

**ANÁLISE DOS MECANISMOS DE DESGASTE DOS ROLOS DE TRAÇÃO DO
TORNO SUBTERRÂNEO DE RODAS FERROVIÁRIAS DA ESTRADA DE FERRO
CARAJÁS - EFC**

Josenilson Santos Rocha

São Luís, MA

2025

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise dos mecanismos de desgaste atuantes nos rolos de tração do torno subterrâneo para usinagem de rodeiros de locomotivas na Estrada de Ferro Carajás (EFC). A pesquisa foi motivada pela recorrência de falhas prematuras nesses componentes, comprometendo a disponibilidade dos equipamentos e, conseqüentemente, das locomotivas. A metodologia adotada envolveu revisão bibliográfica, levantamento de dados operacionais, caracterização metalográfica e geométrica dos rolos, além de análise comparativa dos resultados obtidos. Os principais modos de desgaste identificados foram abrasão, fadiga de contato por rolamento (RCF) e delaminação superficial. A análise microestrutural revelou fragilidades no material AISI D3, como distribuição irregular de carbonetos, anisotropia e possível falha no tratamento térmico. Os resultados indicam a necessidade de revisão nos processos de fabricação e tratamento térmico, bem como a adoção de práticas operacionais que minimizem a contaminação do sistema tribológico. O estudo contribui para o aumento da vida útil dos rolos de tração e a melhoria da eficiência operacional da EFC.

Palavras-chave: Tribologia. Desgaste. Rolos de tração. Torno subterrâneo. Aço ferramenta AISI D3. Fadiga de contato por rolamento.

Fase da Cadeia: Ferrovia

ABSTRACT

This work presents an analysis of the wear mechanisms acting on the traction rollers of the underfloor lathe for machining locomotive wheel sets at Estrada de Ferro Carajás (EFC). The research was motivated by the recurrence of premature failures in these components, compromising the availability of the equipment and, consequently, of the locomotives. The adopted methodology involved a literature review, operational data collection, metallographic and geometric characterization of the rollers, and comparative analysis of the results obtained. The main wear modes identified were abrasion, rolling contact fatigue (RCF) and surface delamination. The microstructural analysis revealed weaknesses in the AISI D3 material, such as irregular distribution of carbides, anisotropy and possible failure in the heat treatment. The results indicate the need for reviewing the manufacturing and heat treatment processes, as well

as the adoption of operational practices that minimize contamination of the tribological system. The study contributes to increasing the service life of the traction rollers and improving the operational efficiency of EFC.

Keywords: Tribology. Wear. Traction rolls. Underfloor lathe. AISI D3 tool steel. Rolling contact fatigue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do torno subsolo na linha 182 do pátio São Luís	10
Figura 2 - Representação do carro de rolos	10
Figura 3 - Representação de um rodeiro	11
Figura 4 - Rodeiro ferroviário sobre o torno subsolo.....	12
Figura 5 - Representação do conjunto de acionamento dos rolos	13
Figura 6 - Roda ferroviária posicionada entre os rolos de tração.....	13
Figura 7 - Defletor de cavacos do rolo	14
Figura 8 – Contato do rolo de tração com a roda ferroviária	14
Figura 9 - Par de rolos de tração sob roda ferroviária	15
Figura 10 - Dados de usinagem	16
Figura 11 - Rolo de tração com perfil desgastado (esq.) e perfil novo (dir.)	17
Figura 12 - Verificação de excentricidade do rolo	18
Figura 13 - Representação de tribossistema sob abrasão a dois e três corpos	19
Figura 14 – Representação da roda posicionada sobre os rolos de tração	20
Figura 15 - Análise da microestrutura	22
Figura 16 - Superfície do rolo com presença de sílica (esq.) e debrís (dir.).....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do rolo de tração comparada ao aço ferramenta AISI D3	21
--	-----------

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

EFC – Estrada de Ferro Carajás

GQI – Grinding Quality Index

CMA – Centro de Monitoramento de Ativos

RCF – Rolling Contact Fatigue

DCT - Deep Cryogenic Treatment

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	5
1.1 Objetivo geral.....	6
1.1.1 Objetivos específicos.....	7
2 – REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1 O PROCESSO DE USINAGEM NO TORNO SUBTERRÂNEO	7
2.2 RODEIRO FERROVIÁRIO	9
2.3 ROLOS DE TRACÇÃO	10
2.3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ROLO DE TRACÇÃO.....	12
2.4 ANÁLISE DO DESGASTE	15
2.4.1 MECANISMOS DE DESGASTE	17
3 – METODOLOGIA.....	19
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
5 – CONCLUSÕES.....	22
REFERÊNCIAS	23

1 – INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário no Brasil teve início em 1854, durante o período imperial, com um trecho inicial de apenas 14 km (BATISTA et al., 2012). Desde então, a malha ferroviária nacional evoluiu significativamente em extensão e tecnologia. No entanto, o transporte de grandes cargas sobre trilhos permanece um desafio operacional constante.

O atrito, elemento crítico na indústria em geral, é especialmente relevante no setor ferroviário. Estudado pela tribologia — ciência que analisa a interação entre superfícies em movimento relativo — o atrito entre rodas e trilhos gera efeitos indesejáveis, como desgaste superficial e perdas energéticas, refletidas no consumo excessivo de combustível. A usinagem das rodas também visa corrigir defeitos e restaurar perfis desgastados.

Entre os principais fatores que influenciam o contato roda-trilho estão os perfis geométricos das rodas e trilhos. No caso das rodas ferroviárias, esses perfis são mantidos por meio de usinagem periódica, conforme indicado pelas análises do Centro de Monitoramento de Ativos (CMA).

A Estrada de Ferro Carajás (EFC) desempenha papel estratégico no transporte de minério de ferro, sendo essencial para a economia regional e o escoamento internacional de commodities. A aplicação de práticas tribológicas modernas na EFC pode promover maior eficiência operacional, segurança e sustentabilidade ambiental.

