



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Rogério Mariano de Almeida Júnior

Análise de falhas de cabo de aço de uma ponte rolante: o caso
de uma empresa de siderurgia

Ouro Preto
2026

Rogério Mariano de Almeida Júnior

Análise de falhas de cabo de aço de uma ponte rolante: o caso
de uma empresa de siderurgia

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
curso de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: DSc. Washington Luís Vieira da Silva

Ouro Preto
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A447a Almeida Junior, Rogerio Mariano de.

Análise de falhas de cabo de aço de uma ponte rolante [manuscrito]:
o caso de uma empresa de siderurgia. / Rogerio Mariano de Almeida
Junior. - 2026.
68 f.

Orientador: Prof. Dr. Washington Luís Vieira da Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Fábricas - Manutenção. 2. Tolerância a falha (Engenharia). 3.
Pontes - Ponte rolante. 4. Fios de aço. 5. Confiabilidade (Engenharia). I.
Silva, Washington Luís Vieira da. II. Universidade Federal de Ouro Preto.
III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rogério Mariano de Almeida Júnior

Análise de falhas de cabo de aço de uma ponte rolante: o caso de uma empresa de siderurgia

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 16 de Julho de 2026

Membros da banca

DSc. Washington Luís Vieira da Silva - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Diogo Antônio de Sousa (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Washington Luís Vieira da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Washington Luis Vieira da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/07/2026, às 15:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1147996** e o código CRC **FBD7B2AA**.

Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos.

AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, força, sabedoria e perseverança ao longo desta jornada, guiando meus passos e tornando possível a realização deste trabalho e a conclusão de mais uma importante etapa da minha formação.

Aos meus pais, Rogério e Márcia, expresso minha eterna gratidão por todo o amor, incentivo, dedicação e pelos ensinamentos que moldaram meu caráter e me permitiram chegar até aqui. À minha irmã, Júlia, agradeço pelo companheirismo e apoio constante. À minha namorada, Luiza, agradeço pelo carinho, compreensão, paciência e incentivo nos momentos mais desafiadores, sendo uma presença fundamental durante todo esse percurso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Washington, registro meu sincero agradecimento pela confiança, disponibilidade, orientação e compartilhamento de conhecimentos ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Seu apoio, suas contribuições e seu comprometimento foram essenciais para a realização desta pesquisa e para meu crescimento acadêmico e profissional.

“O importante não é parar de questionar. A curiosidade tem sua própria razão para existir.”

Albert Einstein

RESUMO

As pontes rolantes desempenham papel fundamental nas operações industriais, especialmente no setor siderúrgico, onde a movimentação segura de cargas depende diretamente da confiabilidade de seus componentes. Entre esses, os cabos de aço estão sujeitos a elevadas solicitações mecânicas e a ciclos repetitivos de carregamento, tornando-se suscetíveis ao desenvolvimento de falhas que podem comprometer a segurança operacional, a disponibilidade do equipamento e a continuidade do processo produtivo. Nesse contexto, o Sistema de Tratamento de Falhas (STF) constitui uma metodologia estruturada para investigação de ocorrências, permitindo identificar possíveis causas e subsidiar a definição de ações corretivas e preventivas. Assim, este trabalho teve como objetivo analisar como o Sistema de Tratamento de Falhas pode contribuir para a análise de falhas em cabos de aço de uma ponte rolante de uma empresa do setor siderúrgico. A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, exploratória, bibliográfica, documental, aplicada e desenvolvida por meio de um estudo de caso. A investigação foi conduzida a partir da análise de registros de manutenção, documentos técnicos, inspeções em campo e histórico operacional do equipamento, utilizando como ferramentas o Diagrama de Ishikawa e a Análise de Causa Raiz (RCA). O estudo foi realizado após a substituição integral da ponte rolante e de seu sistema de elevação, período em que passaram a ser registradas ocorrências relacionadas aos cabos de aço, incluindo arames rompidos, alma saltada e aumento localizado do diâmetro. A avaliação sistemática das hipóteses levantadas permitiu indicar, para o caso estudado, que a incompatibilidade entre a construção do cabo originalmente especificado e as condições reais de operação da ponte rolante representava a hipótese mais consistente para explicar as falhas observadas. A partir dessa identificação, foram propostas ações voltadas à adequação da especificação do cabo, intensificação das inspeções e revisão dos procedimentos de manutenção. Os resultados obtidos indicam que a aplicação do Sistema de Tratamento de Falhas contribuiu para estruturar a investigação, apoiar a identificação da causa raiz e subsidiar a definição de tratativas direcionadas ao aumento da confiabilidade do equipamento no contexto analisado.

Palavras-chave: Manutenção industrial. Sistema de Tratamento de Falhas. Ponte rolante. Cabo de aço. Confiabilidade.

ABSTRACT

Overhead cranes play a fundamental role in industrial operations, particularly in the steel industry, where the safe handling of loads depends directly on the reliability of their components. Among these components, steel wire ropes are subjected to high mechanical stresses and repeated loading cycles, making them susceptible to failures that may affect operational safety, equipment availability, and production continuity. In this context, the Failure Treatment System (FTS) provides a structured methodology for investigating failures, supporting the identification of possible causes and the definition of corrective and preventive actions. Therefore, this study aimed to analyze how the Failure Treatment System can contribute to the failure analysis of steel wire ropes used in an overhead crane at a steel company. The research is characterized as qualitative, exploratory, bibliographic, documentary, applied, and conducted through a case study. The investigation was based on maintenance records, technical documents, field inspections, and the operational history of the equipment, using the Ishikawa Diagram and Root Cause Analysis (RCA) as analytical tools. The study was carried out after the complete replacement of the overhead crane and its lifting system, when failures involving the steel wire ropes began to be recorded, including broken wires, core protrusion, and localized increases in rope diameter. The systematic evaluation of the proposed hypotheses indicated that, for the case studied, the incompatibility between the originally specified rope construction and the actual operating conditions of the overhead crane represented the most consistent explanation for the observed failures. Based on these findings, actions were proposed involving the adoption of a more suitable rope construction, reinforcement of inspection practices, and revision of maintenance procedures. The results indicate that the application of the Failure Treatment System contributed to structuring the investigation, supporting the identification of the root cause, and guiding corrective actions aimed at improving equipment reliability within the context analyzed.

Keywords: Industrial maintenance. Failure Treatment System. Overhead crane. Steel wire rope. Reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de Materiais e Métodos.....	30
Figura 2: Organograma simplificado da estrutura organizacional da empresa estudada.	40
Figura 3: Vista geral da ponte rolante analisada.....	42
Figura 4: Sistema de elevação da ponte rolante.	43
Figura 5: Cabo de aço utilizado no sistema de elevação.	44
Figura 6: Detalhamento do cabo de aço analisado.	45
Figura 7: Componentes constituintes de um cabo de aço.....	46
Figura 8: Linha do tempo das ocorrências relacionadas aos cabos de aço da ponte rolante.	48
Figura 9: Arame rompido identificado durante inspeção do cabo de aço.	49
Figura 10: Ocorrência de alma saltada identificada no cabo de aço.	50
Figura 11: Aumento localizado do diâmetro do cabo de aço.	51
Figura 12: Diagrama de Ishikawa aplicado à análise das falhas do cabo de aço.	1
Figura 13:Árvore de falhas utilizada na análise da ocorrência.....	1
Figura 14: Comparação entre a construção original e a construção adotada após a análise da falha.	4
Figura 15: Fluxo das tratativas adotadas após a determinação da causa raiz.	1

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis e Indicadores	33
Tabela 2: Plano de ação definido após a análise da falha do cabo de aço.....	5

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Objetivos.....	5
1.3.1	Geral	5
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Manutenção	7
2.2	Métodos de Manutenção.....	11
2.3	Sistema de Tratamento de Falhas (STF).....	16
2.3.1	Diagrama de Ishikawa	22
2.3.2	Análise de Causa Raiz	23
2.3.3	Análise de Falhas em cabos de aço	24
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	Tipo de Pesquisa.....	27
3.2	Materiais e Métodos	30
3.3	Variáveis e Indicadores	32
3.4	Instrumento de coleta de dados	33
3.5	Tabulação dos dados.....	35
3.6	Considerações Finais do Capítulo	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	Características da empresa.....	37
4.1.1	Atividades da Empresa	37
4.1.2	Processo Produtivo da Empresa	38
4.1.3	Principais Produtos	39
4.1.4	Organograma da Empresa	39
4.2	Descrição do Equipamento: Ponte Rolante	41
4.2.1	Caracterização do Cabo de Aço.....	46
4.3	Análise de Falha do Cabo de Aço	47

4.3.1	Identificação da Falha.....	47
4.3.2	Caracterização das Falhas Observadas	48
4.3.3	Levantamento das Hipóteses	51
4.3.4	Aplicação do Diagrama de Ishikawa	52
4.3.5	Aplicação da Análise de Causas Raiz (RCA).....	1
4.3.6	Determinação da Causa Raiz	2
4.4	Contribuições do Sistema de Tratamento de Falhas.....	4
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	2
5.1	Conclusão	2
5.2	Recomendações	3
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	5

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A manufatura industrial possui papel fundamental no desenvolvimento econômico e social, sendo responsável pela produção de bens e serviços essenciais para diferentes setores da sociedade (HOLGADO; DONATO, 2020). Em ambientes industriais cada vez mais competitivos e tecnologicamente avançados, a eficiência dos processos produtivos tornou-se um fator estratégico para garantir qualidade, produtividade e sustentabilidade operacional (ZHENG; PAIVA; GURCIULLO, 2020; ZHU *et al.*, 2019).

Nesse cenário, as empresas industriais buscam continuamente otimizar suas operações, reduzir falhas e aumentar a confiabilidade dos processos produtivos, principalmente em setores de elevada complexidade operacional, como a siderurgia (HOLGADO; DONATO, 2020). Segundo Tsang (2002), a competitividade industrial está diretamente relacionada à capacidade das organizações de manter seus ativos operando de forma segura, eficiente e contínua.

Para garantir continuidade operacional e estabilidade dos processos produtivos, torna-se indispensável adoção de práticas de manutenção eficientes e estruturadas. Conforme Nowlan e Heap (1978), a manutenção industrial deixou de possuir caráter exclusivamente corretivo e passou a desempenhar papel estratégico na preservação das funções operacionais dos equipamentos industriais.

A manutenção industrial pode ser compreendida como um conjunto de ações destinadas a manter ou restaurar equipamentos em condições adequadas de operação (KARDEC; NASCIF, 2012). Segundo Xenos (1998, p. 18), “manutenção é fazer tudo o que for preciso para assegurar que um equipamento continue a desempenhar as funções para as quais foi projetado, em um nível de desempenho exigido”.

Essa definição demonstra que a manutenção está diretamente relacionada à garantia da qualidade, segurança operacional, controle de custos e continuidade dos processos produtivos (XENOS, 1998). Dessa forma, a manutenção industrial passou a ser considerada elemento estratégico para competitividade das organizações industriais (TSANG, 2002).

