Unisanta Science and Technology, 2025, 2, December
Published Online 2025 Vol.14 Nº2 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Transportadores de Correia: uma visão geral dos mecanismos de degradação e da confiabilidade operacional

Márcio Adeliano Sarte [1], Bruno Fraga do Sacramento [1], Filipe Ferreira de Rezende [1], Wesleila Gomes Rodrigues [1], Willy Ank de Morais [1]

[1] **UNISANTA** – Universidade Santa Cecília – Faculdade de Engenharia – Pós-graduação em Engenharia da Confiabilidade
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Boqueirão - SANTOS-SP, Brasil - CEP: 11045-100

E-mail: marcio.sarte@hotmail.com
Received Out., 2025

Resumo: As correias transportadoras estão entre os principais sistemas de movimentação de materiais a granel na indústria moderna, sendo amplamente utilizadas nos setores de mineração, siderurgia, construção civil e logística portuária. Apesar de sua elevada eficiência operacional, esses sistemas estão sujeitos a mecanismos de degradação que podem comprometer a confiabilidade, a segurança e a vida útil. Este artigo analisa as principais causas de degradação em correias transportadoras, com ênfase em processos de corrosão em estruturas metálicas, fenômenos tribológicos e práticas de lubrificação, falhas mecânicas associadas à fadiga e à mecânica da fratura, bem como no papel das normas técnicas e dos ensaios laboratoriais aplicados às correias e aos componentes associados. A abordagem adotada combina fundamentos de engenharia com a análise de exemplos industriais práticos, especialmente provenientes de operações de mineração e portuárias. Os resultados demonstram que a degradação decorre da interação entre condições ambientais agressivas, cargas mecânicas cíclicas, práticas inadequadas de manutenção e deficiências de projeto ou inspeção, evidenciando a necessidade de uma abordagem integrada como base para a mitigação de falhas e o aumento da confiabilidade operacional.

Palavras-chave: Transportadores de Correia; Degradação de Equipamentos; Corrosão Atmosférica Industrial; Tribologia e Lubrificação; Confiabilidade Operacional.

Belt Conveyors: an overview of degradation mechanisms and operational reliability

Abstract: Conveyor belts are among the bulk material handling systems in modern industry and are widely used in mining, steelmaking, civil construction, and port logistics. Despite their high operational efficiency, these systems are subject to degradation mechanisms that may compromise reliability, safety, and service life. This article analyzes the primary causes of degradation in conveyor belt systems, with emphasis on corrosion processes in metallic structures, tribological phenomena and lubrication practices, mechanical failures associated with fatigue and fracture mechanics, and the role of technical standards and laboratory testing applied to belts and associated components. The adopted approach combines engineering fundamentals with the analysis of practical industrial examples, particularly from mining and port operations. The results demonstrate that degradation mainly arises from the interaction of aggressive environmental conditions, cyclic mechanical loads, inadequate maintenance practices, and deficiencies in design or inspection, underscoring the need for an integrated approach as a basis for mitigating failures and increasing operational reliability.

Keywords: Belt Conveyors; Equipment Degradation; Industrial Atmospheric Corrosion; Tribology and Lubrication; Operational Reliability.

1. INTRODUÇÃO

Os transportadores de correia estão entre os sistemas de transporte mais utilizados na indústria moderna, em razão de sua versatilidade, confiabilidade e eficiência energética. Esses equipamentos desempenham papel essencial na movimentação contínua de materiais sólidos a granel, sendo amplamente empregados em setores como mineração, siderurgia, construção civil e agronegócio [1]. Sua ampla adoção decorre da capacidade de transportar grandes volumes de material ao longo de longas

Copyright © 2025 ISESC.

distâncias, com baixo custo operacional e manutenção relativamente simples [2]. Um exemplo representativo dessa aplicação em larga escala pode ser observado em instalações portuárias destinadas ao embarque marítimo de granéis minerais, nas quais extensos sistemas de transportadores de correia integram pátios de estocagem, píeres e navios de carga, como ilustrado na Figura 1 [3].

Nos últimos anos, avanços tecnológicos têm impulsionado inovações na concepção e operação desses sistemas, destacando-se a incorporação de sensores inteligentes, sistemas de monitoramento em tempo real e o emprego de materiais de alto desempenho. Essas soluções visam não apenas a redução dos custos de manutenção e o aumento da eficiência energética, mas também o aprimoramento da confiabilidade operacional. Paralelamente, observa-se uma crescente preocupação com a sustentabilidade, estimulando o desenvolvimento de soluções que minimizem o impacto ambiental, como a redução do consumo de energia e o reaproveitamento de materiais [4, 5].

2. TRANSPORTADORES DE CORREIA

A estrutura básica de um transportador de correia compreende uma correia, geralmente fabricada em borracha ou materiais compósitos, sustentada por roletes e acionada por tambores motorizados. Essa configuração confere elevada adaptabilidade às mais diversas demandas industriais, permitindo a movimentação de materiais em terrenos inclinados, bem como a operação em curvas horizontais e verticais, sob diferentes condições ambientais [6].

Entretanto, fatores como inspeções conduzidas com baixo embasamento técnico, descumprimento de normas, desgastes prematuros, lubrificação inadequada, corrosão em estruturas metálicas, desalinhamentos e falhas mecânicas podem representar desafios significativos, comprometendo tanto a eficiência operacional quanto a segurança do sistema.



Figura 1. Vista de um complexo industrial marítimo para embarque de granéis minerais [3].