A eficiência energética é um fator-chave, pois o atrito entre rodeiros e trilhos representa uma das principais fontes de perda de energia e custo operacional. Estudos demonstram que técnicas tribológicas avançadas, como lubrificantes de alto desempenho e manutenção dos perfis dos rodeiros, podem reduzir significativamente o consumo de combustíveis fósseis e as emissões de CO₂ (Lewis e Olofsson, 2009).

Com uma frota de mais de 24 mil vagões e 298 locomotivas, operando em um trecho de 992 km, torna-se essencial controlar o atrito para minimizar o desgaste de rodas e trilhos. A usinagem dos rodeiros, realizada em tornos dedicados, restaura os perfis originais ou otimizados, prolongando a vida útil das rodas e aumentando os intervalos entre substituições, com segurança e confiabilidade.

A usinagem é realizada em tornos especiais, que consideram variáveis como diâmetro e largura do friso, respeitando tolerâncias dimensionais críticas. Diferentemente dos vagões, as rodas das locomotivas são usinadas com os rodeiros ainda instalados, visando reduzir o impacto na disponibilidade dos equipamentos.

Na EFC, esse processo é executado em tornos subterrâneos CNC, modelo U2000-400 da Hegenscheidt. Cilindros hidráulicos elevam os rodeiros, enquanto carros de rolos promovem sua rotação para viabilizar a usinagem.

Entretanto, o conjunto de carros de rolos tem apresentado desgaste recorrente em um de seus componentes principais, afetando a disponibilidade dos tornos e, indiretamente, das locomotivas. Diante da frequência crescente desses desgastes, este estudo foi proposto para investigar os tipos e mecanismos envolvidos, visando soluções técnicas eficazes.

1.1 Objetivo geral

Aumentar a vida útil dos rolos de tração do torno subsolo de usinagem de rodeiros de locomotivas por meio de análise dos rolos desgastados, promovendo assim aumento de disponibilidade dos tornos.

1.1.1 Objetivos específicos

- Avaliar os mecanismos de desgastes de rolos de tração usados
- Desenvolver ensaios de simulação estática para avaliação dos esforços sobre o perfil da roda e do rolo – interface rolo-roda;
- Caracterizar o material do rolo
- Caracterizar o material da roda
- Análise detalhada da geometria dos rolos de tração
- Propor alterações de material ou da geometria para aumento da vida útil do conjunto de rolos

2 – REFERENCIAL TEÓRICO

Este estudo foca nos rolos de tração e nas rodas ferroviárias das locomotivas da EFC, com ênfase na interface de contato durante a usinagem. O contato roda-trilho, mesmo em repouso, gera deformações plásticas e desgaste nos perfis, especialmente nas flanges das rodas e nas laterais dos trilhos, variando conforme o tipo de material e localização da via (Sladkowski, 2005).

Falhas de manutenção e lubrificação inadequada intensificam esses efeitos. A tribologia, segundo Peña-Ballesteros (2021), estuda atrito, lubrificação e desgaste entre superfícies em movimento, sendo essencial para evitar paradas produtivas e perdas operacionais (Kuang et al., 2022; Holmberg, 2017).

A escolha adequada dos perfis de rodas e trilhos é fundamental para reduzir o desgaste e otimizar o desempenho (Sladkowski, 2005). Durante a usinagem, ocorre desgaste abrasivo controlado, com remoção de material por pastilhas de metal duro, restaurando o perfil funcional das rodas.

2.1 O PROCESSO DE USINAGEM NO TORNO SUBTERRÂNEO

O torno subterrâneo para rodas ferroviárias é uma aplicação bastante sofisticada de máquina-ferramenta. O seu modo operacional visa minimizar os impactos de manutenção na frota de veículos ferroviários, pois este tipo de torno dispensa a necessidade de desmontagem dos rodeiros do veículo. Desta forma, o torno é normalmente instalado numa linha paralela às linhas de circulação, permitindo que o tempo de indisponibilidade dos veículos ferroviários, para usinagem, seja o menor possível.

O processo de usinagem completo pode ser descrito pelas seguintes etapas:

1. Inserção dos dados do veículo ferroviário;
2. Seleção de fixação/liberação do veículo ferroviário;
3. Medição prévia do rodeiro selecionado;
4. Cálculos para usinagem;
5. Usinagem;
6. Medição posterior.

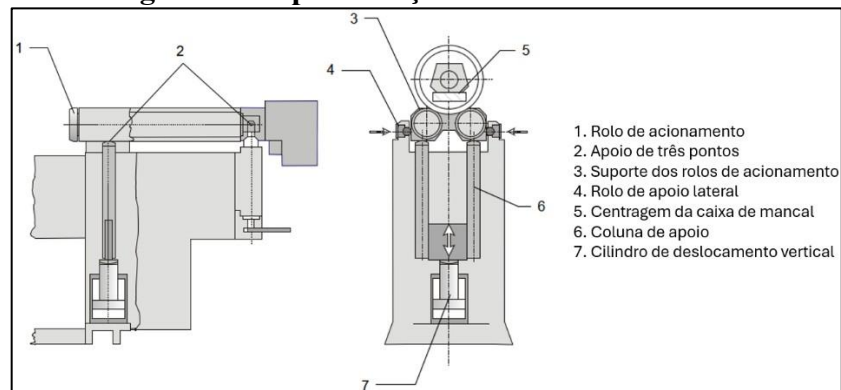
Figura 1 - Localização do torno subsolo na linha 182 do pátio São Luís



Fonte: Google Earth, 2025

Deve-se destacar aqui a importância dos elementos necessários à colocação dos rodeiros em rotação para as etapas de fixação, medição (prévia e posterior) e usinagem. Todo o processo de usinagem, desde a fixação até a liberação de um rodeiro, leva em torno de 65 minutos. Durante a maior parte do tempo necessário ao processo de usinagem, os rolos de tração estão suportando uma carga aproximada de 150 kN em rotação. Adicione-se a isso o fato de as rodas estarem em usinagem, o que produz calor, e as próprias irregularidades do perfil desgastado. Na **Figura 2** é apresentada uma representação esquemática de um carro de rolos de um torno subterrâneo, com destaque para o item rolo de acionamento (1).