Com avanço da engenharia de manutenção, surgiu necessidade de aplicação de métodos estruturados capazes de identificar, analisar e tratar falhas de forma sistemática. Nesse contexto, a manutenção centrada na confiabilidade, proposta por Nowlan e Heap (1978) e posteriormente aprofundada por Moubray (1997), contribuiu para consolidação de abordagens voltadas à análise estruturada das falhas industriais.

A partir dessa evolução, o Sistema de Tratamento de Falhas passou a ser utilizado como ferramenta complementar à manutenção, permitindo investigação sistemática das falhas e desenvolvimento de ações voltadas para aumento da confiabilidade operacional (SMITH; HINCHCLIFFE, 2011).

O Sistema de Tratamento de Falhas envolve utilização de metodologias específicas para identificação, análise e mitigação de falhas industriais, incluindo ferramentas como análise de causa raiz, árvore de falhas e FMEA — *Failure Mode and Effects Analysis* (RAUSAND; HØYLAND, 2004). A norma IEC 60812 (2018) destaca que o FMEA permite identificar modos de falha, avaliar seus efeitos e definir prioridades de ação para redução dos riscos operacionais.

Segundo Rausand e Høyland (2004), métodos estruturados de análise de falhas possibilitam identificar causas fundamentais dos problemas, reduzindo recorrência das falhas e contribuindo para aumento da confiabilidade dos sistemas industriais.

No ambiente siderúrgico, aplicação dessas metodologias torna-se ainda mais relevante devido às severas condições operacionais presentes nos processos produtivos (TUPKARY; TUPKARY, 2017). Equipamentos industriais operam continuamente sob altas temperaturas, vibrações, esforços mecânicos e movimentação constante de materiais, fatores que aumentam probabilidade de falhas operacionais (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2004).

A aciaria, setor responsável pela transformação de ferro-gusa e sucata metálica em aço, depende de processos termoquímicos complexos e equipamentos de elevada criticidade operacional (TUPKARY; TUPKARY, 2017). Segundo Mourão (2011), a elevada integração entre os processos siderúrgicos faz com que falhas em equipamentos auxiliares possam comprometer diretamente continuidade da produção.

Entre os equipamentos essenciais presentes nas operações siderúrgicas destacam-se as pontes rolantes, utilizadas para movimentação de sucata metálica, painéis de aço líquido, materiais semiacabados e cargas de grande porte (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2004). Esses equipamentos operam continuamente sob condições severas, exigindo elevados níveis de confiabilidade e segurança operacional (KARDEC; NASCIF, 2012).

As pontes rolantes dependem diretamente dos cabos de aço para realização das operações de içamento e movimentação das cargas industriais. Segundo Costello (1997), os cabos de aço são constituídos por conjuntos de arames torcidos helicoidalmente ao redor de uma alma central, sendo projetados para suportar elevados esforços de tração, flexão e torção.

Entretanto, devido às condições severas presentes no ambiente siderúrgico, os cabos de aço estão sujeitos a diferentes mecanismos de degradação, como desgaste abrasivo, corrosão, fadiga, torções anômalas e falhas estruturais (COSTELLO, 1997). Essas falhas podem comprometer estabilidade dos arames e aumentar risco de ruptura durante operação do equipamento.

Segundo Costello (1997), falhas em cabos de aço representam um dos principais riscos associados aos sistemas de movimentação de cargas, principalmente em ambientes industriais de elevada criticidade operacional. Dessa forma, torna-se necessária aplicação de métodos estruturados capazes de identificar causas das falhas e propor ações voltadas para aumento da confiabilidade operacional.

Nesse contexto, aplicação do Sistema de Tratamento de Falhas torna-se relevante para análise das falhas observadas em cabos de aço utilizados em pontes rolantes siderúrgicas, contribuindo para identificação das causas, avaliação dos impactos operacionais e desenvolvimento de ações preventivas voltadas para segurança e continuidade operacional dos processos industriais.

Diante desse cenário, apresenta-se a seguinte problemática de pesquisa:

Como o sistema de tratamento de falhas pode contribuir para a análise de falha de cabo de aço de uma ponte rolante de uma empresa de siderurgia?

1.2 Justificativa

A escolha do tema, justifica-se pela elevada importância da confiabilidade operacional em ambientes siderúrgicos, nos quais falhas em equipamentos podem provocar impactos significativos na produção, na segurança operacional e nos custos industriais (KARDEC; NASCIF, 2012). Em operações contínuas, como as existentes em aciarias, a indisponibilidade de equipamentos críticos pode comprometer diretamente estabilidade do processo produtivo (TUPKARY; TUPKARY, 2017).

A relevância do estudo também está associada à criticidade das pontes rolantes dentro das operações siderúrgicas. Esses equipamentos são responsáveis pela movimentação de cargas pesadas e materiais em altas temperaturas, desempenhando papel essencial na continuidade operacional da planta industrial (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2004).

Os cabos de aço utilizados nesses equipamentos estão submetidos continuamente a esforços mecânicos intensos, desgaste abrasivo, fadiga e condições severas de operação (COSTELLO, 1997). Dessa forma, falhas nesses componentes podem provocar riscos à segurança, interrupções produtivas e elevados custos operacionais.

Segundo Vieira (2019), falhas em sistemas de movimentação de cargas podem gerar perdas significativas em ambientes siderúrgicos, reforçando necessidade de métodos estruturados capazes de auxiliar diagnóstico das falhas e definição de ações preventivas.

Além disso, a motivação para desenvolvimento deste trabalho está relacionada à necessidade de aprimoramento dos processos de manutenção e análise de falhas aplicados aos cabos de aço das pontes rolantes. Conforme Moubray (1997), sistemas estruturados de investigação permitem reduzir recorrência das falhas e aumentar eficiência das estratégias de manutenção industrial.

A utilização de um Sistema de Tratamento de Falhas também contribui para padronização das análises, rastreabilidade das ocorrências e melhoria da tomada de decisão relacionada à manutenção dos equipamentos industriais (SMITH; HINCHCLIFFE, 2011).

Dessa forma, este estudo pode contribuir tecnicamente para melhoria dos processos de manutenção aplicados aos sistemas de movimentação de cargas, auxiliando identificação das causas das falhas, aumento da confiabilidade operacional e redução das paradas não programadas dos equipamentos siderúrgicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar como o sistema de tratamento de falhas pode contribuir para a análise de falha de cabo de aço de uma ponte rolante de uma empresa de siderurgia.

1.3.2 Específicos

- Desenvolver um estudo teórico sobre: manutenção, métodos de manutenção e sistema de tratamento de falhas;
- Elaborar um procedimento metodológico para analisar um sistema de tratamento de falhas para o equipamento estudado;
- Coletar as principais informações do equipamento e do processo para a análise do sistema de tratamento de falhas;
- Utilizar a base teórica e as informações coletadas para analisar como o sistema de tratamento de falhas pode contribuir para a análise de falha de cabo de aço de uma ponte rolante de uma empresa de siderurgia.

1.4 Estrutura do Trabalho

Com o objetivo de facilitar a compreensão do tema e organizar o desenvolvimento da pesquisa, este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, apresentados de forma sequencial e inter-relacionada.

O Capítulo 1 apresenta a introdução da pesquisa, contemplando a formulação do problema, a justificativa, os objetivos gerais e específicos e a estrutura do trabalho, contextualizando o tema e evidenciando sua relevância para a engenharia de manutenção e para a confiabilidade de equipamentos utilizados na indústria siderúrgica.

O Capítulo 2 reúne a revisão bibliográfica, abordando os principais conceitos relacionados à manutenção industrial, aos métodos de manutenção e ao Sistema de Tratamento de Falhas. Também são discutidos os fundamentos teóricos que sustentam a aplicação das ferramentas utilizadas na análise das falhas em cabos de aço de pontes rolantes.

O Capítulo 3 descreve os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, apresentando o tipo de pesquisa, os materiais e métodos empregados, as variáveis e indicadores analisados, os instrumentos de coleta de dados e a forma de organização e tabulação das informações utilizadas no estudo.

O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso desenvolvido, iniciando pela caracterização da empresa e do componente estudado, seguido pela análise das falhas observadas nos cabos de aço da ponte rolante. Nesse capítulo são aplicadas as ferramentas de investigação, como o Diagrama de Ishikawa e a Análise de Causa Raiz, sendo posteriormente apresentado o plano de ação e as tratativas propostas a partir da determinação da causa raiz da falha.

Por fim, o Capítulo 5 trata das conclusões obtidas com o desenvolvimento da pesquisa, respondendo ao problema proposto e evidenciando as principais contribuições do Sistema de Tratamento de Falhas para a análise das falhas em cabos de aço. Além disso, são apresentadas recomendações para trabalhos futuros, visando ampliar os estudos relacionados à confiabilidade e à manutenção de equipamentos de movimentação de cargas na indústria siderúrgica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manutenção

A manutenção industrial ocupa posição estratégica dentro dos sistemas produtivos modernos, principalmente em ambientes de elevada complexidade operacional, como o setor siderúrgico (KARDEC; NASCIF, 2012). Mais do que realizar reparos após falhas, a manutenção passou a contribuir diretamente para confiabilidade operacional, segurança industrial, produtividade e disponibilidade dos equipamentos (TSANG, 2002).

Historicamente, os primeiros modelos de manutenção possuíam caráter predominantemente corretivo. Durante grande parte do processo de industrialização, os equipamentos eram operados até a ocorrência de falhas e somente após a quebra eram realizadas intervenções de reparo (MOUBRAY, 1997). Embora esse modelo apresentasse baixo custo inicial, ele provocava elevados tempos de parada, perdas produtivas e aumento dos riscos operacionais, especialmente em plantas industriais contínuas (WIREMAN, 2005).

Com o avanço tecnológico e o aumento da complexidade dos processos industriais, as empresas passaram a buscar estratégias capazes de reduzir falhas inesperadas e aumentar a previsibilidade operacional. Nesse contexto, consolidou-se a manutenção preventiva, baseada na realização periódica de inspeções, substituições programadas e intervenções planejadas antes da ocorrência das falhas (XENOS, 1998).

Segundo Kelly (2006), a manutenção preventiva contribui para melhor planejamento das intervenções, maior controle operacional e aumento da disponibilidade dos equipamentos. Além disso, essa estratégia passou a reduzir significativamente as interrupções não programadas, permitindo maior estabilidade dos sistemas produtivos (KARDEC; NASCIF, 2012).

Apesar dos benefícios proporcionados pela manutenção preventiva, intervenções realizadas em intervalos fixos podem ocasionar substituições prematuras de componentes ainda em condições adequadas de operação (MOBLEY, 2002). Em função dessa limitação, surgiu a manutenção preditiva, fundamentada no monitoramento contínuo das condições reais dos equipamentos.

A manutenção preditiva utiliza técnicas capazes de identificar alterações no comportamento operacional dos equipamentos antes da ocorrência das falhas, como análise de vibração, termografia, ultrassom e análise de óleo lubrificante (JARDINE; LIN; BANJEVIC, 2006). Segundo Mobley (2002), essa abordagem permite reduzir custos operacionais, otimizar intervenções e aumentar significativamente a confiabilidade dos sistemas industriais.