2.1. Estrutura Metálicas dos Transportadores de Correias

Em um transportador de correia, os elementos estruturais são tão críticos quanto os conjuntos mecânicos, pois garantem a integridade estrutural, o alinhamento geométrico e a segurança operacional sob cargas estáticas e dinâmicas. Vigas, treliças e bases estão diretamente expostas a mecanismos de degradação, em especial à corrosão, a qual compromete progressivamente sua capacidade de cumprir as funções de projeto, afetando a confiabilidade e a vida útil do sistema [7-10], conforme ilustrado nas Figuras 2, 3 e 4.

Assim, a compreensão das funções estruturais, dos esforços atuantes e das boas práticas de projeto, montagem e manutenção torna-se fundamental, em consonância com normas técnicas [11] e práticas consolidadas da engenharia [12, 13].

2.1.1. Vigas

As vigas são elementos estruturais amplamente empregados nos transportadores, estando presentes em estações motrizes, de retorno e de esticamento, bem como em passarelas, suportes de roletes e pórticos. Sua função principal é fornecer suporte local a componentes como roletes, raspadores, calhas, chutes, proteções e passarelas, além de permitir a instalação de dispositivos de segurança. Estruturalmente, as vigas atuam na transferência e distribuição das cargas provenientes do peso próprio da estrutura, do material transportado, dos equipamentos anexos e dos esforços associados à operação, transmitindo essas solicitações para os apoios ou para as treliças principais, conforme princípios clássicos de dimensionamento estrutural [14].

Além disso, as vigas contribuem para o controle de deformações e vibrações do sistema, limitando flechas excessivas que poderiam comprometer o alinhamento da correia, acelerar o desgaste dos roletes ou reduzir a vida útil de emendas e componentes associados. Sob o ponto de vista das solicitações mecânicas, estão predominantemente sujeitas a esforços de flexão e cisalhamento, podendo também sofrer torção em função de cargas excêntricas e estar expostas a cargas dinâmicas decorrentes de impactos, picos de partida e vibrações operacionais [14, 15].

Adicionalmente, ações ambientais como vento, variações térmicas e processos corrosivos podem acelerar a degradação estrutural quando não adequadamente consideradas em projeto e manutenção [7, 8].

Copyright © 2025 ISESC



Figura 2. Exemplos da atuação de processos de corrosão em vigas de apoio de correias transportadoras.

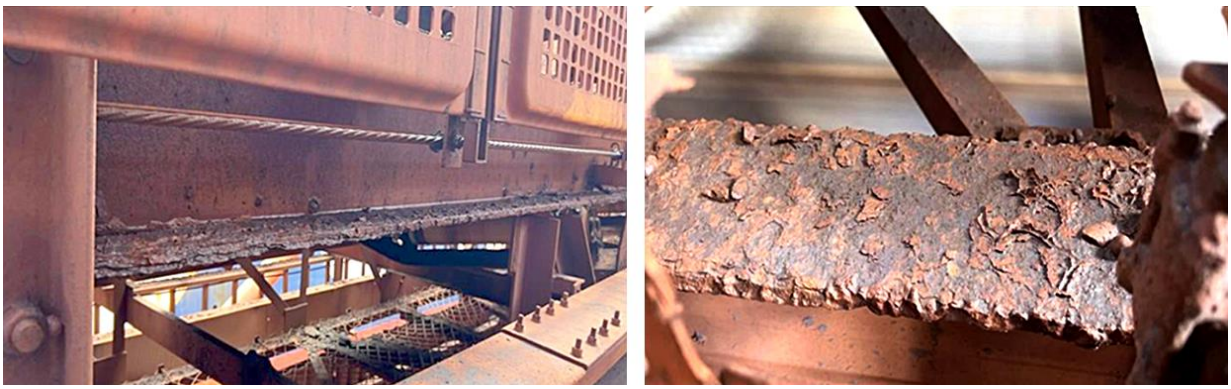


Figura 3. Exemplos de processos de corrosão em treliças de sustentação de correias transportadoras.



Figura 4. Exemplos de processos de corrosão em bases metálicas e obras civis de correias transportadoras.

2.1.2. Treliças

As treliças constituem os principais elementos estruturais responsáveis por sustentar a correia transportadora em grandes vãos, conectando apoios intermediários como pórticos, pilares ou torres. A adoção de configurações trianguladas, como os sistemas Warren, Pratt, K ou similares, permite elevada rigidez estrutural com menor massa quando comparada a vigas maciças equivalentes, característica especialmente relevante em transportadores de grande extensão [14, 15].

Do ponto de vista estrutural, as treliças são projetadas para resistir aos esforços globais de flexão e torção decorrentes do peso próprio, da correia e do material transportado, além de cargas associadas a coberturas, passarelas e ações ambientais, especialmente o vento. Em situações específicas, efeitos térmicos e ações sísmicas podem ser considerados. Cargas excêntricas ao longo do eixo do transportador podem induzir esforços torsionais relevantes, exigindo atenção à geometria da treliça, à rigidez das ligações e ao controle dos deslocamentos globais [11, 14].

Copyright © 2025 ISESC

Além da função estrutural, as treliças frequentemente incorporam sistemas de acesso e proteção, como passarelas, guarda-corpos, corrimãos e coberturas, contribuindo para a segurança operacional e para a manutenção do equipamento. Essas estruturas desempenham ainda papel fundamental na manutenção do alinhamento geométrico do transportador, mantendo a linha da correia dentro de tolerâncias adequadas e reduzindo problemas de rastreamento, desgaste irregular e derramamento de material [12, 13].

Em termos de verificações estruturais, as treliças estão predominantemente sujeitas à flexão no plano vertical e à torção global por cargas excêntricas ou vento lateral, além de deslocamentos horizontais associados às ações ambientais e às variações térmicas. Devem ainda ser avaliados os riscos de flambagem dos elementos comprimidos e o comportamento dinâmico da estrutura, assegurando que as frequências naturais não coincidam com faixas de excitação associadas à operação do sistema [8, 14, 15].