Figura 2 - Representação do carro de rolos



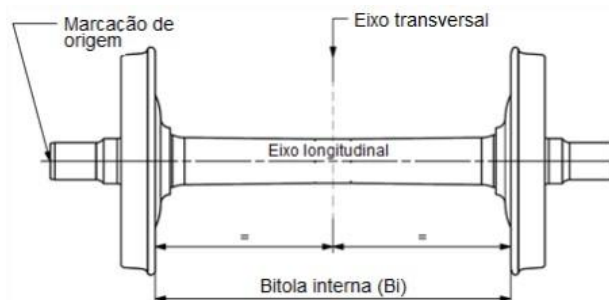
Fonte: Manual do torno subterrâneo U2000-400 - Hegenscheidt

2.2 RODEIRO FERROVIÁRIO

No Brasil, a definição de rodeiro ferroviário está estabelecida principalmente pela norma ABNT NBR 5565:2022. Conforme ilustrado na **Figura 3**, o rodeiro é um componente mecânico responsável por suportar a carga vertical dos veículos metroferroviários, além de garantir seu alinhamento e direcionamento ao longo dos trilhos. Esse alinhamento é obtido pela conicidade das rodas, que são rigidamente fixadas ao eixo, formando o conjunto do rodeiro.

Nas locomotivas, o rodeiro é composto, de forma geral, por um eixo, uma engrenagem, um par de rodas, um par de rolamentos e um motor de tração. No sistema tribológico rodatrilho, o rodeiro representa o corpo, assim como no sistema rolo-roda.

Figura 3 - Representação de um rodeiro



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 5565:2022

Rodeiros e trilhos estão entre os elementos mais críticos para a segurança ferroviária. Variáveis como eficiência energética e custos operacionais estão diretamente ligadas ao desempenho desse conjunto. Perfis geométricos imprecisos de rodas e trilhos aumentam o atrito, gerando custos adicionais e comprometendo a segurança.

Para preservar os perfis ideais e maximizar a vida útil dos ativos, é essencial monitorar continuamente esses componentes ao longo de seu ciclo de vida. Esse monitoramento permite identificar o momento adequado para intervenções corretivas, como:

- Troca do rodeiro, quando o perfil está desgastado e não há material suficiente para usinagem;
- Usinagem do rodeiro, quando ainda é possível reperfilar as rodas.

A usinagem é uma estratégia eficaz de manutenção, pois além de restaurar o perfil ideal das rodas, contribui para a segurança operacional e melhora a eficiência energética. Comparada à substituição completa do rodeiro, a usinagem permite retorno mais rápido à operação.

Na EFC, esse processo é realizado em tornos subterrâneos, onde o veículo ferroviário é posicionado sem necessidade de desmontagem, reduzindo significativamente o tempo de retenção para manutenção.

2.3 ROLOS DE TRACÇÃO

No torno ferroviário subterrâneo, diferente de um torno universal mecânico no qual a peça é rotacionada para usinagem através da placa de fixação de peças, os rodeiros ferroviários são rotacionados apenas pelo atrito existente entre os rolos de tração e o rodeiro. Na **Figura 4** é demonstrada a forma de fixação e acionamento de um rodeiro livre, fora do veículo ferroviário, para usinagem.

Soma-se à força de atrito a carga exercida pela ação da gravidade sobre o rodeiro em contato com os rolos de tração e o esforço adicional aplicados em veículos leves para que sejam mantidos firmes sobre os rolos durante a usinagem. Os rolos de acionamento são elementos que estão expostos a vários tipos de desgaste, principalmente fadiga de contato, desgaste por deslizamento e abrasão.

Além de manterem o rodeiro elevado durante a usinagem, os rolos são ainda os responsáveis por transmitir o torque necessário para que o rodeiro seja colocado em rotação durante a o processo de usinagem.

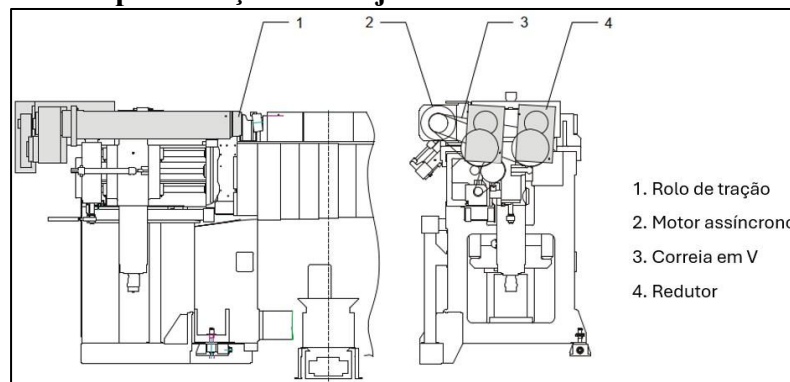
Figura 4 - Rodeiro ferroviário sobre o torno subsolo



Fonte: Acervo técnico da EFC

A **Figura 5** mostra uma representação esquemática do conjunto de acionamento dos rolos de tração (motorização). A carga estimada aplicada sobre cada par de rolos é de 150kN, podendo variar de acordo com a massa e o número de eixos do veículo ferroviário.