Além da redução de falhas inesperadas, a manutenção preditiva também contribui para maior disponibilidade operacional e melhor aproveitamento da vida útil dos componentes industriais (JARDINE; LIN; BANJEVIC, 2006). Em processos contínuos, como os existentes na siderurgia, essa característica torna-se fundamental para evitar interrupções produtivas de grande impacto operacional.

A evolução da manutenção também está diretamente relacionada ao conceito de confiabilidade dos ativos industriais. Segundo Nowlan e Heap (1978), a manutenção moderna deve ser orientada não apenas para reparo das falhas, mas principalmente para preservação das funções operacionais dos equipamentos ao longo do tempo.

Nesse contexto, surgiu a *Reliability Centered Maintenance* (RCM), ou Manutenção Centrada na Confiabilidade, considerada um dos principais marcos da engenharia de manutenção moderna (MOUBRAY, 1997). Essa metodologia propõe definição das estratégias de manutenção com base nos riscos e consequências das falhas, direcionando esforços para os equipamentos mais críticos da operação (KARDEC; NASCIF, 2012).

A manutenção centrada na confiabilidade busca garantir que os sistemas industriais continuem desempenhando suas funções dentro de um contexto operacional específico, considerando aspectos relacionados à segurança, disponibilidade, qualidade do produto, meio ambiente e custos operacionais (MOUBRAY, 1997). Por esse motivo, essa abordagem passou a ser amplamente utilizada em setores industriais de alta criticidade, como siderurgia, mineração, petróleo e geração de energia (TSANG, 2002).

A manutenção também possui forte relação com a gestão de ativos industriais. A norma ISO 55000 estabelece princípios relacionados à gestão dos ativos, destacando que a manutenção é essencial para garantir desempenho,

confiabilidade e sustentabilidade operacional dos sistemas industriais. Segundo Kelly (2006), a gestão moderna da manutenção deve considerar todo o ciclo de vida do ativo, envolvendo planejamento, operação, monitoramento, manutenção e descarte.

No ambiente siderúrgico, a manutenção assume importância ainda maior devido às severas condições operacionais às quais os equipamentos estão submetidos, incluindo altas temperaturas, vibrações constantes, ambientes abrasivos e esforços mecânicos contínuos (TUPKARY; TUPKARY, 2017). Segundo Shigley, Mischke e Budynas (2004), falhas em equipamentos industriais podem provocar impactos significativos na produção, aumento de custos operacionais e riscos à segurança dos trabalhadores.

Entre os equipamentos mais críticos dentro das aciarias destacam-se as pontes rolantes, responsáveis pela movimentação de sucata metálica, placas de aço líquido e cargas de grande porte (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2004). Esses equipamentos operam continuamente em condições severas, exigindo elevados níveis de confiabilidade operacional e controle das condições de funcionamento.

Dentro dos sistemas de movimentação de cargas, os cabos de aço desempenham papel fundamental no içamento e transporte de materiais. Segundo Costello (1997), esses componentes estão sujeitos a diferentes mecanismos de degradação, como fadiga, desgaste abrasivo, corrosão, torção e sobrecarga, fatores que podem comprometer diretamente sua integridade estrutural.

Falhas em cabos de aço podem provocar acidentes graves, danos estruturais e interrupções produtivas significativas (COSTELLO, 1997). Dessa forma, a realização de inspeções periódicas torna-se indispensável para garantir segurança operacional e continuidade dos processos industriais. A norma ABNT NBR ISO 4309 (2018) estabelece critérios técnicos relacionados à inspeção, manutenção e descarte de cabos de aço utilizados em sistemas de movimentação de cargas.

Além dos aspectos técnicos, a manutenção também apresenta impacto econômico relevante dentro das organizações industriais. Segundo Wireman (2005), falhas inesperadas provocam aumento dos custos relacionados a paradas produtivas, consumo excessivo de peças de reposição e elevação do tempo necessário para reparos.

Outro aspecto importante refere-se à segurança operacional. Sistemas de manutenção ineficientes aumentam significativamente os riscos de acidentes industriais, principalmente em equipamentos críticos e operações de elevada periculosidade (KARDEC; NASCIF, 2012). Em ambientes siderúrgicos, onde há movimentação de cargas elevadas e operação sob altas temperaturas, a confiabilidade dos equipamentos torna-se indispensável para preservação da integridade física dos trabalhadores (TUPKARY; TUPKARY, 2017).

Com o avanço da Indústria 4.0, a manutenção passou por nova transformação tecnológica. Tecnologias como Internet das Coisas (IoT), sensores inteligentes, inteligência artificial e big data permitiram o desenvolvimento da chamada manutenção inteligente (LEE *et al.*, 2014).

Segundo Carvalho *et al.* (2020), sistemas inteligentes de monitoramento possibilitam prever falhas com maior precisão por meio da análise contínua dos dados operacionais coletados em tempo real. Sensores instalados nos equipamentos permitem acompanhar variáveis como temperatura, vibração, pressão e desgaste dos componentes, auxiliando na identificação antecipada de padrões de degradação (LEE *et al.*, 2014).

Além da evolução tecnológica, a manutenção também passou a ser fortemente associada à melhoria contínua dos processos industriais. Segundo Nakajima (1988), a filosofia TPM (*Total Productive Maintenance*) promove integração entre produção e manutenção, incentivando participação dos operadores na preservação dos equipamentos e eliminação das perdas operacionais.

A eficiência da manutenção depende diretamente da capacitação técnica das equipes envolvidas nos processos industriais. Empresas que investem em treinamento e desenvolvimento profissional apresentam melhores indicadores de disponibilidade, confiabilidade e produtividade operacional (ALSYOUF, 2007). Além disso, a padronização dos procedimentos de manutenção contribui para maior controle operacional e redução de falhas humanas (KARDEC; NASCIF, 2012).

Outro fator relevante está relacionado ao planejamento e controle das atividades de manutenção. Segundo Slack *et al.* (2009), o planejamento adequado das intervenções permite otimizar recursos, reduzir tempos improdutivos e aumentar a eficiência operacional. Nesse contexto, indicadores como MTBF (*Mean Time*

Between Failures), MTTR (*Mean Time To Repair*) e disponibilidade operacional são amplamente utilizados para avaliação de desempenho dos sistemas industriais (WIREMAN, 2005).

A manutenção moderna deve ser compreendida, portanto, como uma atividade estratégica integrada à gestão da produção, confiabilidade e desempenho dos ativos industriais (KARDEC; NASCIF, 2012). Sua aplicação eficiente contribui diretamente para redução de falhas, aumento da segurança operacional, melhoria da produtividade e sustentabilidade dos processos industriais (TSANG, 2002).

Dessa forma, observa-se que a manutenção possui papel fundamental na confiabilidade dos sistemas industriais, especialmente em equipamentos críticos como pontes rolantes e cabos de aço utilizados em ambientes siderúrgicos (COSTELLO, 1997). A aplicação de práticas estruturadas de manutenção torna-se indispensável para garantir segurança operacional, continuidade produtiva e redução dos custos associados às falhas industriais (KARDEC; NASCIF, 2012).

2.2 Métodos de Manutenção

Os métodos de manutenção correspondem às diferentes estratégias utilizadas pelas organizações para garantir funcionamento adequado, confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos industriais (KARDEC; NASCIF, 2012). A definição da estratégia mais adequada depende de fatores como criticidade dos ativos, impacto das falhas, custos operacionais, segurança e características do processo produtivo. Segundo Tsang (2002), a escolha correta dos métodos de manutenção influencia diretamente desempenho operacional, produtividade e competitividade das empresas industriais.

Ao longo do desenvolvimento industrial, os métodos de manutenção passaram por importantes transformações, acompanhando evolução tecnológica e aumento da complexidade dos sistemas produtivos. Inicialmente, predominava a manutenção corretiva, considerada a forma mais simples e tradicional de manutenção industrial (WIREMAN, 2005). Nesse modelo, os equipamentos eram operados até ocorrência das falhas e somente após a quebra eram realizadas intervenções de reparo (MOUBRAY, 1997).

Segundo Wireman (2005), a manutenção corretiva consiste na restauração do equipamento após perda parcial ou total de sua função operacional. Essa estratégia pode ser dividida em manutenção corretiva planejada e manutenção corretiva não planejada. A corretiva planejada ocorre quando a falha é identificada previamente e a intervenção pode ser programada em momento operacionalmente mais adequado (XENOS, 1998). Já a corretiva não planejada acontece de forma emergencial, geralmente provocando interrupções inesperadas na produção, aumento dos custos operacionais e maiores riscos à segurança industrial (KARDEC; NASCIF, 2012).

Apesar das limitações associadas às falhas inesperadas, a manutenção corretiva ainda é utilizada em determinados contextos industriais, principalmente em equipamentos de baixa criticidade ou em componentes com baixo custo de substituição (WIREMAN, 2005). Entretanto, em sistemas críticos, como pontes rolantes utilizadas em ambientes siderúrgicos, falhas inesperadas podem comprometer segurança operacional, continuidade produtiva e integridade estrutural dos equipamentos (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2004).

Com o avanço da engenharia de manutenção e aumento da necessidade de confiabilidade operacional, consolidou-se a manutenção preventiva, baseada em intervenções periódicas realizadas antes da ocorrência das falhas (MOBLEY, 2002). Segundo Kelly (2006), a manutenção preventiva busca reduzir probabilidade de falhas por meio de inspeções programadas, ajustes operacionais, lubrificação e substituição periódica de componentes críticos.

A manutenção preventiva passou a ser amplamente utilizada devido à sua capacidade de reduzir interrupções não programadas e aumentar disponibilidade operacional dos equipamentos industriais (XENOS, 1998). Além disso, essa abordagem permite maior previsibilidade das intervenções e melhor planejamento dos recursos de manutenção (KELLY, 2006). Entretanto, intervenções excessivas podem ocasionar substituições prematuras de componentes ainda operacionais, elevando custos de manutenção e desperdício de recursos (MOBLEY, 2002).

Nos sistemas de movimentação de cargas, especialmente em pontes rolantes siderúrgicas, a manutenção preventiva possui papel fundamental para preservação da segurança operacional. A norma ABNT NBR ISO 4309 (2018) estabelece critérios técnicos relacionados à inspeção, manutenção e descarte de cabos de aço utilizados em sistemas de içamento e movimentação de cargas. Entre os principais parâmetros

avaliados estão desgaste, corrosão, deformações, fadiga e rompimento de arames (ABNT NBR ISO 4309, 2018).

Posteriormente, surgiu a manutenção preditiva, considerada uma evolução da manutenção preventiva. Diferentemente das intervenções baseadas em períodos fixos, a manutenção preditiva utiliza monitoramento contínuo das condições reais dos equipamentos para identificar tendências de falha antes da ocorrência de quebras (JARDINE; LIN; BANJEVIC, 2006).