2.1.3. Bases

As bases e fundações dos transportadores de correia, constituídas por elementos como sapatas, blocos, vigas de fundação, estacas e blocos de coroamento, têm a função de transferir as cargas da superestrutura para o solo, assegurando a estabilidade global e o correto desempenho do sistema. Esses elementos são responsáveis pela ancoragem de pórticos, pés-direitos, torres, estações motrizes, de retorno e de esticamento, bem como das bases associadas aos chutes de transferência, desempenhando papel fundamental na segurança estrutural do transportador [11, 12].

Estruturalmente, as bases devem ser dimensionadas para resistir ao peso próprio da estrutura, às cargas provenientes do material transportado e às ações dinâmicas associadas aos regimes de partida e parada do sistema. Devem ainda considerar ações ambientais, como vento, possíveis efeitos sísmicos, impactos localizados em pontos de carregamento e esforços de tração da correia transmitidos por meio da estrutura metálica. A correta distribuição dessas cargas ao terreno é essencial para evitar concentrações excessivas de tensões e garantir a integridade do sistema ao longo de sua vida útil [14].

Outro aspecto crítico relacionado às bases é o controle de recalques e deslocamentos diferenciais, uma vez que variações excessivas podem comprometer o alinhamento geométrico do transportador, afetando o rastreamento da correia, aumentando o desgaste dos componentes e elevando o risco de falhas operacionais. Além disso, as fundações devem apresentar resistência adequada ao arrancamento e ao tombamento, especialmente em regiões sujeitas a ventos intensos ou a carregamentos excêntricos, garantindo a estabilidade do conjunto estrutural em condições normais e extremas de operação [11, 12].

2.2. Sistema de Chutes de Transferência nos Transportadores de Correias

O chute de transferência é um componente essencial dos sistemas de correias transportadoras, atuando como uma estrutura metálica revestida que funciona como um funil ou conduto para guiar materiais sólidos a granel de forma controlada entre correias ou equipamentos de processo. Sua principal função é conduzir o material de maneira estável, minimizando a degradação dos componentes e assegurando que o fluxo ocorra de forma contínua, sem acúmulo ou entupimentos, como exemplificado na Figura 5 [13].

Entretanto, nem todos os chutes de transferência operam de forma satisfatória ao longo de sua vida útil.

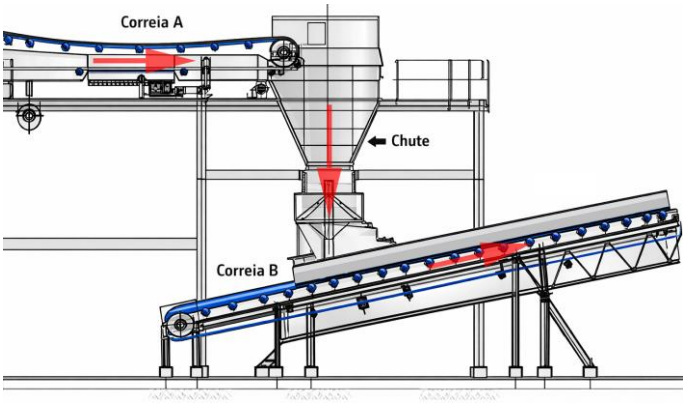


Figura 5. Representação lateral de um sistema de transferência entre duas correias através de chute. Adaptado de GAVI [13].



Figura 6. Estrutura de Chute com processo de corrosão superficial e perda de Massa.

Copyright © 2025 ISESC

Falhas associadas a mecanismos de degradação, como a corrosão das estruturas metálicas e de seus revestimentos, podem comprometer o desempenho do sistema, conforme ilustrado na Figura 6. Tais falhas tendem a se tornar particularmente onerosas em operações de grande escala, nas quais são manuseadas elevadas vazões e grandes volumes de material, como ocorre na mineração.

3. CONFIABILIDADE E DEGRADABILIDADE

3.1. Corrosão em Estruturas Metálicas de Transportadores de Correias

O processo de corrosão que afeta as estruturas metálicas dos transportadores de correia, tais como treliças, chutes, bases e vigas, insere-se no conjunto dos mecanismos de degradação típicos de equipamentos metálicos operando em ambientes industriais agressivos. Nesses sistemas, a corrosão manifesta-se como um processo de deterioração progressiva resultante de reações químicas ou eletroquímicas entre o material estrutural, geralmente metálico, e o meio ao qual está exposto, conduzindo à perda de massa, à alteração das propriedades mecânicas e à redução da vida útil dos componentes [16].

Considerando que o ferro e suas ligas constituem os materiais de construção mecânica mais amplamente empregados na engenharia, os processos corrosivos associados a esses materiais são amplamente conhecidos e estudados. Sob o ponto de vista termodinâmico, a corrosão pode ser compreendida como o processo inverso à metalurgia extrativa, uma vez que promove a oxidação do metal e o conduz a um estado de menor energia livre, conforme ilustrado na Figura 7 [7].

Nesse sentido, os produtos da corrosão apresentam, em geral, composição química semelhante aos minérios dos quais os metais foram originalmente obtidos, como ocorre no caso do ferro, cuja corrosão resulta na formação de óxidos, predominantemente a hematita hidratada ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$), evidenciando o retorno do material a uma condição termodinamicamente mais estável [7, 17].

Do ponto de vista das aplicações de engenharia, a corrosão é um fenômeno indesejável, pois provoca alterações no aspecto, na massa, no volume e nas propriedades dos materiais, podendo comprometer o desempenho e a integridade estrutural de componentes em serviço. Embora em determinados contextos ambientais ou processos industriais específicos a corrosão possa ser explorada de forma controlada, como na formação de filmes protetores ou no tratamento de superfícies, em sistemas de engenharia sua ocorrência representa, predominantemente, um fator de degradação e risco operacional [18].