Figura 5 - Representação do conjunto de acionamento dos rolos



Fonte: Manual do torno subterrâneo U2000-400 - Hegenscheidt

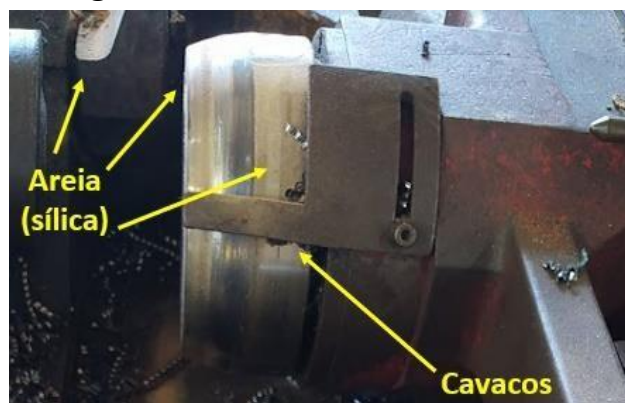
Os rolos de tração operam em ambiente contaminado por resíduos de lubrificação, sílica e cavacos de usinagem. A passagem de cavacos entre rolo e roda pode causar impactos, acionando dispositivos de segurança do torno e comprometendo a produtividade, a segurança e a integridade superficial dos rolos. Esses impactos aceleram o desgaste e reduzem a vida útil dos componentes. Assim, manter o ambiente limpo e garantir o funcionamento eficaz dos defletores de cavacos são medidas simples, porém altamente eficazes, para mitigar o desgaste prematuro. Na **Figura 6** é apresentada uma roda ferroviária posicionada sobre os rolos de tração, destaca-se a modificação do perfil do rolo devido ao desgaste já ocorrido quando se compara com o perfil do rolo na **Figura 7**. Destaca-se ainda a contaminação por sílica, resíduos de lubrificação e cavacos de usinagem presentes em ambos os cenários.

Figura 6 - Roda ferroviária posicionada entre os rolos de tração



Fonte: Acervo técnico da EFC

Figura 7 - Defletor de cavacos do rolo



Fonte: Acervo técnico da EFC

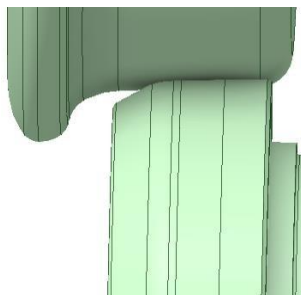
2.3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ROLO DE TRAÇÃO

Atualmente, os rolos de tração utilizados nos tornos ferroviários da EFC são fornecidos diretamente pelo fabricante do equipamento. Um dos objetivos deste estudo é viabilizar a fabricação desses componentes no Brasil, com foco na ampliação de sua vida útil.

Os rolos possuem geometria específica para se adequar ao perfil das rodas ferroviárias e são fabricados com elevada dureza, visando minimizar os desgastes decorrentes do processo de usinagem. Ao analisar o contato entre roda e rolo (**Figura 8**), é inadequado considerar apenas o perfil novo da roda, pois o torno é utilizado para reperfilar rodeiros que já perderam sua

geometria original. Isso implica que os contatos durante a usinagem são, em geral, mais severos do que aqueles observados com perfis novos, devido às deformações acumuladas nas rodas desgastadas.

Figura 8 – Contato do rolo de tração com a roda ferroviária



Fonte: Acervo técnico da EFC

Assim como as rodas ferroviárias, os rolos de tração também sofrem desgaste, o que compromete sua geometria funcional. Por analogia ao sistema roda-trilho, conforme Heldin, Heinrichs e Jacobson (2021), o contato entre metais envolve variáveis complexas como distância percorrida, variação não linear do coeficiente de atrito, rugosidade superficial e presença de lubrificantes ou contaminantes.

É fundamental observar a compatibilidade entre os perfis dos rolos e das rodas, especialmente quanto à inclinação, que deve ser semelhante para garantir o desempenho adequado do sistema tribológico.

Os rolos de tração são fabricados em aço ferramenta AISI D3, de alto carbono e alto cromo, com dureza entre 62 e 64 HRC, conforme ficha técnica. O processo de fabricação inclui alívio de tensões, pré-aquecimento, austenitização e têmpera. O material oferece alta resistência ao desgaste e boa estabilidade térmica, embora com tenacidade moderada, característica típica de aços de elevada dureza. Essa propriedade pode ser melhorada por revenimento adequado.

Durante a operação, os rolos atuam em pares — esquerdo e direito — sustentando o rodeiro ferroviário, geralmente ainda montado no truque do veículo, conforme ilustrado na **Figura 9**.

Figura 9 - Par de rolos de tração sob roda ferroviária




Fonte: Acervo técnico da EFC

O par de rolos de tração trabalha sob carga variável conforme o tipo do veículo ferroviário de aproximadamente 170kN. Como já discutido anteriormente, os rolos são acionados por motores elétricos com velocidade de corte variando entre 40 e 80 m/min, resultando numa rotação de até 115 RPM. Os dados de usinagem são apresentados na **Figura 10**.

Figura 10 - Dados de usinagem

Números de rotação nominais	
Motores:	
Acionamento principal (n_{max}).....	6500 min ⁻¹
Acionamento do avanço.....	3000 min ⁻¹
Motor hidráulico.....	1500 min ⁻¹
Dados de usinagem	
Bitola	1600 mm
Medida do espaço livre/ar.....	1514 - 1520 mm
Comprimentos dos eixos entre as pontas	2600 mm
Maior diâmetro do círculo de medição a ser usinado	1250 mm
Menor diâmetro do círculo de medição a ser usinado	600 mm
Largura do aro da roda.....	130 - 150 mm
Carga máxima sobre o eixo (Máquina).....	400 kN
Carga máxima sobre o eixo (sistema de trilhos).....	400 kN
Velocidade de corte (usinagem de perfil)	40-80 m/min
Velocidade de corte no plano do círculo de medição (usinagem de discos de freio).....	max: 305 m/min
Avanço.....	0-2,5 mm/rot

1.5-4 101 698 pt_br 12/2012 Hegenscheidt  MFD

Fonte: Manual do torno subterrâneo U2000-400 - Hegenscheidt

Considerando os dados de velocidade de corte de 70m/min e avanço de corte de 0,9 mm/rotação, chega-se a um tempo de usinagem de pouco menos de 8 minutos, considerando a largura nominal de uma roda ferroviária de até 145 mm.