Segundo Mobley (2002), a manutenção preditiva permite reduzir significativamente os custos operacionais, uma vez que as intervenções passam a ocorrer somente quando os equipamentos apresentam indícios reais de degradação. Essa estratégia também contribui para otimização das paradas de manutenção e melhor aproveitamento da vida útil dos componentes industriais.

Entre as principais técnicas utilizadas na manutenção preditiva destacam-se análise de vibração, termografia, ultrassom, análise de óleo lubrificante e monitoramento acústico (MOBLEY, 2002). Conforme Jardine, Lin e Banjevic (2006), essas técnicas possibilitam detectar alterações no comportamento operacional dos equipamentos, permitindo antecipar falhas e reduzir tempo de parada dos sistemas industriais.

No ambiente siderúrgico, a manutenção preditiva apresenta elevada relevância devido às severas condições operacionais dos equipamentos industriais (TUPKARY; TUPKARY, 2017). Equipamentos operam continuamente sob altas temperaturas, vibrações e esforços mecânicos intensos, exigindo monitoramento constante para evitar falhas catastróficas (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2004).

Segundo Carvalho *et al.* (2020), a aplicação de sistemas inteligentes de monitoramento vem ampliando significativamente eficiência da manutenção preditiva nos ambientes industriais modernos. Sensores embarcados permitem monitorar variáveis operacionais em tempo real, contribuindo para identificação antecipada de padrões de degradação dos equipamentos.

Outro método importante é a manutenção detectiva, utilizada principalmente em sistemas de proteção e segurança industrial. Segundo Kardec e Nascif (2012), essa estratégia busca identificar falhas ocultas que não podem ser percebidas durante

funcionamento normal dos equipamentos. Esse método é amplamente aplicado em sensores, alarmes e sistemas automáticos de segurança (WIREMAN, 2005).

A manutenção autônoma também se destaca dentro dos métodos modernos de manutenção industrial. Essa abordagem está diretamente relacionada à filosofia TPM (Total Productive Maintenance), desenvolvida por Nakajima (1988). Segundo o autor, a manutenção autônoma promove participação direta dos operadores nas atividades básicas de conservação dos equipamentos, incluindo limpeza, inspeção e lubrificação.

A filosofia TPM surgiu no Japão com objetivo de eliminar perdas produtivas, aumentar eficiência global dos equipamentos e promover integração entre produção e manutenção (NAKAJIMA, 1988). Conforme Slack *et al.* (2009), essa abordagem contribui para desenvolvimento de cultura organizacional voltada à melhoria contínua e à confiabilidade operacional dos sistemas industriais.

Dentro do TPM, os operadores passam a atuar diretamente na identificação de anomalias e na execução de pequenas intervenções preventivas nos equipamentos (NAKAJIMA, 1988). Essa abordagem contribui para redução das falhas operacionais, aumento da disponibilidade dos equipamentos e fortalecimento do senso de responsabilidade sobre os ativos industriais (SLACK *et al.*, 2009).

Outro método amplamente reconhecido é a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM – *Reliability Centered Maintenance*), desenvolvida por Nowlan e Heap (1978). Essa metodologia revolucionou engenharia de manutenção ao priorizar ações de manutenção com base nos riscos e consequências das falhas (MOUBRAY, 1997).

Segundo Moubray (1997), o principal objetivo do RCM é garantir que os equipamentos continuem desempenhando suas funções dentro de um contexto operacional específico. O método considera fatores relacionados à segurança, disponibilidade, qualidade, meio ambiente e desempenho operacional dos sistemas industriais (NOWLAN; HEAP, 1978).

A aplicação do RCM envolve identificação das funções dos equipamentos, modos de falha, causas, efeitos e consequências operacionais (MOUBRAY, 1997). A partir dessa análise, são definidas estratégias de manutenção mais adequadas para

cada situação operacional, aumentando confiabilidade e reduzindo custos associados às falhas industriais (KARDEC; NASCIF, 2012).

A manutenção baseada em condição (CBM – *Condition Based Maintenance*) também possui grande relevância nos sistemas industriais modernos. Conforme Jardine, Lin e Banjevic (2006), o CBM utiliza informações obtidas em tempo real para determinar momento ideal de intervenção nos equipamentos, reduzindo desperdícios e aumentando vida útil dos componentes industriais.

Com avanço da Indústria 4.0, surgiram novos métodos baseados em inteligência artificial, internet das coisas (IoT) e análise de dados operacionais (LEE *et al.*, 2014). Segundo os autores, integração entre sensores inteligentes e algoritmos de aprendizado de máquina possibilitou desenvolvimento da manutenção prescritiva.

A manutenção prescritiva representa evolução da manutenção preditiva, pois além de prever falhas também recomenda ações corretivas específicas para cada situação operacional (CARVALHO *et al.*, 2020). Sistemas inteligentes conseguem analisar grandes volumes de dados operacionais e sugerir intervenções otimizadas para os equipamentos industriais (LEE *et al.*, 2014).

A aplicação desses métodos modernos exige elevado nível de integração tecnológica e qualificação profissional. Segundo Alsyouf (2007), empresas que investem em tecnologias avançadas de manutenção apresentam maior competitividade, melhor desempenho operacional e maiores índices de confiabilidade dos ativos industriais.

No setor siderúrgico, a escolha adequada dos métodos de manutenção é fundamental para garantir segurança operacional, continuidade produtiva e confiabilidade dos equipamentos industriais (TUPKARY; TUPKARY, 2017). Equipamentos como pontes rolantes, fornos industriais, transportadores e sistemas hidráulicos operam continuamente sob condições severas, tornando indispensável utilização de estratégias eficientes de manutenção (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2004).

Os cabos de aço utilizados em pontes rolantes representam componentes críticos que exigem monitoramento constante devido aos mecanismos de degradação aos quais estão submetidos, incluindo fadiga, desgaste abrasivo, corrosão e torção (COSTELLO, 1997). Dessa forma, métodos preventivos e preditivos tornam-se

fundamentais para evitar falhas catastróficas e garantir segurança operacional dos sistemas de movimentação de cargas (ABNT NBR ISO 4309, 2018).

A integração entre diferentes métodos de manutenção também possui grande relevância nos ambientes industriais modernos. Muitas empresas utilizam abordagens híbridas, combinando manutenção corretiva, preventiva e preditiva de acordo com criticidade dos equipamentos e riscos operacionais envolvidos (WIREMAN, 2005). Segundo Kardec e Nascif (2012), combinação adequada das estratégias de manutenção permite otimizar custos e aumentar confiabilidade operacional dos ativos industriais.

Outro aspecto importante refere-se ao uso de indicadores de desempenho para avaliação da eficiência dos métodos de manutenção. Indicadores como disponibilidade operacional, confiabilidade, MTBF (*Mean Time Between Failures*) e MTTR (*Mean Time To Repair*) auxiliam tomada de decisão e planejamento das intervenções industriais (SLACK *et al.*, 2009). Segundo Kardec e Nascif (2012), análise desses indicadores permite identificar oportunidades de melhoria contínua nos processos de manutenção.

Portanto, os métodos de manutenção representam ferramentas fundamentais para garantir desempenho, confiabilidade e segurança dos ativos industriais (TSANG, 2002). A escolha adequada da estratégia de manutenção depende das características dos equipamentos, dos riscos operacionais envolvidos e dos objetivos organizacionais da empresa (KARDEC; NASCIF, 2012).

No contexto deste trabalho, a compreensão dos métodos de manutenção torna-se essencial para análise das falhas em cabos de aço utilizados em pontes rolantes siderúrgicas. A aplicação adequada dessas estratégias contribui diretamente para aumento da confiabilidade operacional, redução das falhas e melhoria da segurança industrial (COSTELLO, 1997; ABNT NBR ISO 4309, 2018).

2.3 Sistema de Tratamento de Falhas (STF)

O Sistema de Tratamento de Falhas (STF) pode ser compreendido como um conjunto organizado de métodos, procedimentos e ferramentas voltados à identificação, registro, investigação, análise e mitigação de falhas em equipamentos e sistemas industriais (SMITH; HINCHCLIFFE, 2011). Sua finalidade principal é

compreender as causas das falhas, reduzir sua recorrência e aumentar a confiabilidade operacional dos ativos industriais (RAUSAND; HØYLAND, 2004).

À medida que os sistemas produtivos se tornaram mais complexos, a análise estruturada de falhas passou a ocupar papel cada vez mais importante na engenharia de manutenção (MOUBRAY, 1997). Em ambientes industriais de alta criticidade, como siderurgia, mineração e petróleo, uma falha pode gerar impactos significativos na segurança, na produção, no meio ambiente e nos custos operacionais (RAUSAND; HØYLAND, 2004). Por esse motivo, a utilização de métodos sistemáticos de investigação torna-se essencial para aumentar disponibilidade, confiabilidade e segurança dos ativos industriais (RAUSAND; HØYLAND, 2004).

Historicamente, os métodos estruturados de análise de falhas ganharam relevância em setores nos quais a confiabilidade dos sistemas era fator decisivo para segurança operacional, como a aviação e aplicações militares (NOWLAN; HEAP, 1978). Segundo Nowlan e Heap (1978), a necessidade de identificar modos de falha críticos e reduzir riscos operacionais contribuiu para o desenvolvimento de metodologias que, posteriormente, passaram a ser aplicadas em diferentes segmentos industriais.

Com a consolidação da Manutenção Centrada na Confiabilidade, a análise de falhas passou a ser tratada como parte fundamental da gestão da manutenção industrial (MOUBRAY, 1997). Segundo Kardec e Nascif (2012), compreender adequadamente as falhas permite reduzir paradas inesperadas, melhorar o desempenho dos equipamentos e direcionar ações de manutenção de maneira mais eficiente.

O STF envolve etapas integradas que normalmente incluem identificação da falha, registro da ocorrência, classificação, investigação das causas, avaliação da criticidade e definição de ações corretivas ou preventivas (BLANCHARD, 2004). A etapa de identificação é fundamental, pois permite reconhecer a ocorrência e registrar informações iniciais sobre o problema observado no equipamento ou processo (KARDEC; NASCIF, 2012).

O registro adequado das falhas contribui para a rastreabilidade das ocorrências e permite construção de um histórico técnico confiável dos ativos industriais (KARDEC; NASCIF, 2012). Esse histórico é importante porque

possibilita observar padrões de repetição, avaliar a frequência das falhas e apoiar a tomada de decisão da equipe de manutenção (WIREMAN, 2005).

Após a identificação e o registro, a falha deve ser classificada de acordo com critérios técnicos e operacionais, como criticidade, frequência, impacto produtivo, risco à segurança e custo associado (BLANCHARD, 2004). Essa classificação permite priorizar os problemas mais relevantes e direcionar recursos de manutenção para os ativos ou falhas que apresentam maior impacto para a operação (WIREMAN, 2005).

A investigação das causas constitui uma das etapas mais importantes do Sistema de Tratamento de Falhas. Essa etapa busca compreender os fatores técnicos, operacionais, humanos e organizacionais que contribuíram para a ocorrência do problema (RAUSAND; HØYLAND, 2004). Segundo Rausand e Høyland (2004), a eliminação das causas fundamentais é essencial para evitar reincidência das falhas e aumentar a confiabilidade dos sistemas industriais.