A atuação da corrosão em materiais e estruturas pode levar à inutilização ou à ruptura de componentes, mesmo quando submetidos a inspeções periódicas, acarretando consequências severas em termos de segurança, impacto ambiental e perdas materiais. Falhas associadas à corrosão podem resultar em vazamentos de substâncias perigosas, contaminação ambiental, comprometimento da qualidade da água e de alimentos, além de danos ao patrimônio histórico e cultural, especialmente em ambientes atmosféricos agressivos.

Sob a perspectiva econômica, os impactos da corrosão são expressivos: estima-se que os custos diretos globais associados a esse fenômeno correspondam a aproximadamente 3% a 3,5% do produto interno bruto (PIB) mundial. Quando considerados os custos indiretos como perdas de produção, redução de eficiência operacional, danos ambientais e riscos à saúde humana, esse valor pode alcançar entre 6% e 7% do PIB global, evidenciando a relevância técnica, econômica e social do controle da corrosão, conforme apresentado nas estimativas econômicas sintetizadas na Figura 8 [19, 20].



Figura 7. Ciclo dos Metais (Metalurgia ↔ Corrosão), adaptado de GENTIL [7].



Figura 8. Estimativas da perda gerada pela corrosão, com base em dados da AMPP/NACE [19, 20].

Copyright © 2025 ISESC

3.2. Tribologia e lubrificação em transportadores de correia

A tribologia é a ciência que estuda a interação entre superfícies em movimento relativo, abrangendo os fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação. Em transportadores de correia, os princípios tribológicos desempenham papel fundamental na otimização do desempenho operacional, na redução do consumo de energia, no aumento da vida útil dos componentes e na minimização dos custos de manutenção, especialmente em elementos como rolamentos, mancais, tambores e engrenagens.

A especificação dos lubrificantes aplicados aos transportadores de correia deve considerar as condições operacionais e os requisitos específicos de cada componente. No caso da seleção de graxas para rolamentos, além do tipo de espessante e das propriedades de desempenho, como estabilidade ao cisalhamento, resistência à oxidação e proteção anticorrosiva, a norma ABNT NBR ISO 283 [21] é amplamente empregada para a definição da viscosidade adequada do óleo básico. De acordo com essa norma, a efetividade do lubrificante está diretamente associada ao grau de separação entre as superfícies de contato rolantes, sendo necessária a formação de uma película lubrificante adequada à temperatura de operação do sistema.

A condição de separação é expressa pela razão de viscosidade κ (adimensional), definida como a razão entre a viscosidade cinemática real do lubrificante na temperatura de operação, ν, e a viscosidade cinemática de referência, ν_1, conforme a relação:

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1} \quad (1)$$

A viscosidade de referência, ν_1 (cSt = 1 mm²/s), pode ser estimada em função da rotação do rolamento (n) e do seu diâmetro primitivo/médio, D_{pw} (mm), permitindo avaliar se o lubrificante selecionado é capaz de promover uma separação adequada das superfícies em contato, conforme estabelecido na ABNT NBR ISO 283 [21].

$$\nu_1 = 45\,000 \cdot (n^{-0,83}) \cdot (D_{pw}^{-0,5}); \text{ se } n < 1000 \text{ RPM} \quad (2)$$

$$\nu_1 = 4\,500 \cdot (n^{-0,50}) \cdot (D_{pw}^{-0,5}); \text{ se } n \geq 1000 \text{ RPM} \quad (3)$$

No caso das graxas lubrificantes, estas podem ser definidas como produtos sólidos a semifluidos resultantes da dispersão de um agente espessante em um óleo lubrificante, sendo o espessante responsável por reter o óleo e liberá-lo gradualmente durante a operação.

A consistência das graxas é classificada pelo *National Lubricating Grease Institute* (NLGI) com base na penetração trabalhada, conforme ilustra a Tabela A [22]. Dos diferentes tipos, a classe NLGI 2 é a mais amplamente utilizada em sistemas de lubrificação centralizada devido ao seu equilíbrio entre bombeabilidade e capacidade de retenção do lubrificante nas superfícies de contato [23].

Tabela A. Classificação NLGI das graxas lubrificantes pela penetração ASTM [22].

Número NLGI	Penetração ASTM (10^{-1} mm)	Aparência em temperatura ambiente
000	445 – 475	Muito fluida
00	400 – 430	Fluida
0	355 – 385	Semifluida
1	310 – 340	Muito macia
2	265 – 295	Macia
3	220 – 250	Dureza média
4	175 – 205	Dura
5	130 – 160	Dureza alta
6	85 – 115	Extremamente dura

3.3. Ensaios laboratoriais em amostras de correias e artefatos de borracha

Os ensaios laboratoriais em amostras de correias, lençóis de borracha e outros artefatos elastoméricos são fundamentais para a avaliação do desempenho em serviço e para a confiabilidade dos transportadores de correia, especialmente no que se refere aos mecanismos de degradação associados à tribologia e à fadiga. A aplicação de normas técnicas padroniza procedimentos, assegura a reprodutibilidade dos resultados e fornece subsídios objetivos para decisões de manutenção e análise de falhas [12, 13].

A adesão entre coberturas e lonas de correias transportadoras com até sete lonas deve ser avaliada conforme o Método B da ISO 252 [24], enquanto a resistência à abrasão das borrachas deve ser determinada segundo o Método A da DIN ISO 4649 [25], com força vertical de 10 N ± 0,2 N. Esses ensaios estão diretamente relacionados ao comportamento tribológico dos materiais e à sua capacidade de resistir ao desgaste imposto pelo contato repetitivo com roletes, tambores e chutes. Para evitar interferências geométricas, recomenda-se a remoção prévia de irregularidades superficiais dos corpos de prova, especialmente em lençóis de borracha texturizados.