2.4 ANÁLISE DO DESGASTE

O desgaste é a remoção de material de superfícies sólidas através de uma ação mecânica e pode ser observado de diversas maneiras, a depender dos materiais das superfícies em contato e do tipo de movimento relativo, do ambiente no qual a interação ocorre, das condições de operação e da presença de partículas ou modificadores de atrito. O regime de desgaste pode ser classificado em leve ou severo (Lewis e Olofsson, 2009).

O desgaste é uma das principais manifestações de falhas em sistema tribológicos, isto é, entre superfícies em contato entre as quais existe movimento relativo e podem ocorrer mesmo em condições lubrificadas (Hutching e Shipway, 2017).

Uma estratégia usada muitas vezes para reduzir o desgaste das superfícies é a elevação da dureza. Embora esta solução não seja eficaz para todos os casos, pois um efeito indesejável da elevação da dureza é a susceptibilidade à falha por fadiga.

Figura 11 - Rolo de tração com perfil desgastado (esq.) e perfil novo (dir.)



Fonte: Acervo técnico da EFC

A partir da observação da **Figura 11**, pode-se notar que houve severa perda de material do rolo. Pelo baixo número de dados o histórico de vida útil dos rolos não pôde ser definido com precisão, mas é possível estimar, através dos parâmetros operacionais do equipamento e de modelos teóricos o quanto de material foi perdido por desgaste. Um exemplo de modelo teórico para o cálculo do volume de material desgastado foi proposto por Archard, através da sua equação de desgaste. Sabendo que o diâmetro inicial do rolo é de 220 mm e que ele pode ser usinado até o diâmetro final de 212 mm, estimar a taxa de desgaste por usinagem poderá informar de modo experimental a vida útil do componente.

Equação 1 - Equação de Archard para o volume desgastado

$$Q = \frac{K \cdot W \cdot L}{H}$$

Onde:

Q: volume desgastado

K: coeficiente de desgaste

W: carga normal

L: distância de deslizamento

H: dureza do material

O manual do torno considera que a excentricidade máxima permitida para os rolos de tração é de 0,1 mm. A fim de monitorar a excentricidade do rolo, recomenda-se periodicamente, medir esta variável, conforme demonstrado na **Figura 12**. A excentricidade pode ser resultado do desgaste da superfície do rolo por abrasão ou adesão. Caso este valor de excentricidade seja identificado, o rolo precisa ser usinado. Portanto, durante a vida útil dos rolos existem dois fatores que influenciam a perda de material:

- a. desgaste natural devido ao uso;
- b. usinagem para restabelecimento do perfil original.

Figura 12 - Verificação de excentricidade do rolo



Fonte: o autor

É fundamental identificar os mecanismos de desgaste que atuam em cada fase do ciclo de vida dos rolos de tração, pois eles variam conforme as condições de operação e manutenção.

Durante a fase de operação, o desgaste natural ocorre principalmente devido à presença de contaminantes no meio interfacial. Esses contaminantes incluem resíduos de usinagem das rodas e partículas de sílica provenientes do sistema de areia das locomotivas, que intensificam o atrito e aceleram a degradação da superfície dos rolos.

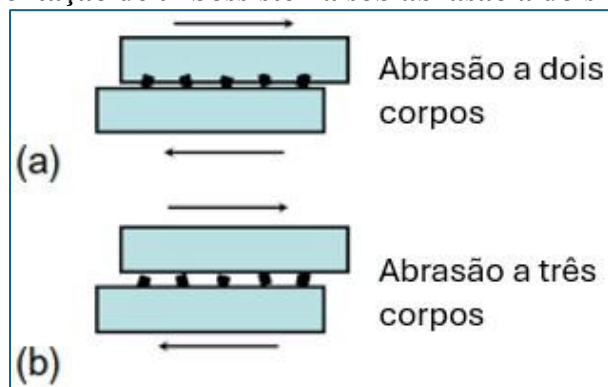
Na fase de manutenção, especificamente durante o reperfilamento da superfície de contato dos rolos, ocorre desgaste por abrasão, provocado pela ação direta da ferramenta de corte. Considerando os valores de perda de volume e massa, é comum que os desgastes nessa etapa sejam mais significativos do que aqueles observados durante a operação regular.

Essa distinção entre os tipos de desgaste em cada fase é essencial para o planejamento adequado da manutenção, a escolha de materiais e tratamentos térmicos, e o desenvolvimento de estratégias que prolonguem a vida útil dos rolos de tração.

2.4.1 MECANISMOS DE DESGASTE

O desgaste abrasivo é classificado em abrasão de dois corpos e abrasão de três corpos. A abrasão a dois corpos ocorre quando um abrasivo está fixo em uma das superfícies entre as quais existe movimento relativo. Enquanto a abrasão a três corpos ocorre quando o desgaste é gerado por partículas que deslizam e rolam livremente entre superfícies do sistema tribológico, o terceiro corpo é resultante do desgaste das superfícies originais ou contaminação do ambiente (meio interfacial). A **Figura 13**, mostra uma representação esquemática dos tipos de abrasão.