Entre as ferramentas utilizadas no STF, destaca-se a Análise de Causa Raiz, conhecida como RCA — *Root Cause Analysis*. Essa metodologia busca identificar não apenas a causa imediata da falha, mas também os fatores mais profundos que permitiram sua ocorrência (ROONEY; HEUVEL, 2004). Dessa forma, o RCA contribui para que a empresa deixe de atuar apenas sobre os sintomas do problema e passe a atuar sobre suas causas fundamentais (ROONEY; HEUVEL, 2004).

Outra ferramenta bastante utilizada na investigação de falhas é o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito. Essa ferramenta organiza possíveis causas em categorias como método, mão de obra, máquina, material, meio ambiente e medição, facilitando a análise sistemática do problema (SLACK *et al.*, 2009). Sua aplicação é útil em ambientes industriais porque permite visualizar diferentes fatores que podem estar relacionados à falha observada (SLACK *et al.*, 2009).

A metodologia FMEA — *Failure Mode and Effects Analysis* — também apresenta grande importância no tratamento de falhas industriais. Segundo Palady (1997), o FMEA permite identificar modos de falha potenciais, suas causas, seus efeitos e sua criticidade. Essa ferramenta auxilia na priorização de ações preventivas,

principalmente quando aplicada em equipamentos críticos ou processos de elevada complexidade operacional (PALADY, 1997).

A norma IEC 60812 (2018) estabelece diretrizes para aplicação do FMEA e da FMECA em sistemas industriais. Essa norma orienta a identificação dos modos de falha, avaliação dos efeitos e análise da criticidade, contribuindo para prevenção de falhas e aumento da confiabilidade dos sistemas (IEC 60812, 2018).

Outra técnica relevante é a Árvore de Falhas, conhecida como FTA — *Fault Tree Analysis*. Segundo Vesely *et al.* (2002), essa metodologia utiliza lógica dedutiva para representar combinações de eventos que podem levar à ocorrência de uma falha crítica. A FTA permite compreender como diferentes falhas básicas podem se combinar até gerar um evento indesejado no sistema (VESELY *et al.*, 2002).

A análise de falhas também pode ser complementada por indicadores de desempenho de manutenção. Indicadores como frequência de falhas, MTBF — *Mean Time Between Failures* — e MTTR — *Mean Time To Repair* — permitem avaliar o comportamento dos equipamentos e a efetividade das ações adotadas (WIREMAN, 2005). Esses indicadores são importantes porque transformam dados de manutenção em informações úteis para tomada de decisão (KARDEC; NASCIF, 2012).

No ambiente siderúrgico, o Sistema de Tratamento de Falhas assume elevada importância devido à criticidade dos processos e às severas condições operacionais dos equipamentos (TUPKARY; TUPKARY, 2017). Equipamentos siderúrgicos operam sob altas temperaturas, cargas elevadas, vibrações e ambientes abrasivos, fatores que aumentam a probabilidade de falhas e exigem controle rigoroso da manutenção (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2004).

As pontes rolantes utilizadas em aciarias são equipamentos essenciais para movimentação de cargas pesadas e materiais em altas temperaturas (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2004). Por atuarem diretamente no fluxo produtivo e na movimentação de cargas críticas, esses equipamentos exigem elevados padrões de confiabilidade, disponibilidade e segurança operacional (KARDEC; NASCIF, 2012).

Dentro desses sistemas, os cabos de aço representam componentes fundamentais para o içamento e movimentação de cargas. Segundo Costello (1997), esses cabos estão sujeitos a mecanismos de degradação como fadiga, desgaste abrasivo, corrosão, torção e sobrecarga. A ocorrência dessas degradações pode

comprometer a integridade estrutural do cabo e elevar o risco de falhas durante a operação (COSTELLO, 1997).

Falhas em cabos de aço podem provocar acidentes graves, interrupções produtivas e danos estruturais significativos (COSTELLO, 1997). Por isso, a aplicação de um Sistema de Tratamento de Falhas torna-se relevante para identificar causas, avaliar condições operacionais e propor ações preventivas direcionadas à confiabilidade do equipamento (SMITH; HINCHCLIFFE, 2011).

Segundo Smith e Hinchcliffe (2011), sistemas estruturados de análise de falhas contribuem para o desenvolvimento de uma inteligência operacional dentro das organizações. Essa inteligência é construída a partir do registro, análise e tratamento das ocorrências, permitindo reduzir falhas recorrentes e aumentar a maturidade dos processos de manutenção (SMITH; HINCHCLIFFE, 2011).

Outro benefício do STF está relacionado à rastreabilidade das ocorrências industriais. Segundo Silva (2013), o registro estruturado das falhas possibilita construir histórico técnico detalhado dos equipamentos. Esse histórico auxilia no planejamento das intervenções, na tomada de decisão e na melhoria contínua dos processos de manutenção (SILVA, 2013).

Além dos aspectos técnicos, o STF também contribui diretamente para a segurança operacional. Conforme Kardec e Nascif (2012), a análise sistemática de falhas permite identificar riscos antes da ocorrência de acidentes. Em operações críticas, como movimentação de cargas pesadas em ambientes siderúrgicos, essa antecipação é fundamental para preservar a integridade dos trabalhadores e dos equipamentos (TUPKARY; TUPKARY, 2017).

Com o avanço das tecnologias digitais, os sistemas de tratamento de falhas passaram a incorporar ferramentas inteligentes de monitoramento e análise de dados operacionais (LEE *et al.*, 2014). Segundo Psarommatis *et al.* (2025), a utilização de inteligência artificial, sensores inteligentes e big data amplia a capacidade de prever falhas e identificar padrões de degradação em equipamentos industriais.

Sistemas informatizados de gestão da manutenção permitem registrar falhas, armazenar históricos operacionais e integrar informações em tempo real (CARVALHO *et al.*, 2020). Essa integração contribui para maior eficiência na

análise das ocorrências e permite que as decisões de manutenção sejam tomadas com base em dados mais consistentes (CARVALHO *et al.*, 2020).

Outro aspecto relevante está relacionado à integração entre manutenção e gestão da qualidade. Organizações que utilizam sistemas estruturados de tratamento de falhas conseguem reduzir desperdícios, melhorar processos e aumentar a confiabilidade dos produtos e equipamentos (SLACK *et al.*, 2009). Essa integração fortalece a melhoria contínua e aproxima a manutenção dos objetivos estratégicos da empresa (KARDEC; NASCIF, 2012).

A eficiência do STF também depende da capacitação técnica das equipes envolvidas. Segundo Alsyounf (2007), profissionais qualificados possuem maior capacidade de identificar anomalias, interpretar dados operacionais e propor ações corretivas eficazes. Dessa forma, o desempenho do sistema de tratamento de falhas depende tanto das ferramentas utilizadas quanto da preparação dos profissionais responsáveis pela análise (ALSYOUNF, 2007).

No contexto deste trabalho, o Sistema de Tratamento de Falhas representa uma ferramenta fundamental para análise das falhas em cabos de aço utilizados em pontes rolantes siderúrgicas. Sua aplicação permite compreender causas, avaliar impactos operacionais e propor melhorias nos processos de manutenção e confiabilidade dos equipamentos industriais (COSTELLO, 1997; ABNT NBR ISO 4309, 2018).

Portanto, o STF configura-se como uma ferramenta estratégica para organizações que buscam elevar seus níveis de confiabilidade, segurança e eficiência operacional (KARDEC; NASCIF, 2012). Em equipamentos críticos, como pontes rolantes siderúrgicas, sua aplicação contribui para redução de falhas, aumento da disponibilidade operacional e fortalecimento da melhoria contínua dos processos industriais (SMITH; HINCHCLIFFE, 2011).

Dessa forma, os tópicos apresentados nesta revisão bibliográfica forneceram a fundamentação teórica necessária para compreender a importância da manutenção industrial, dos métodos de manutenção e do Sistema de Tratamento de Falhas aplicados em ambientes siderúrgicos (KARDEC; NASCIF, 2012). O tópico referente à manutenção permitiu compreender sua evolução histórica, sua relevância estratégica e sua relação com confiabilidade, segurança e desempenho operacional

dos ativos industriais (TSANG, 2002; KELLY, 2006). O estudo dos métodos de manutenção possibilitou analisar diferentes estratégias utilizadas na indústria, destacando aplicações, vantagens e limitações em equipamentos críticos, como pontes rolantes e cabos de aço (MOBLEY, 2002; MOUBRAY, 1997). Por fim, o tópico relacionado ao Sistema de Tratamento de Falhas forneceu embasamento para compreensão das metodologias utilizadas na identificação, análise e mitigação de falhas industriais, contribuindo diretamente para análise das falhas em cabos de aço e para proposição de melhorias nos processos de manutenção e confiabilidade operacional dos equipamentos siderúrgicos (SMITH; HINCHCLIFFE, 2011; COSTELLO, 1997).

2.3.1 Diagrama de Ishikawa

O Diagrama de Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito ou Diagrama Espinha de Peixe, é uma ferramenta amplamente utilizada para identificar, organizar e analisar as possíveis causas associadas a um problema. Desenvolvido por Kaoru Ishikawa na década de 1960, o método tem como objetivo estruturar o processo de investigação, permitindo visualizar de forma sistemática os fatores que podem contribuir para a ocorrência de uma falha (ISHIKAWA, 1993).

Segundo Ishikawa (1993), o diagrama possibilita organizar as possíveis causas de um problema em categorias, favorecendo a análise das relações entre os diferentes fatores envolvidos e direcionando a equipe para a investigação das causas fundamentais. Na indústria, essa ferramenta é amplamente empregada em programas de qualidade, melhoria contínua e análise de falhas, por facilitar a identificação das variáveis que influenciam o desempenho dos processos produtivos.

De acordo com Werkema (2012), o Diagrama de Ishikawa constitui uma importante ferramenta da qualidade por permitir que equipes multidisciplinares realizem o levantamento estruturado das possíveis causas de um problema antes da adoção de ações corretivas. Dessa forma, evita-se que decisões sejam tomadas com base apenas nos sintomas observados, aumentando a confiabilidade da análise.

Na engenharia de manutenção, o Diagrama de Ishikawa é frequentemente utilizado como etapa inicial da investigação de falhas, auxiliando na organização das hipóteses relacionadas aos aspectos de material, máquina, método, mão de obra, meio ambiente e medição. Essa abordagem permite avaliar de maneira abrangente os

fatores que podem contribuir para a ocorrência de uma falha, servindo como suporte para a aplicação de metodologias de identificação da causa raiz, como a *Root Cause Analysis* (RCA) (SMITH; HINCHCLIFFE, 2011; KARDEC; NASCIF, 2012).