Copyright © 2025 ISESC

A preparação adequada das amostras é crítica para a validade dos resultados, devendo atender às geometrias especificadas em normas como a ABNT NBR ISO 283 [21]. Nos ensaios de adesão, a separação inicial das camadas deve restringir-se ao polímero interlaminar, evitando o corte das lonas, de modo a preservar a representatividade do comportamento mecânico do conjunto. Os ensaios devem ser conduzidos em equipamentos calibrados e aferidos por instituições acreditadas pelo Inmetro, e os laudos técnicos devem registrar valores obtidos, normas aplicadas, condições de ensaio e conclusões técnicas relevantes.

Sob a perspectiva da confiabilidade, os resultados desses ensaios fornecem informações essenciais para a compreensão da evolução do dano em correias transportadoras, permitindo correlacionar desgaste, perda de adesão e degradação progressiva das propriedades mecânicas com a nucleação de descontinuidades e a propagação de trincas. Dessa forma, os ensaios laboratoriais constituem um elo direto entre os fenômenos tribológicos e os conceitos da Mecânica da Fratura, auxiliando na avaliação da vida em serviço, na definição de critérios de inspeção e na mitigação de falhas em transportadores de correia [12, 13].

3.4. Mecânica de Fratura empregada na análise de transportadores de correia

A Mecânica da Fratura constitui um campo fundamental da engenharia ao investigar os mecanismos de iniciação e propagação de trincas em componentes submetidos a diferentes regimes de carregamento, permitindo a previsão de falhas e a avaliação da integridade estrutural ao longo da vida em serviço. Diferentemente das abordagens clássicas baseadas exclusivamente em critérios de resistência estática, essa disciplina considera explicitamente a presença de descontinuidades geométricas e metalúrgicas, tornando-se particularmente relevante em sistemas industriais sujeitos a carregamentos cíclicos, solicitações combinadas e ambientes agressivos [26-28].

No contexto dos transportadores de correia, diversos componentes mecânicos — como eixos de tambores, roletes, acoplamentos e elementos de fixação — operam sob condições severas de carregamento, caracterizadas por esforços cíclicos associados à fadiga, além de combinações de torção, flexão e, em alguns casos, cargas axiais. Esses regimes favorecem a nucleação de trincas em regiões de concentração de tensões, como entalhes, chavetas, soldas e transições geométricas, que atuam como pontos preferenciais para o início do dano e sua subsequente propagação até a fratura final [14, 26-28].

A aplicação dos conceitos da Mecânica da Fratura a esses sistemas permite compreender de forma mais precisa os mecanismos de degradação associados à fadiga, ao desgaste e à corrosão, bem como avaliar a influência de defeitos de fabricação, condições operacionais severas e práticas inadequadas de manutenção. Nesse sentido, a análise de falhas baseada em fundamentos da mecânica da fratura configura-se como uma ferramenta de convergência entre conhecimentos metalúrgicos, mecânicos e estruturais, contribuindo para a identificação das causas fundamentais das falhas e para a proposição de medidas corretivas e preventivas mais eficazes [28].

Sob a perspectiva da confiabilidade, essa abordagem fornece subsídios técnicos importantes para a definição de critérios de inspeção, o estabelecimento de intervalos de manutenção e a avaliação da vida remanescente de componentes críticos dos transportadores de correia. Dessa forma, a Mecânica da Fratura assume papel central na mitigação de falhas catastróficas, no aumento da segurança operacional e na melhoria da disponibilidade e do desempenho desses sistemas industriais [26, 27];

4. METODOLOGIA

À luz dos mecanismos de degradação discutidos, envolvendo corrosão estrutural, fenômenos tribológicos, processos de fadiga e conceitos da Mecânica da Fratura, torna-se evidente que a avaliação da confiabilidade dos transportadores de correia requer uma abordagem integrada, capaz de correlacionar observações de campo, ensaios laboratoriais e fundamentos teóricos.

Nesse contexto, a metodologia adotada neste trabalho fundamenta-se na análise sistemática de casos reais de falhas em componentes de transportadores de correia, combinando inspeções visuais e dimensionais, caracterização de materiais, resultados de ensaios normatizados e interpretação dos mecanismos de dano à luz dos princípios da engenharia de materiais e da integridade estrutural. Essa abordagem permite não apenas identificar as causas fundamentais das falhas observadas, mas também estabelecer relações consistentes entre condições operacionais, processos de degradação e desempenho em serviço, fornecendo subsídios técnicos para a mitigação de falhas e o aprimoramento da confiabilidade desses sistemas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A abordagem integrada descrita neste trabalho foi empregada para avaliar os principais mecanismos de degradação que afetam transportadores de correia em um

Copyright © 2025 ISESC

ambiente industrial severo, associado a uma empresa do setor de mineração e logística portuária que será designada aqui como EMPRESA.

5.1. Corrosão

No que se refere às estruturas metálicas (vigas, treliças, bases e chutes), os resultados indicam que a corrosão atmosférica industrial atua como um mecanismo de degradação progressiva, reduzindo a seção resistente dos elementos estruturais e favorecendo a concentração de tensões. Em diversos casos analisados, a perda de material por corrosão foi associada ao desalinhamento do sistema, ao aumento de vibrações e à aceleração do desgaste de componentes mecânicos, comprometendo a confiabilidade operacional do transportador.