Figura 13 - Representação de tribossistema sob abrasão a dois e três corpos



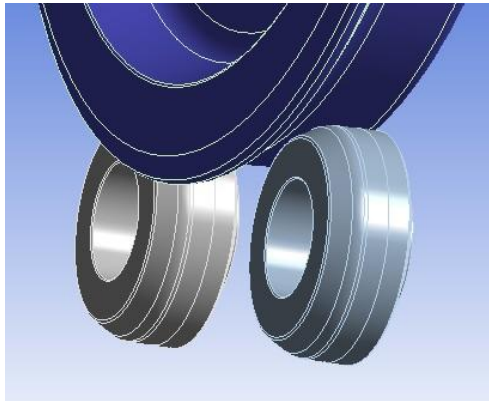
Fonte: Adaptado de Hutchings e Shipway (2017)

A *fadiga de contato por rolamento* (Rolling Contact Fatigue – RCF) é um mecanismo de desgaste que ocorre devido à aplicação repetitiva de cargas cíclicas em contatos rolantes entre componentes mecânicos, como no caso das interações entre rodas e trilhos ferroviários. Esse tipo de desgaste se manifesta pela formação e propagação de trincas superficiais ou

subsuperficiais, causadas pelas elevadas tensões de cisalhamento no ponto de contato e pela repetição dos ciclos de operação (Lewis e Olofsson, 2009).

Para simular o contato entre rolo e roda, um dos modelos mais utilizados é a *Teoria de Hertz*. Embora originalmente não desenvolvida para esse tipo específico de sistema, a teoria fornece uma base útil para análise. Ela propõe que, quando dois corpos convexos entram em contato, forma-se uma área de contato elíptica. No sistema rolo-roda, conforme ilustrado na **Figura 14**, aplica-se a Teoria de Hertz considerando ambos os corpos como cilíndricos com eixos principais paralelos, o que permite estimar tensões de contato e áreas de interação com razoável precisão.

Figura 14 – Representação da roda posicionada sobre os rolos de tração



Fonte: Acervo técnico da EFC

Para os cálculos da área e da pressão de contato rolo/roda, aplica-se a teoria de Hertz com as seguintes considerações: as superfícies em contato são contínuas, o contato é não conforme; as superfícies de baixa rugosidade, as dimensões do contato são pequenas em comparação aos raios de curvatura dos corpos, cada sólido é considerado como um semiespaço elástico; não há atrito entre as superfícies; as deformações que ocorrem são pequenas (Lewis e Olofsson, 2009; Santos e Santos 2004). A máxima pressão de contato, p , é apresentada na **Equação 2**, sendo que P é a força normal, E é o módulo de elasticidade, ν é o coeficiente de Poisson e R é o raio equivalente calculado conforme a **Equação 3**, em que R_1 e R_2 são os raios de contato dos corpos (rolo e roda).

Equação 2 - Máxima pressão de contato

$$p = \sqrt[3]{\frac{3PE^2}{2\pi^3 R^2 (1 - \nu)^2}}$$

Equação 3 - Equação do Raio equivalente

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Entre as principais limitações da teoria de Hertz destaca-se a hipótese de que o contato irá ocorrer partindo de um único ponto de contato. Outra hipótese que também é uma limitação da teoria é de que os raios de curvatura das superfícies são contratantes e são significativamente maiores do que os semieixos da elipse de contato (BOSSO et al., 2016). Com isso, a avaliação das dimensões da área de contato deve ser realizada com cautela, pois elas serão coerentes apenas em casos particulares e idealizados. Em um caso real, devido ao contato roda e trilho, as curvaturas de ambos os corpos variam na largura da área de contato.

3 – METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada em cinco etapas complementares: 1. Revisão bibliográfica sobre tribologia e desgaste em sistemas ferroviários; 2. Levantamento de dados operacionais dos tornos e rolos de tração; 3. Caracterização metalográfica e geométrica dos rolos; 4. Análise comparativa entre dados de campo e parâmetros técnicos; 5. Discussão dos resultados com base nos achados e literatura técnica.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos rolos de tração indicou que o desgaste prematuro está associado a fatores metalúrgicos e operacionais. O material utilizado, aço ferramenta AISI D3, apresentou composição química compatível com as especificações técnicas, incluindo os elementos principais Carbono (C) e Cromo (Cr), responsáveis pela dureza e resistência ao desgaste.

Embora os teores de Manganês (Mn) e Vanádio (V) tenham sido ligeiramente inferiores ao ideal, não comprometeram o desempenho. A baixa presença de Molibdênio (Mo) está de acordo com o comportamento esperado para esse tipo de aço (**Tabela 1**).

Tabela 1 - Composição química do rolo de tração comparada ao aço ferramenta AISI D3

Material	AISI D3/ X210CrW12	Rolo de tração
C	2,00 – 2,35	2,00
Si	≤ 0,60	0,56
Mn	≤ 1,00	0,32
P	≤ 0,03	0,028
S	≤ 0,03	0,001

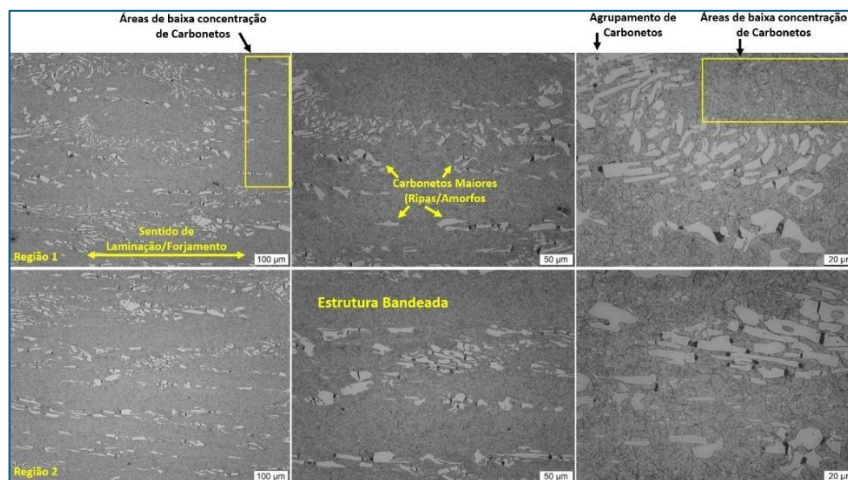
Cr	11,00 – 13,50	11,1
Ni	-	0,22
Mo	-	0,022
V	0,20 máx.	0,028
Cu	-	0,17

Fonte: Acervo técnico da EFC

A análise permitiu determinar a composição percentual dos microconstituintes do material, comparando-os com a especificação nominal do aço AISI D3/DIN 1.2436 (X210CrW12), conforme ficha técnica dos rolos de tração.