2.3.2 Análise de Causa Raiz

A Análise de Causa Raiz (*Root Cause Analysis* – RCA) consiste em um conjunto de métodos empregados para identificar as causas fundamentais de um problema, buscando eliminar sua origem e evitar sua recorrência, em vez de apenas corrigir seus efeitos imediatos (SMITH; HINCHCLIFFE, 2011). Essa abordagem é amplamente utilizada na engenharia de manutenção, confiabilidade e gestão de ativos, especialmente na investigação de falhas em equipamentos industriais (KARDEC; NASCIF, 2012).

Segundo Smith e Hinchcliffe (2011), a RCA baseia-se na investigação sistemática dos eventos que antecederam a falha, estabelecendo relações de causa e efeito entre fatores técnicos, operacionais e organizacionais. O objetivo da metodologia é identificar a sequência de eventos que levou à ocorrência da falha, permitindo que as ações corretivas sejam direcionadas às causas fundamentais, reduzindo a probabilidade de reincidência do problema.

De acordo com Kardec e Nascif (2012), a eficácia da Análise de Causa Raiz depende da coleta adequada de evidências, incluindo registros de operação, inspeções, histórico de manutenção, análises laboratoriais e informações obtidas durante a investigação da falha. Os autores ressaltam que decisões baseadas apenas nos sintomas observados tendem a resultar em intervenções paliativas, enquanto a identificação da causa raiz possibilita a implementação de ações corretivas permanentes.

Smith e Hinchcliffe (2011) destacam ainda que a RCA não corresponde a uma única ferramenta, mas a uma metodologia estruturada que pode incorporar diferentes técnicas de apoio, como o Diagrama de Ishikawa, os "5 Porquês", Árvores de Falhas (*Fault Tree Analysis* – FTA), análise de modos de falha e outras ferramentas de investigação. A seleção da técnica depende da complexidade do problema, da disponibilidade de informações e do nível de detalhamento desejado para a investigação.

Na análise de falhas em equipamentos de movimentação de cargas, a RCA tem sido empregada para correlacionar as evidências observadas durante as inspeções com as condições reais de operação, permitindo identificar fatores relacionados ao projeto, à seleção de componentes, às condições de carregamento, à manutenção e aos procedimentos operacionais (GUERRA-FUENTES et al., 2020; TORKAR; ARZENSEK, 2002). Essa abordagem possibilita compreender a sequência de degradação do componente e estabelecer ações corretivas voltadas à eliminação da causa da falha, e não apenas à substituição do elemento danificado.

2.3.3 Análise de Falhas em cabos de aço

Os cabos de aço são amplamente empregados em equipamentos de movimentação de cargas devido à elevada resistência mecânica, flexibilidade e capacidade de suportar esforços axiais e de flexão. Entretanto, durante sua vida útil, esses componentes estão sujeitos a diferentes mecanismos de degradação que podem comprometer sua integridade estrutural e reduzir sua confiabilidade operacional, tornando indispensável a realização de análises de falhas para identificar os mecanismos envolvidos e prevenir recorrências (TORKAR; ARZENSEK, 2002; GUERRA-FUENTES et al., 2020).

Segundo Torkar e Arzensek (2002), a falha de cabos de aço normalmente não ocorre de forma instantânea, mas resulta da evolução progressiva de danos nos arames individuais. Os autores destacam que o aparecimento de fios rompidos constitui um indicativo da propagação de danos por fadiga, sendo fundamental que os procedimentos de inspeção identifiquem esses sinais antes que a resistência global do cabo seja comprometida. Além da quantidade de fios rompidos, outros mecanismos de degradação, como desgaste, deformações e danos mecânicos, também devem ser considerados durante a avaliação da condição do cabo.

No estudo realizado por Torkar e Arzensek (2002), envolvendo um cabo de aço utilizado em uma ponte rolante, a investigação incluiu inspeção visual, análises metalográficas, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaios mecânicos. As análises evidenciaram que a fratura dos arames apresentava características típicas de fadiga, com propagação gradual de trincas iniciadas na superfície dos fios. Os autores observaram ainda a presença de pequenas trincas superficiais originadas

durante o processo de fabricação, que atuaram como pontos de concentração de tensões e favoreceram a nucleação e propagação das trincas durante os carregamentos cíclicos impostos ao cabo.

Os resultados também demonstraram que a ruptura do cabo ocorreu em consequência do aumento progressivo do número de arames rompidos. À medida que esses fios deixavam de suportar parte da carga, os esforços eram redistribuídos para os arames remanescentes, acelerando o processo de fadiga até a ruptura completa do cabo. Como conclusão, os autores atribuíram a falha à combinação entre fadiga acelerada e inspeções insuficientes, ressaltando a importância do monitoramento periódico para evitar falhas catastróficas.

Em estudo mais recente, Guerra-Fuentes et al. (2020) investigaram a falha de um cabo de aço utilizado em uma ponte rolante com capacidade de 12 toneladas, que apresentou ruptura catastrófica após apenas 53 dias de operação, período significativamente inferior à vida útil esperada para essa aplicação. Para a investigação foram empregadas inspeção visual, análise estereoscópica, microscopia eletrônica de varredura e ensaios de microdureza, além da análise das condições operacionais do equipamento.

Durante as inspeções, os autores identificaram desgaste acentuado, deformações localizadas, fraturas distribuídas ao longo do cabo e degradação da lubrificação provocada pelo acúmulo de pó de papel proveniente do processo industrial. Segundo Guerra-Fuentes et al. (2020), a perda da eficiência da lubrificação favoreceu o aumento do atrito entre os arames e intensificou o desgaste mecânico, criando regiões de concentração de tensões que aceleraram o processo de fadiga.

As análises fractográficas mostraram que o mecanismo de falha iniciou-se pelo desgaste e pela deformação plástica localizada dos arames externos. Essas regiões sofreram endurecimento localizado (work hardening), favorecendo o surgimento e a propagação de trincas por fadiga durante os ciclos de carregamento impostos pelo sistema de elevação. Com a ruptura gradual dos arames externos, ocorreu redistribuição das cargas para os fios remanescentes, resultando em fraturas frágeis também nos arames da região central do cabo até a ruptura completa do conjunto.

Os autores concluíram que a falha não foi consequência de um único mecanismo, mas da interação entre desgaste, deformação plástica, concentração de tensões, fadiga e condições operacionais do sistema de movimentação. Além disso, destacaram que fatores relacionados à manutenção, às condições de lubrificação, à inspeção periódica e à adequação do cabo às condições de serviço exercem influência direta sobre a vida útil desses componentes. Como recomendações, propuseram a definição das condições reais de carregamento, o controle adequado da lubrificação e o estabelecimento de procedimentos sistemáticos de inspeção preventiva.

Em conjunto, os dois estudos demonstram que as falhas em cabos de aço empregados em pontes rolantes apresentam natureza multifatorial, sendo frequentemente associadas à interação entre desgaste mecânico, fadiga, concentração de tensões e condições de operação. Ambos os trabalhos também evidenciam que a utilização de técnicas complementares de investigação, como inspeção visual, análises metalográficas e microscopia eletrônica de varredura, permite compreender a sequência de degradação do cabo e identificar a causa predominante da falha, fornecendo subsídios para a adoção de ações corretivas capazes de aumentar a confiabilidade e a segurança operacional dos sistemas de movimentação de cargas (TORKAR; ARZENSEK, 2002; GUERRA-FUENTES et al., 2020).

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de Pesquisa

A pesquisa científica pode ser compreendida como um procedimento racional e sistemático utilizado para produção de conhecimento e resolução de problemas por meio da aplicação de métodos científicos, conforme definido por Gil (2002). Segundo Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa possui papel fundamental na construção do conhecimento científico, permitindo investigar fenômenos e compreender situações específicas de forma estruturada e organizada.

Nesse contexto, a definição da metodologia representa uma etapa essencial para desenvolvimento do estudo, pois estabelece os procedimentos utilizados para coleta, análise e interpretação dos dados. De acordo com Prodanov e Freitas (2013), a metodologia da pesquisa envolve escolha de abordagens, tipos de pesquisa e procedimentos técnicos adequados ao objeto investigado e aos objetivos propostos.

A classificação da pesquisa pode ser realizada a partir de diferentes critérios metodológicos, sendo os mais utilizados aqueles relacionados à abordagem do problema, aos objetivos do estudo e aos procedimentos técnicos empregados (GIL, 2002). Segundo Lakatos e Marconi (2010), essa classificação contribui para organização lógica do trabalho científico e para alinhamento entre objetivos, métodos e resultados esperados.

Dessa forma, a pesquisa desenvolvida neste trabalho foi classificada considerando abordagem, objetivos e procedimentos técnicos relacionados à análise das falhas em cabos de aço utilizados em pontes rolantes no ambiente siderúrgico.

Quanto à abordagem, a pesquisa caracteriza-se como qualitativa, pois busca compreender tecnicamente os fenômenos relacionados às falhas, às condições operacionais e aos processos de manutenção envolvidos no estudo. Segundo Minayo (2001), a pesquisa qualitativa trabalha com interpretação de fenômenos complexos inseridos em contextos específicos, valorizando análise de processos, relações e significados.

No presente trabalho, a análise não se limita apenas à quantificação de dados, mas envolve interpretação técnica das condições operacionais, dos modos de falha observados e dos fatores que contribuem para degradação dos cabos de aço utilizados

nas pontes rolantes. Conforme destacam Prodanov e Freitas (2013), a abordagem qualitativa mostra-se adequada quando o objetivo da pesquisa está relacionado à compreensão aprofundada dos fenômenos analisados.

Quanto aos objetivos, esta pesquisa classifica-se como exploratória. Segundo Gil (2002), a pesquisa exploratória possui finalidade de proporcionar maior familiaridade com o problema estudado, permitindo ampliar compreensão sobre o tema e desenvolver novas perspectivas relacionadas ao objeto de estudo.

Esse enquadramento metodológico apresenta alinhamento com o presente trabalho, uma vez que o estudo busca compreender aplicação de um Sistema de Tratamento de Falhas voltado para análise das falhas em cabos de aço de pontes rolantes em ambiente siderúrgico. Trata-se de um tema que exige aprofundamento técnico e análise integrada entre manutenção, confiabilidade operacional e comportamento dos componentes mecânicos utilizados no processo produtivo.

Além disso, o caráter exploratório da pesquisa permite investigar fatores relacionados às condições operacionais, aos mecanismos de degradação e às possíveis causas das falhas observadas nos cabos de aço, contribuindo para identificação de oportunidades de melhoria nos processos de manutenção e segurança operacional (GIL, 2002).

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa utiliza diferentes estratégias metodológicas complementares. Inicialmente, caracteriza-se como pesquisa bibliográfica, pois utiliza livros, artigos científicos, normas técnicas e publicações especializadas para fundamentação teórica dos conceitos relacionados à manutenção industrial, métodos de manutenção e sistemas de tratamento de falhas (GIL, 2002).

Segundo Lakatos e Marconi (2010), a pesquisa bibliográfica permite ao pesquisador estabelecer contato com conhecimentos já produzidos sobre determinado tema, contribuindo para construção do referencial teórico e para sustentação científica da pesquisa.