A avaliação dos sistemas de chutes de transferência demonstrou que falhas associadas à corrosão estrutural e à degradação de revestimentos internos contribuem significativamente para a instabilidade do fluxo de material, o aumento de impactos localizados e a intensificação dos mecanismos de desgaste. Esses efeitos, quando não mitigados, tendem a elevar os custos de manutenção e a frequência de intervenções corretivas, especialmente em operações de grande porte [18].

5.2. Resultados associados à tribologia, temperatura operacional e seleção de lubrificantes

Os resultados relacionados à tribologia e à lubrificação evidenciaram a importância da seleção adequada de lubrificantes para componentes críticos dos transportadores de correia, como rolamentos e mancais, diretamente associados à confiabilidade operacional do sistema. A aplicação de critérios normativos, em especial aqueles estabelecidos na ABNT NBR ISO 281 [29], permitiu correlacionar a viscosidade do óleo base e a consistência das graxas com a capacidade de formação de uma película lubrificante adequada sob as condições reais de operação.

Como referência prática, foram selecionados os mancais previamente sinalizados pela EMPRSA durante o mês de junho de 2024, os quais apresentaram maior repetibilidade de solicitações de lubrificação. Os conjuntos analisados correspondem aos mancais dos tambores de três correias transportadoras. Em função da indisponibilidade de sensores *Dynamox*® (sensores de *IoT* para monitoramento em tempo real de temperatura) nesses pontos específicos, adotou-se como condição representativa a média de temperatura operacional de aproximadamente 50 °C registrada em um destes mancais, conforme apresentado na Figura 9.

Com base nessa condição térmica, foram realizadas simulações para avaliação da separação de película lubrificante, expressa pela razão de viscosidade κ. Os resultados indicaram valores de κ superiores a 2,5 e inferiores a 5 para os três tambores analisados, caracterizando uma condição adequada de lubrificação hidrodinâmica. Dessa forma, não se verificou a necessidade de alteração da viscosidade do óleo base da graxa atualmente utilizada, de 460 cSt.

Adicionalmente, não foram realizadas simulações com óleos base de viscosidade superior a 460 cSt, uma vez que tal alteração poderia comprometer a bombeabilidade do sistema de lubrificação centralizada, introduzindo um risco operacional não justificado pelos ganhos tribológicos esperados.

Esses resultados reforçam que a integração entre monitoramento térmico, critérios normativos e análise tribológica permite decisões técnicas fundamentadas, evitando intervenções desnecessárias e contribuindo diretamente para a confiabilidade dos transportadores de correia.

No contexto específico das operações da EMPRESA, destaca-se que as graxas empregadas nos mancais utilizam espessante do tipo complexo de sulfonato de cálcio (CSC). Esse tipo de graxa apresenta elevado ponto de gota, excelente resistência à água, elevada estabilidade

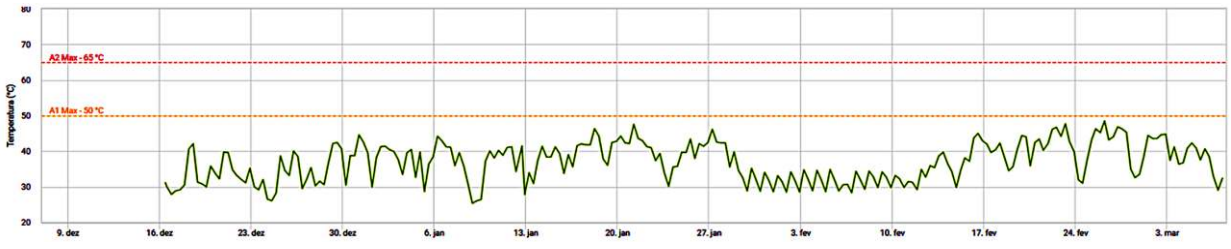


Figura 9. Histórico de temperatura operacional do mancal utilizado como referência para a análise tribológica e sua relação com os níveis de referência A1 e A2 para avaliação tribológica.

Copyright © 2025 ISESC

mecânica e propriedades superiores de proteção contra corrosão, além de bom desempenho sob condições de extrema pressão (EP), características particularmente relevantes em ambientes portuários e marítimos.

Estudos técnicos indicam que graxas CSC exibem baixo desgaste, elevada aderência às superfícies metálicas e maior robustez frente à contaminação por umidade, fatores que contribuem diretamente para o aumento da confiabilidade operacional dos mancais, como apresentado por Sniderman [30]. Assim, a utilização de graxa NLGI 2 com óleo base ISO VG 460 mostra-se não apenas adequada do ponto de vista normativo, mas também coerente com as condições ambientais e operacionais analisadas, corroborando a decisão de manutenção dos parâmetros atualmente adotados.

5.3. Resultados associados aos ensaios laboratoriais nas borrachas

Os ensaios laboratoriais realizados em amostras de correias transportadoras, lençóis de borracha e outros artefatos elastoméricos forneceram subsídios relevantes para a avaliação do desempenho mecânico e da confiabilidade desses materiais em serviço. A execução dos ensaios seguiu rigorosamente os procedimentos estabelecidos pelas normas técnicas aplicáveis, garantindo a rastreabilidade dos resultados e a comparabilidade com critérios industriais consolidados.

No que se refere à caracterização das propriedades das borrachas, os ensaios de adesão entre coberturas e lonas, conduzidos conforme a ISO 252 [24], permitiram verificar a integridade da interface entre os constituintes da correia, aspecto fundamental para a resistência à delaminação sob carregamentos cíclicos. De forma complementar, os ensaios de resistência à abrasão, realizados segundo a DIN ISO 4649 [25], forneceram indicações diretas da capacidade do material em resistir ao desgaste superficial decorrente do contato contínuo com partículas abrasivas, típico das operações de mineração e logística portuária.