Foram identificados carbonetos primários (M_7C_3) e secundários (M_2C , $M_{23}C_6$), além de distribuição heterogênea de carbonetos e presença de bandeamento, conforme pode-se observar na **Figura 15**. A quantificação dos defeitos foi realizada com o software ImageJ, seguindo a norma ASTM E45.

Figura 15 - Análise da microestrutura



Fonte: Acervo técnico da EFC

Segundo Mesquita e Barbosa (2005), os aços da série AISI D, como o D3, apresentam bom desempenho em aplicações que exigem elevada dureza (≈ 60 HRC), devido à sua resistência ao desgaste. A composição química analisada confirma o uso de uma liga com foco em dureza, mas com menor tenacidade — propriedade essencial para componentes sujeitos a impactos, vibrações e cargas cíclicas, como os rolos de tração.

A baixa tenacidade observada justifica a presença de trincas superficiais e subsuperficiais, associadas ao desgaste por *spalling*. Goldenstein & Costa e Silva (2014) reforçam que a

tenacidade é crítica para aços ferramenta de trabalho a frio, pois define a resistência à fratura sob impacto.

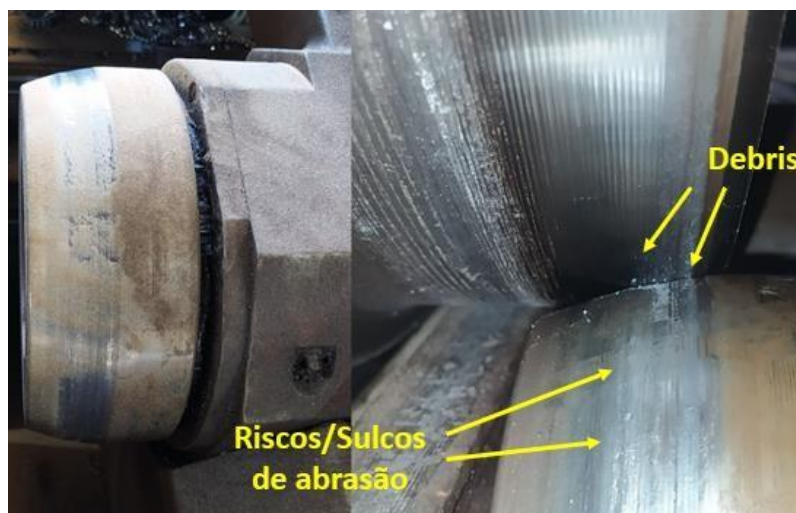
Outro fator relevante é a anisotropia gerada por laminação ou forjamento, que altera as propriedades mecânicas conforme a direção da carga, tornando o material mais suscetível à falha, especialmente quando os carbonetos estão mal orientados (Jesus & Zimmer, 2020).

Além disso, há indícios de fragilização da matriz martensítica, possivelmente causada por revenimento inadequado ou ausência de revenido duplo. Segundo Zeitune (2014), esse problema pode estar ligado à presença de austenita retida e má distribuição de carbonetos, agravada por temperaturas elevadas de austenitização.

Estudos recentes (Khun et al., 2015) indicam que o tratamento criogênico profundo (DCT) pode melhorar significativamente as propriedades do AISI D3, reduzindo a austenita retida, homogeneizando a distribuição de carbonetos e aumentando a dureza.

Somando-se aos fatores metalúrgicos, foram observadas evidências de desgaste abrasivo, indentação por partículas duras (terceiro corpo) e trincas por fadiga de contato por rolamento (RCF), resultando em *spallings* e delaminações. As superfícies dos rolos apresentaram marcas típicas desses mecanismos, conforme análise visual.

Figura 16 - Superfície do rolo com presença de sílica (esq.) e debris (dir.)



Fonte: Acervo técnico da EFC

O desgaste abrasivo ocorre pelo atrito de partículas duras contra superfícies sólidas, sendo intensificado em ambientes agressivos, com presença de particulados dispersos que

facilmente acessam o sistema tribológico das máquinas. Mesmo em superfícies lubrificadas, contaminantes como areia e cavacos podem aderir às zonas de contato, danificando componentes e acelerando falhas. A **Figura 16** ilustra esse cenário, onde o ambiente contaminado contribui diretamente para o desgaste e degradação do tribossistema.

Contaminantes como areia, cavacos e resíduos de lubrificação comprometem o desempenho do tribossistema, mesmo em superfícies lubrificadas.

Os rolos de tração, responsáveis por elevar e girar os rodeiros durante a usinagem, operam em contato direto com as rodas e estão expostos a contaminantes ambientais. Essa condição ativa múltiplos mecanismos de desgaste: partículas sólidas favorecem abrasão; lubrificantes degradados reduzem o coeficiente de atrito, comprometem a transmissão de torque e podem causar *slip*, aquecimento excessivo e desgaste oxidativo (Stachowiak & Batchelor, 1993).

Em situações de lubrificação marginal ou ausente, partículas duras penetram na zona de contato, provocando indentação, aumento de tensões e falha do filme lubrificante, o que leva à formação de trincas, *spallings* e delaminações (Zum Gahr, 1987).

A redução da vida útil dos rolos está associada à combinação de cargas elevadas, contatos não conformes e contaminação por partículas metálicas. Esses fatores intensificam o desgaste por fadiga de contato por rolamento (RCF), especialmente com formação de trincas subsuperficiais e delaminação. Irregularidades superficiais, tensões multiaxiais e presença de *debris* aceleram a degradação do material, mesmo em condições de projeto otimizadas (Sadeghi et al., 2009).