Além disso, o trabalho também se caracteriza como pesquisa documental, uma vez que utiliza documentos técnicos, registros operacionais, históricos de manutenção, relatórios de falhas e demais informações relacionadas aos equipamentos analisados. Conforme Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa documental utiliza materiais que ainda não receberam tratamento analítico

aprofundado, permitindo obtenção de informações diretamente relacionadas ao ambiente estudado.

A utilização desses documentos torna-se importante para compreensão do comportamento operacional das pontes rolantes e dos cabos de aço analisados, possibilitando identificar padrões de falha, histórico de intervenções de manutenção e condições operacionais associadas às ocorrências registradas.

O trabalho assume ainda características de estudo de caso, pois analisa de forma aprofundada um fenômeno específico inserido em seu contexto real de aplicação. Segundo Yin (2015), o estudo de caso é indicado quando se pretende investigar fenômenos contemporâneos dentro de contextos reais, principalmente quando os limites entre fenômeno e contexto não estão claramente definidos.

No presente estudo, o fenômeno analisado corresponde à aplicação do Sistema de Tratamento de Falhas em cabos de aço utilizados em pontes rolantes siderúrgicas. A utilização do estudo de caso permite compreender de forma integrada as condições operacionais dos equipamentos, os mecanismos de degradação observados e as práticas de manutenção relacionadas ao sistema analisado.

Segundo Yin (2015), o estudo de caso permite investigar fenômenos complexos de maneira detalhada e contextualizada, favorecendo compreensão aprofundada das relações existentes entre operação, manutenção e comportamento dos equipamentos industriais.

Dessa forma, observa-se que a metodologia adotada apresenta alinhamento com os objetivos propostos neste trabalho, uma vez que possibilita compreender fenômenos relacionados às falhas em cabos de aço de pontes rolantes dentro do contexto operacional siderúrgico. A combinação entre pesquisa qualitativa, exploratória, bibliográfica, documental e estudo de caso proporciona uma base metodológica consistente para análise técnica das falhas e para avaliação das estratégias de manutenção aplicadas aos equipamentos estudados (GIL, 2002; YIN, 2015).

Além disso, a utilização dessas abordagens metodológicas permite não apenas compreender comportamento das falhas observadas, mas também identificar fatores operacionais relacionados à degradação dos componentes, contribuindo para desenvolvimento de propostas de melhoria voltadas à confiabilidade, segurança e

continuidade operacional dos sistemas industriais analisados (MINAYO, 2001; PRODANOV; FREITAS, 2013).

3.2 Materiais e Métodos

A aplicação do Sistema de Tratamento de Falhas para análise dos cabos de aço da ponte rolante exigiu integração de informações técnicas, operacionais e históricas do equipamento, associadas a métodos reconhecidos de análise de falhas e manutenção industrial (KARDEC; NASCIF, 2012). Segundo Smith e Hinchcliffe (2011), a análise estruturada de falhas depende da utilização de procedimentos sistemáticos capazes de integrar dados operacionais, registros históricos e avaliação técnica dos componentes analisados. A sequência das etapas adotadas nesta pesquisa é apresentada na Figura 1, que ilustra o fluxograma dos materiais e métodos utilizados para condução do estudo.

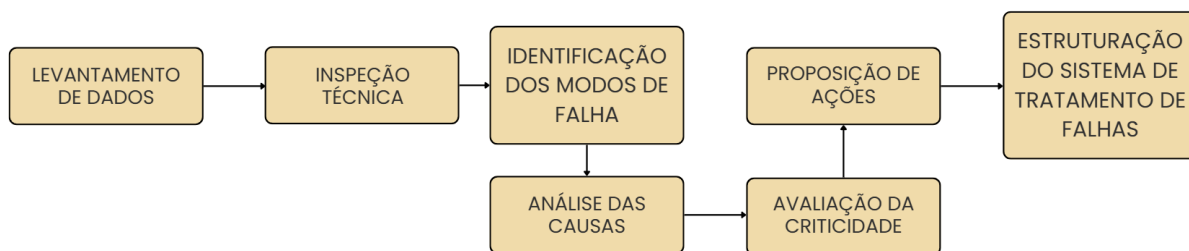


Figura 1: Fluxograma de Materiais e Métodos
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

O procedimento metodológico adotado neste trabalho foi estruturado em etapas sequenciais, permitindo aplicação sistemática do Sistema de Tratamento de Falhas aos cabos de aço da ponte rolante.

A etapa inicial corresponde ao levantamento de dados, envolvendo coleta de informações técnicas, operacionais e históricas do equipamento, como registros de manutenção, histórico de falhas e condições operacionais observadas. Segundo Kardec e Nascif (2012), qualidade da análise de falhas depende diretamente da confiabilidade e abrangência das informações coletadas, tornando essa etapa fundamental para desenvolvimento de diagnósticos consistentes.

Na sequência, realizou-se inspeção técnica dos cabos de aço, com objetivo de avaliar condições físicas dos componentes por meio de observações em campo,

medições e identificação de defeitos visíveis, como desgaste, corrosão, deformações e rompimento de arames. Segundo Mobley (2002), a inspeção técnica constitui uma das principais ferramentas da manutenção preditiva, permitindo identificar indícios de falha antes da ocorrência de falhas catastróficas.

A partir das informações coletadas, procedeu-se à identificação dos modos de falha, etapa responsável por caracterizar formas pelas quais o componente pode falhar, incluindo ruptura por fadiga, torção, desgaste e falhas estruturais. Conforme Palady (1997), identificação dos modos de falha representa um dos pilares da metodologia FMEA, sendo indispensável para compreensão das vulnerabilidades dos componentes industriais.

Posteriormente, realizou-se análise das causas das falhas observadas. Essa etapa buscou identificar fatores técnicos, operacionais e organizacionais relacionados às ocorrências registradas. Segundo Rausand e Høyland (2004), determinação das causas fundamentais constitui etapa essencial para evitar reincidência das falhas e aumentar confiabilidade operacional dos sistemas industriais.

A investigação das causas pode envolver utilização de ferramentas como análise de causa raiz (RCA) e Diagrama de Ishikawa, amplamente aplicados na engenharia de manutenção para identificação das relações entre falhas e fatores contribuintes (SLACK *et al.*, 2009).

Após análise das causas, desenvolveu-se avaliação da criticidade das falhas, considerando impactos relacionados à segurança operacional, custos de manutenção, disponibilidade do equipamento e continuidade produtiva. Segundo Smith e Hinchcliffe (2011), análise de criticidade permite priorizar ações de manutenção com base nos riscos associados às falhas observadas.

Com base nessa avaliação, realizou-se proposição de ações corretivas, preventivas e preditivas voltadas para mitigação ou eliminação das falhas identificadas. Segundo Moubray (1997), definição de ações eficazes representa um dos principais objetivos da manutenção centrada na confiabilidade, buscando garantir função operacional do ativo com menor custo e maior segurança.

Por fim, estruturou-se o Sistema de Tratamento de Falhas, integrando todas as etapas anteriores em modelo organizado e sistemático de análise e gestão das falhas observadas. Conforme Psarommatis *et al.* (2025), sistemas estruturados de

tratamento de falhas contribuem significativamente para aumento da confiabilidade operacional, redução de falhas recorrentes e melhoria da segurança industrial.

3.3 Variáveis e Indicadores

A definição de variáveis e indicadores representa etapa fundamental no desenvolvimento de pesquisas científicas aplicadas à engenharia, principalmente em estudos relacionados à análise de desempenho e confiabilidade de equipamentos industriais. Segundo Prodanov e Freitas (2013), as variáveis correspondem às características ou elementos do objeto de estudo que podem ser observados, analisados ou mensurados durante desenvolvimento da pesquisa.

Segundo Kardec e Nascif (2012), a gestão da manutenção depende da avaliação contínua das condições operacionais dos equipamentos e do acompanhamento das informações obtidas durante as inspeções e análises de falhas. Nesse contexto, as variáveis analisadas neste estudo estão relacionadas às condições operacionais, ao estado físico dos componentes e às características das falhas observadas.

Por sua vez, os indicadores correspondem a métricas derivadas das variáveis analisadas, sendo utilizados para monitorar, avaliar e interpretar desempenho dos sistemas industriais. Segundo Wireman (2005), indicadores de manutenção representam ferramentas essenciais para medição da eficiência, confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos industriais.

A utilização conjunta de variáveis e indicadores permite estruturar análise técnica do Sistema de Tratamento de Falhas, contribuindo para identificação de padrões, avaliação do comportamento das falhas e compreensão dos impactos operacionais associados às ocorrências observadas.

No presente estudo, as variáveis analisadas estão relacionadas aos tipos de falha identificados, às condições de desgaste, aos históricos de manutenção e aos impactos operacionais provocados pelas falhas observadas. Essas variáveis permitem organizar informações técnicas relacionadas ao comportamento dos componentes analisados.

Os indicadores associados às variáveis permitem apoiar aplicação do Sistema de Tratamento de Falhas, fornecendo base técnica para análise das falhas em cabos

de aço e para tomada de decisão relacionada à manutenção do equipamento (WIREMAN, 2005).

Tabela 1: Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Sistema de tratamento de falhas	Identificação e Registro de Falhas; Análise de Falhas; Recorrência de Falhas; Eficiência das Ações; Impacto Operacional; Gestão do STF.

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

3.4 Instrumento de coleta de dados

A definição dos instrumentos de coleta de dados representa etapa fundamental da pesquisa científica, pois permite obtenção de informações consistentes, confiáveis e adequadas aos objetivos do estudo. Segundo Gil (2002), os instrumentos de coleta de dados correspondem aos meios utilizados pelo pesquisador para registrar, organizar e analisar informações relacionadas ao fenômeno investigado.

De acordo com Prodanov e Freitas (2013), escolha adequada dos instrumentos de coleta está diretamente relacionada à qualidade dos resultados obtidos, devendo apresentar alinhamento com tipo de pesquisa, objetivos propostos e características do objeto analisado.

No contexto deste trabalho, voltado à análise de falhas em cabos de aço de pontes rolantes siderúrgicas, foram utilizados diferentes instrumentos de coleta de dados de forma complementar, buscando garantir abordagem técnica abrangente do fenômeno analisado.

O checklist, também denominado ficha de inspeção técnica, foi utilizado como ferramenta estruturada para avaliação das condições físicas dos cabos de aço

em campo. Segundo Kardec e Nascif (2012), padronização das inspeções constitui fator essencial para gestão eficiente da manutenção, permitindo comparabilidade entre avaliações e melhor controle das condições operacionais dos ativos industriais.

O modelo de checklist utilizado contempla itens relacionados à presença de arames rompidos, desgaste abrasivo, corrosão, deformações e alterações dimensionais observadas nos cabos de aço durante inspeções técnicas.

Outro instrumento utilizado correspondeu à análise documental, baseada em registros internos da empresa, históricos de manutenção, relatórios técnicos e ordens de serviço. Segundo Prodanov e Freitas (2013), pesquisa documental utiliza fontes já existentes, sendo importante para estudos relacionados à análise de dados operacionais e históricos industriais.