Ensaios adicionais, para a determinação da dureza, resistência à tração e alongamento, bem como a verificação de parâmetros geométricos e construtivos, contribuíram para uma avaliação abrangente das propriedades mecânicas e dimensionais dos artefatos ensaiados. No caso de correias com cabos de aço, procedimentos específicos, incluindo a determinação da tensão de arrancamento e a avaliação do afastamento entre cabos, foram realizados conforme normas internacionais aplicáveis conforme sintetizado na Tabela B.

Esses resultados reforçam que a avaliação sistemática das propriedades das borrachas, aliada aos critérios tribológicos e à análise pela mecânica da fratura, constitui uma ferramenta fundamental para a gestão da confiabilidade e para a mitigação de falhas em transportadores de correia.

Tabela B. Procedimentos e normas aplicáveis de ensaios em correias transportadoras e artefatos de borracha.

Procedimento / Ensaio	Norma aplicável
Adesão entre coberturas/lonas e entre lonas	ISO 252
Resistência à abrasão	DIN ISO 4649
Dureza	ASTM D 2240
Ruptura por tração	DIN 22102
Alongamento à tensão de ruptura	ISO 283
Alongamento à tensão admissível	ISO 283
Dimensões (largura, comprimento, espessura total e espessura das coberturas)	DIN 22102
Determinação da tensão de arrancamento de cabo de aço	ISO 7623:1996
Determinação da força de adesão da cobertura para borracha de ligação	ISO 8094
Ensaio de tração longitudinal	ISO 7662-2:1984
Determinação do afastamento entre cabos de aço (*pitch*)	DIN 22131-3:1988

5.4. Análise pela Mecânica de Fratura: um estudo de caso

A incorporação de conceitos da Mecânica da Fratura possibilita interpretar falhas mecânicas recorrentes em componentes como eixos, roletes e elementos de fixação, associando a nucleação e a propagação de trincas a regiões de concentração de tensões, frequentemente agravadas por desgaste, corrosão ou desalinhamentos. Essa abordagem ajuda a demonstrar que defeitos inicialmente subcríticos podem evoluir progressivamente sob carregamentos cíclicos, culminando em fraturas abruptas quando não identificados em estágios iniciais.

Como exemplo representativo da interação entre carregamentos cíclicos, condições operacionais e decisões de manutenção, analisou-se o caso de um extrator de metais, ilustrado na Figura 10, instalado em um transportador de correia da EMPRESA. O transportador

Copyright © 2025 ISESC

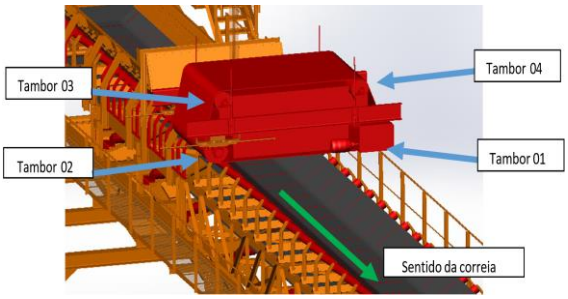


Figura 10. Ilustração do Extrator de Metais e a localização dos mancais dos tambores avaliados.



Figura 11. Aspecto da fratura nos eixos dos tambores 03 e 04 do extrator de metais (Figura 10).

foi projetado para operar a 16.000 t/h, velocidade da correia de 3,6 m/s, comprimento total de 332 m, correia de 84”(2.134 mm) e quatro acionamentos de 1.000 HP.

Durante o período de operação, a análise de vibrações indicou a evolução progressiva de defeitos em rolamentos dos tambores do extrator de metais ilustrado na Figura 10, caracterizados pelo surgimento de componentes espectrais associadas à frequência BPFO *(Ball Pass Frequency Outer Race*), correspondente à passagem das esferas pela pista externa. Com base nesses resultados, foram emitidos laudos recomendando a substituição dos componentes. Contudo, a postergação dessa intervenção contribuiu para a progressão do dano, culminando na fratura dos eixos dos tambores superiores 03 e 04.

As fraturas ocorreram próximas à região de contato com o anel de expansão, especificamente no raio de transição de seção de 55 mm para 50 mm, evidenciando a criticidade geométrica da descontinuidade associada à fixação. A avaliação visual das superfícies fraturadas indicou marcas de praia, típicas de propagação estável sob solicitação cíclica, permitindo concluir que o mecanismo predominante foi fadiga do material, conforme ilustrado na Figura 11.

Em termos de interpretação mecânica, as condições de operação do tambor (peso próprio, tensão de esticamento e a carga de compressão associada ao anel de expansão) são compatíveis com um regime de flexão rotativa, com alternância de tração e compressão ao longo do perímetro do eixo; nesse cenário, a transição de diâmetro atua como concentrador de tensões, coincidindo com a região crítica onde a trinca se iniciou e evoluiu até a ruptura final [28].

Por fim, uma implicação direta desses resultados é que a mitigação de recorrências envolve duas frentes complementares: (i) confiabilidade baseada em condição, reduzindo o tempo entre a detecção (*BPFO*) e a intervenção, e (ii) revisão de projeto/validação (analítica e computacional) do conjunto de eixo e fixação, uma vez que o fornecedor propôs um novo projeto de tambor após a caracterização do modo de falha.

6. CONCLUSÕES

A análise integrada de observações de campo, fundamentos teóricos e ensaios laboratoriais evidenciou que as falhas em transportadores de correia decorrem da interação entre condições ambientais agressivas, solicitações mecânicas cíclicas, processos tribológicos e práticas de manutenção. A corrosão atmosférica industrial mostrou-se um fator relevante na perda de integridade estrutural, favorecendo concentrações de tensões e comprometendo a confiabilidade operacional.