5 – CONCLUSÕES

A metodologia adotada permitiu identificar os principais mecanismos de desgaste no tribossistema rolo de tração/roda ferroviária. A análise química confirmou o uso de aço AISI D3, conforme especificação técnica. No entanto, a microestrutura revelou fragilidades relevantes: distribuição irregular de carbonetos primários, morfologia desfavorável e provável falha no revenimento duplo, comprometendo a tenacidade e resistência ao desgaste.

Também foi observada alta anisotropia, atribuída ao processo de laminação ou forjamento, que reduz a resistência mecânica na direção da carga aplicada. Do ponto de vista operacional, contaminantes como sílica, cavacos e resíduos de lubrificação intensificam os mecanismos de abrasão e fadiga de contato por rolamento, reduzindo a vida útil dos rolos.

Conclui-se que o desgaste prematuro resulta da combinação de fatores metalúrgicos e operacionais. Como recomendações para estudos futuros, destacam-se: Avaliação da geometria dos rolos; Ensaio tribológico do tipo disco contra disco; Investigação de tratamentos térmicos alternativos, como o tratamento criogênico profundo (DCT), visando maior confiabilidade e durabilidade dos componentes.

REFERÊNCIAS

BATISTA, F. A.; BARBOSA, L. S.; GODOY, M. M. **Transportes, modernização e formação regional - Subsídios a história da era ferroviária em Minas Gerais, 1870-1940**. DOI: 10.5212/Rev.Hist.Reg.v.17i1.0007. Revista de História Regional, [S. l.], v. 17, n. 1, 2012. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/rhr/article/view/3538>. Acesso em: 2 abr. 2024.

GOLDENSTEIN, Hélio; SILVA, Arnaldo C. e. **Tenacidade do aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2 – Parte II: Influência do ciclo de tratamento térmico**. ResearchGate, [S.l.], 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267942014>. Acesso em: 17 jun. 2025.

GOOGLE. Google Earth. Imagem de satélite da área localizada em 2°35'44.74"S, 44°19'15.09"O. Disponível em: <https://earth.google.com/>. Acesso em: 24 maio 2025

HELDIN, M; HEINRICHS, J; JACOBSON, S. **On the critical roles of initial plastic deformation and material transfer on the sliding friction between metals**. Wear 477, 2021. DOI 10.1016/j.wear.2021.203853. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203853>. Acesso em: 01 set. 2023.

HOLMBERG, K; ERDEMIR, A. **Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions**. Friction, 2017, v. 5, n. 3, p. 263-284. DOI 10.1007/s40544-017-0183-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>. Acesso em: 01 set. 2023.

HUTCHINGS, Ian M.; SHIPWAY, Philip. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

JESUS, Lucas Pereira de; ZIMMER, Cínthia Gabriely. **Avaliação microestrutural em matriz de aço ferramenta: com e sem falha em serviço**. ScientiaTec: Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFRS, v. 7, n. 1, p. 28–41, Edição Especial 4º Seminário de Pós-Graduação do IFRS, jun. 2020.

KHUN, Nay Win; LIU, Erjia; TAN, Adrian Wei Yee; et al. **Effects of Deep Cryogenic Treatment on Mechanical and Tribological Properties of AISI D3 Tool Steel**. Friction, Springer, v. 3, n. 4, p. 321–330, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40544-015-0089-z>. Acesso em: 25 jun. 2025.

KUANG, W. *et al.* **A short review on the influence of mechanical machining on tribological and wear behavior of components**, International journal of advanced manufacturing technology, 2022, v.120, n. 3, p. 117. DOI 10.1007/s00170-022-08895-w. Disponível em <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08895-w>. Acesso em: 04 set. 2023.

LEWIS, R.; OLOFSSON, U. (Ed.). **Wheel-rail interface handbook**. Boca Raton: CRC Press; Cambridge: Woodhead Publishing, 2009.

MESQUITA, Rafael. A, BARBOSA, Celso. A. **Uma avaliação de desgaste e tenacidade em aços para trabalho a frio**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, 2005, v. 2 n. 2, p. 12-18.

PEÑA-BALLESTEROS, D. Y. **Tribocorrosión: historia, propiedades, aplicaciones y modelamiento**. UIS Ingenierías., v. 20, n. 1, p. 239-244, 2021. DOI 10.18273/revuin.v20n12021020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/5328238>. Acesso em: 01 set. 2023.

SADEGHI, F., JALALAHMADI, B., SLACK, T. S., RAJE, N., & ARAKERE, N. K. (2009). **A Review of Rolling Contact Fatigue**. Journal of Tribology, 131(4), 041403. <https://doi.org/10.1115/1.3209132>

SLADKOWSKI, A; SITARZ, M. **Analysis of wheel–rail interaction using FE software**. Wear 258, 2005, p. 1217 – 1223.

THERMO FISHER SCIENTIFIC. **Quick guide: Spark-Optical Emission Spectrometry (OES)**. [S.l.]: Thermo Fisher Scientific, [2023]. Disponível em:

<https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/posters/OES-PO41283-OES-quickguide.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2025.

XINGGAO, S. *et al.* **Final report development of new wheel profiles for Estrada de Ferro Carajás**. Transportation Technology Center, Inc., 2011.

ZUM GAHR, K.-H. **Wear by hard particles**. Tribology international, 1998, v. 31, n. 10, p.587596. DOI 10.1016/S0301-679X(98)00079-6. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0301679X\(98\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0301679X(98)00079-6). Acessado em: 03 set. 2023.

ZEITUNE, Leonardo Heluany. **Efeito dos Parâmetros de Têmpera e Revenimento na Microestrutura e na Dureza de um Aço Ferramenta para Trabalho a Frio**. 2014. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, 2014.