bastante promissores. Fabricada em aço AAR M-201 grau E, a peça passou por validação técnica que incluiu controle da composição química (C: 0,25–0,32%, Mn: 1,40–1,85%, Si: 0,60–1,00%, P: máx. 0,035%, S: máx. 0,035%, Mo: 0,20–0,30%), moldagem por cura a frio, fusão em forno de indução e tratamento térmico (normalização, têmpera e revenimento). Os ensaios confirmaram dureza entre 241 e 311 HB e conformidade dimensional conforme ABNT NBR6645 GTA3. Certificados foram emitidos segundo norma AAR, abrangendo análise química, dureza, partículas magnéticas e propriedades mecânicas.

4.3. Resultados de Projeção de falhas

A partir de maio de 2025, as cruzetas conjugadas passaram a ser instaladas em regime operacional. Com base nos dados de desempenho observados e nas projeções apresentadas no gráfico da Figura 12, estima-se uma redução de até 65% na taxa de falha desses componentes. Essa tendência reflete os ganhos esperados com a adoção do novo projeto, incluindo melhorias estruturais, seleção de materiais mais adequados e validação por simulações e testes em campo.

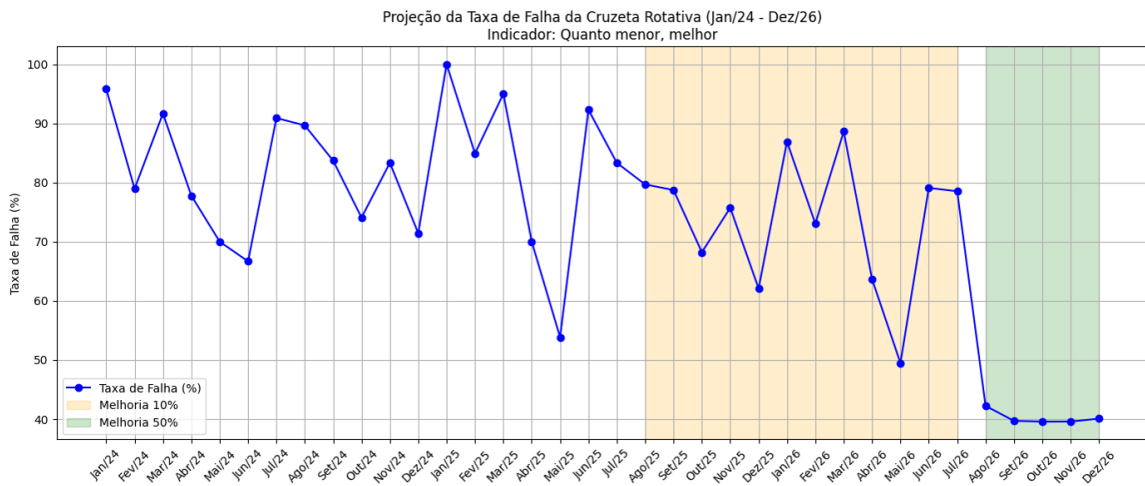


Figura 12 – Projeção de redução das falhas de cruzetas na EFC.

4.4. Resultados do indicador de Desgaste da cruzeta

Durante um período contínuo de 675 dias, cruzetas conjugadas foram colocadas em operação em 10 vagões gôndola do modelo GDT. Essa aplicação prática permitiu a validação em campo da solução proposta, com monitoramento em condições reais de carga e operação. A Figura 13 ilustra os vagões envolvidos e a configuração adotada.

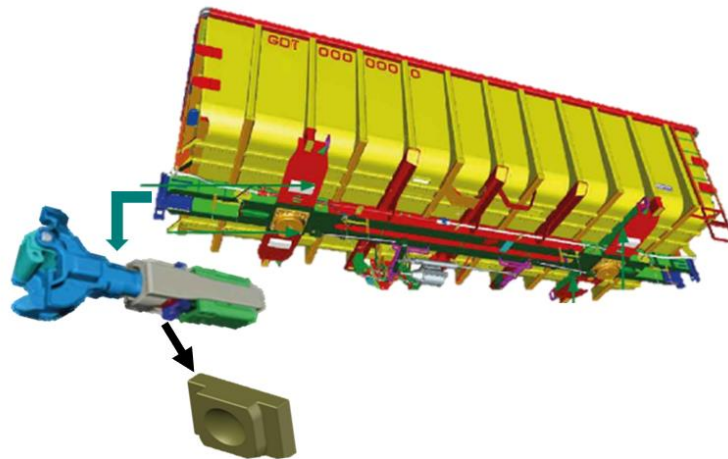


Figura 13 – Configuração de Teste nos vagões GDT

O desgaste esperado era de 0,6 mm, porém, conforme os resultados apresentados na Figura 14, o desgaste real foi de apenas 0,4 mm. Esse desempenho demonstra uma redução significativa em relação à expectativa inicial, evidenciando a eficácia do novo componente. Os resultados obtidos reforçam a consistência do indicador de desgaste e a viabilidade técnica da cruzeta conjugada em operação prolongada.



Figura 14. Medição do Desgaste após 675 dias de operação

5. Conclusões

O desenvolvimento da cruzeta conjugada representa um avanço significativo na engenharia ferroviária voltada para operações de alta demanda, como as realizadas na Estrada de Ferro Carajás. Ao integrar funcionalmente as cruzetas fixa e rotativa em um único componente, o projeto eliminou pontos críticos de falha, reduziu folgas operacionais e aumentou a confiabilidade do sistema de choque e tração.

As simulações por elementos finitos, utilizando o aço AAR M-201 grau E, demonstraram deslocamentos estáticos mínimos (entre 0,002 mm e 0,0002 mm), indicando excelente rigidez estrutural e comportamento dentro dos limites operacionais. Os testes laboratoriais confirmaram conformidade química, dureza entre 241 e 311 HB, e precisão dimensional conforme ABNT NBR6645 GTA3, validando o desempenho do componente frente às exigências normativas AAR M-201, M-901 e M-921.

Após 675 dias de operação em campo, os resultados demonstraram robustez estrutural, estabilidade dinâmica e redução de intervenções corretivas. A taxa de falhas projetada apresentou queda de até 65%, e o desgaste real foi de apenas 0,4 mm, inferior ao valor esperado de 0,6 mm. Esses indicadores reforçam a confiabilidade da solução e sua contribuição direta para a disponibilidade da frota e padronização dos ativos ferroviários.

A homologação da cruzeta conjugada para uso regular consolida sua viabilidade técnica e operacional, estabelecendo um novo patamar de desempenho para componentes críticos de tração. O projeto evidencia a importância da aplicação de critérios normativos rigorosos, da seleção adequada de materiais e da validação experimental em escala real, contribuindo de forma concreta para o avanço dos sistemas ferroviários brasileiros e para o desenvolvimento de soluções inovadoras no setor.

Referências

Hungria, R. (2020). Curva força × deslocamento do aparelho de choque e tração (ACT).

Association of American Railroads (AAR). MSRP Section B – M-118, M-901B; MSRP Section S – Part III.

Zhou et al. (2021). Avaliação de ligas de aço com microestrutura bainítica para componentes de tração. Springer Railway Engineering.

Kim & Lee (2020). Comportamento de cruzetas sob cargas dinâmicas simuladas. IEEE Transactions on Transportation Systems.

Li et al. (2022). Tratamento criogênico para aumento de tenacidade em ambientes de baixa temperatura. Journal of Rail and Rapid Transit.