Os resultados associados à tribologia indicaram que a seleção de graxas de consistência NLGI 2 com óleo base ISO VG 460 é compatível com as condições operacionais analisadas e com sistemas de lubrificação centralizada, sem prejuízo à bombeabilidade. A aplicação dos conceitos da Mecânica da Fratura permitiu compreender a evolução de defeitos subcríticos até a fratura final em componentes como eixos e tambores, evidenciando os riscos da postergação de intervenções recomendadas.

De forma consolidada, o estudo reforça a necessidade de uma abordagem integrada, combinando engenharia de materiais, tribologia, mecânica da fratura e monitoramento de ativos, como base para o aumento da confiabilidade e da vida útil dos transportadores de correia.

Copyright © 2025 ISESC

REFERÊNCIAS

[1] **SILVA, J. M.** Utilização de transportadores de correias na indústria mineral. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 15, n. 3, p. 134–145, 2018.

[2] **SANTOS, P. R.; FERREIRA, L. G.; COSTA, M.** Manutenção preditiva aplicada a transportadores industriais. *Revista Tecnologia em Foco*, v. 12, n. 2, p. 95–102, 2020.

[3] **VALE.** *Vale: nossa história*. São Paulo: Verso Brasil, 2012. 420 p. Ilustrado em cores. ISBN 978-85-62767-07-4.

[4] **FERREIRA, C. A.; ALMEIDA, R. M.** Inovações tecnológicas em transportadores de correias: uma revisão crítica. *Revista Internacional de Engenharia Industrial*, v. 20, n. 1, p. 55–67, 2022.

[5] **NASCIMENTO, M.; CARVALHO, J. L.** Sistemas sustentáveis de transporte industrial. *Sustainability Journal*, v. 5, n. 2, p. 45–62, 2020.

[6] **OLIVEIRA, R.; COSTA, A. P.** Eficiência operacional em sistemas de transporte contínuo. *Revista Brasileira de Engenharia Mecânica*, v. 18, n. 4, p. 203–210, 2019.

[7] **GENTIL, V.** *Corrosão*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

[8] **MARTINS, J. L.; SILVA, R. A.** *Corrosão industrial: princípios e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2021.

[9] **GEMELLI, E.** *Corrosão: introdução e avaliação*. [S.l.]: Centro de Ciências Tecnológicas, 2024.

[10] **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).** *ABNT NBR 15968:2022 – Transportadores de correia — requisitos de projeto e manutenção*. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

[11] **CARVALHO, P. H.; SOUZA, M. T.** *Manutenção preventiva de sistemas de correias transportadoras*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2020.

[12] **GAVI – Solução em Transporte e Transferência de Materiais.** *Manual de inspeção e manutenção de correias transportadoras e seus periféricos*. Vitória: Editora Bios, 2011.

[13] **SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, K. J.** *Elementos de máquinas de Shigley*. Tradução da 8. ed. em inglês. Porto Alegre: Bookman, 2011.

[14] **GOMES, F. A.; SILVA, T. J.; MARTINS, E.** Desafios mecânicos nos transportadores de correias modernos. *Journal of Industrial Systems*, v. 10, n. 6, p. 89–99, 2021.

[15] **CICEK, V.; AL-NUMAN, B.** *Corrosion chemistry*. Hoboken: Wiley, 2011.

[16] **CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G.** *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Tradução da 8. ed. em inglês. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

[17] **OLIVEIRA, S. R.; SILVA, G. J. G.; MORAIS, W. A.** Confiabilidade de estruturas metálicas: integração entre projeto, patologias e diagnóstico estrutural. *Unisanta Science & Technology*, v. 14, p. 46–58, 2025.

[18] **ASSOCIATION FOR MATERIALS PROTECTION AND PERFORMANCE (AMPP).** *Corrosion costs and prevention strategies*. Houston: AMPP, 2024.

[19] **NACE INTERNATIONAL.** *International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies (IMPACT)*. Houston: NACE International, 2016.

[20] **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).** *ABNT NBR ISO 283:1990 – Correias transportadoras — resistência à tração de espessura total, alongamento na ruptura e alongamento na carga de referência*. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

[21] **NATIONAL LUBRICATING GREASE INSTITUTE (NLGI).** *Lubricating grease guide*. Kansas City: National Lubricating Grease Institute, 2019.

[22] **TOTTEN, G. E.** *Handbook of lubrication and tribology*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

[23] **INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO).** *ISO 252:1988 – Conveyor belts — adhesion between components*. Geneva: ISO, 1988.

[24] **DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN).** *DIN ISO 4649:2006 – Rubber, vulcanized or thermoplastic — determination of abrasion resistance*. Berlin: DIN, 2006.

[25] **ANDERSON, T. L.** *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

[26] **BROEK, D.** *Elementary engineering fracture mechanics*. 4. ed. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1986.

[27] **MORAIS, W. A.; GODEFROID, L. B.; CÂNDIDO, L. C.** A análise de falhas como uma ferramenta de convergência dos conhecimentos metalúrgicos: revisão e exemplos de casos. In: **CONGRESSO ANUAL DA ABM**, 60., 2005, Belo Horizonte. *Anais*... São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. CD-ROM.

[28] **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).** *ABNT NBR ISO 281:2010 – Rolamentos — capacidade de carga dinâmica e vida nominal*. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

[29] **SNIDERMAN, D.** *Calcium sulfonate complex greases: performance and applications*. Webinar. Tribology & Lubrication Technology (TLT). Chicago: Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE), out. 2016. Disponível em: https://www.stle.org/webinarwednesdays. Acesso em: 10 jun. 2025.

Copyright © 2025 ISESC