A utilização desses documentos possibilitou identificação de padrões de falha, análise de recorrência das ocorrências e avaliação das condições operacionais associadas ao equipamento estudado.

O registro fotográfico também foi empregado como instrumento complementar de coleta de dados, permitindo documentar visualmente condições dos cabos de aço e falhas identificadas durante inspeções em campo. Segundo Lakatos e Marconi (2010), registros visuais auxiliam validação das observações realizadas e contribuem para enriquecimento da análise qualitativa.

A planilha de variáveis e indicadores foi utilizada para organização sistemática dos dados coletados, permitindo cruzamento de informações e identificação de padrões relacionados às falhas observadas. Conforme Wireman (2005), utilização de indicadores estruturados contribui para avaliação de desempenho e tomada de decisão nos processos de manutenção industrial.

Além disso, utilizou-se observação direta em campo para compreensão das condições reais de operação da ponte rolante e sua relação com as falhas identificadas nos cabos de aço. Segundo Gil (2002), observação direta constitui método importante para compreensão dos fenômenos em seu contexto natural de ocorrência.

A utilização combinada desses instrumentos possibilitou análise abrangente e estruturada do Sistema de Tratamento de Falhas aplicado aos cabos de aço da ponte rolante, garantindo maior confiabilidade das informações utilizadas na pesquisa.

3.5 Tabulação dos dados

Após coleta das informações obtidas por meio das inspeções técnicas, análise documental, observações em campo e registros fotográficos, os dados foram organizados e compilados para possibilitar análise estruturada das falhas observadas nos cabos de aço da ponte rolante.

Segundo Prodanov e Freitas (2013), tabulação dos dados corresponde ao processo de organização e estruturação das informações coletadas, permitindo facilitar interpretação, análise e apresentação dos resultados obtidos na pesquisa.

O Microsoft Excel foi utilizado como principal ferramenta para tabulação dos dados, permitindo organização das variáveis e indicadores definidos no estudo, bem como classificação das informações relacionadas aos tipos de falha, frequência de ocorrência, condições operacionais e impactos associados às falhas identificadas.

A ferramenta possibilitou elaboração de tabelas, filtros e cruzamento das informações coletadas, contribuindo para melhor visualização dos padrões de falha observados nos cabos de aço analisados.

O Microsoft Word foi utilizado para organização descritiva dos resultados, consolidação das informações e apresentação das tabelas e registros fotográficos no corpo do trabalho. Além disso, os registros fotográficos foram organizados digitalmente e vinculados às análises correspondentes, contribuindo para rastreabilidade das ocorrências identificadas durante inspeções técnicas.

Dessa forma, utilização dessas ferramentas permitiu padronização da tabulação dos dados, garantindo melhor controle das informações e suporte adequado à análise do Sistema de Tratamento de Falhas aplicado aos cabos de aço da ponte rolante.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os procedimentos metodológicos adotados para desenvolvimento da pesquisa, contemplando classificação da pesquisa, materiais e métodos, variáveis e indicadores, instrumentos de coleta e forma de tabulação dos dados utilizados no estudo.

As técnicas e ferramentas selecionadas apresentam alinhamento com os objetivos propostos, permitindo aplicação estruturada do Sistema de Tratamento de Falhas e análise das falhas observadas em cabos de aço utilizados em pontes rolantes no ambiente siderúrgico (KARDEC; NASCIF, 2012).

A definição das variáveis, indicadores e instrumentos de coleta possibilitou organização padronizada das informações, fornecendo base técnica para análise das ocorrências e avaliação das condições operacionais e de manutenção do equipamento estudado (WIREMAN, 2005).

No capítulo seguinte são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do Sistema de Tratamento de Falhas, incluindo análise das falhas identificadas, avaliação das causas prováveis e discussão dos impactos relacionados ao desempenho e à confiabilidade operacional do equipamento analisado (SMITH; HINCHCLIFFE, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Características da empresa

A empresa analisada neste estudo atua no setor siderúrgico e possui operações voltadas para a produção e transformação do aço, atendendo diferentes segmentos do mercado industrial. Seu processo produtivo é caracterizado por operações contínuas, elevado fluxo de materiais e utilização intensiva de equipamentos de grande porte, que atuam de forma integrada para garantir o atendimento das demandas de produção.

Por se tratar de uma indústria de base, a continuidade operacional dos equipamentos exerce influência direta sobre a produtividade, a qualidade dos produtos e os resultados da organização. Dessa forma, a empresa mantém uma estrutura voltada para o controle dos processos produtivos, manutenção dos ativos, segurança operacional e melhoria contínua das operações.

As atividades desenvolvidas envolvem diferentes etapas de transformação metalúrgica, desde o recebimento das matérias-primas até a expedição dos produtos acabados. Durante esse processo, ocorre intensa movimentação de materiais entre as áreas produtivas, tornando indispensável a utilização de equipamentos de transporte e elevação de cargas.

Além das atividades diretamente ligadas à produção, a empresa desenvolve ações relacionadas à manutenção industrial, engenharia, inspeção de equipamentos, controle de qualidade, logística e segurança do trabalho. Essas áreas atuam de forma integrada para garantir o funcionamento adequado dos processos e a confiabilidade dos ativos industriais.

Nesse contexto, os sistemas de movimentação de cargas assumem papel estratégico dentro da operação, uma vez que são responsáveis pelo transporte de materiais utilizados ao longo do processo produtivo. Entre esses equipamentos, destacam-se as pontes rolantes, objeto de interesse deste estudo.

4.1.1 Atividades da Empresa

As atividades da empresa estão relacionadas principalmente à produção siderúrgica, envolvendo operações de recebimento de matérias-primas,

processamento metalúrgico, movimentação de materiais e fabricação de produtos destinados a diferentes aplicações industriais.

As operações produtivas são realizadas de forma contínua e exigem elevada disponibilidade dos equipamentos para garantir o atendimento das metas de produção. Dessa forma, a movimentação eficiente de materiais entre as diferentes etapas do processo torna-se um fator essencial para o desempenho operacional da planta.

Além da produção, a empresa realiza atividades de manutenção mecânica, elétrica e de automação, inspeções periódicas dos equipamentos, monitoramento das condições operacionais, gestão da qualidade e segurança do trabalho. Essas atividades têm como objetivo reduzir falhas, aumentar a confiabilidade dos equipamentos e garantir maior estabilidade dos processos produtivos.

A logística interna também possui grande importância dentro da organização, sendo responsável pelo transporte e abastecimento de materiais entre as áreas operacionais. Para isso, são utilizados equipamentos de movimentação de cargas que operam continuamente durante as atividades da planta industrial.

4.1.2 Processo Produtivo da Empresa

O processo produtivo da empresa é composto por diferentes etapas integradas que transformam matérias-primas metálicas em produtos siderúrgicos destinados ao mercado.

Inicialmente ocorre o recebimento e a preparação das matérias-primas utilizadas na produção do aço. Após essa etapa, os materiais seguem para os processos de fusão e refino, nos quais são ajustadas as características químicas e metalúrgicas necessárias para obtenção do produto desejado.

Em seguida, o aço líquido é direcionado para o processo de lingotamento, onde ocorre sua solidificação em formatos semiacabados. Posteriormente, esses materiais passam por operações de conformação mecânica e acabamento, sendo transformados em produtos com diferentes dimensões e aplicações.

Durante todas essas etapas ocorre intensa movimentação de materiais, exigindo a utilização constante de equipamentos de transporte e elevação de cargas.

Dessa forma, a disponibilidade operacional desses equipamentos influencia diretamente o desempenho do processo produtivo.

Por esse motivo, falhas em equipamentos de movimentação podem gerar impactos significativos na produção, aumentando tempos de parada e reduzindo a eficiência operacional da planta.

4.1.3 Principais Produtos

A empresa produz diferentes tipos de produtos siderúrgicos destinados a diversos setores da economia. Entre os principais produtos fabricados destacam-se barras, perfis estruturais, chapas, bobinas, vergalhões e outros produtos metálicos utilizados em aplicações industriais e estruturais.

Esses materiais são empregados principalmente nos setores de construção civil, mineração, infraestrutura, indústria automotiva, fabricação mecânica e geração de energia.

A diversidade de aplicações exige rigoroso controle de qualidade ao longo do processo produtivo, garantindo que os produtos atendam aos requisitos técnicos e às especificações exigidas pelos clientes.

Além das propriedades mecânicas, características como resistência, conformabilidade, soldabilidade e durabilidade são fatores importantes para o desempenho dos produtos fabricados pela empresa.

4.1.4 Organograma da Empresa

A estrutura organizacional da empresa é composta por diferentes áreas que atuam de forma integrada para garantir o funcionamento adequado das operações industriais. A Figura 2 apresenta um organograma simplificado da estrutura organizacional relacionada às atividades produtivas e de suporte da empresa.

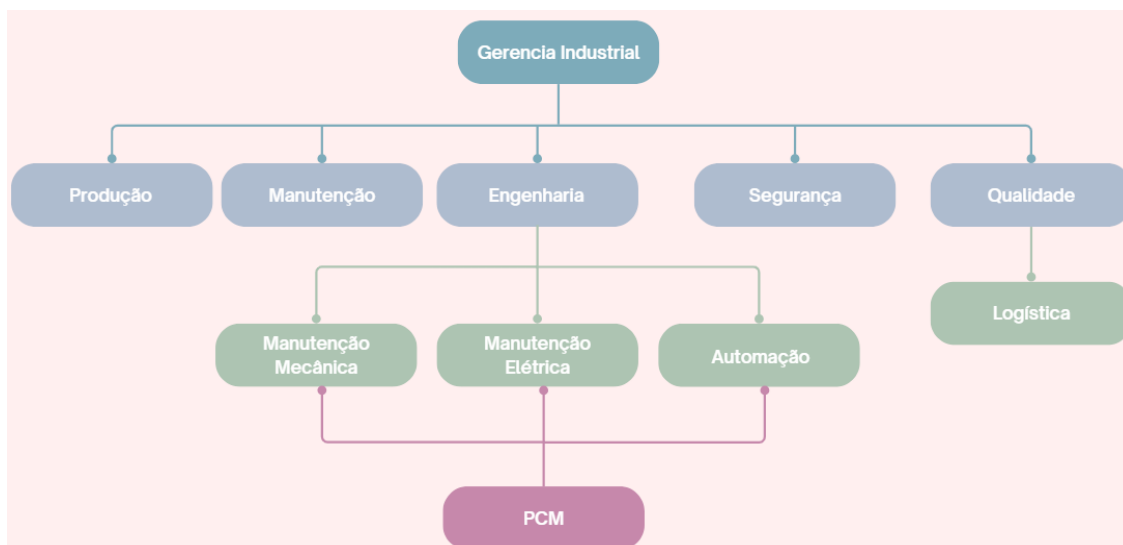


Figura 2: Organograma simplificado da estrutura organizacional da empresa estudada.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A Figura 2 apresenta os principais setores envolvidos na gestão das operações industriais da empresa. A estrutura é organizada a partir da gerência industrial, responsável pelo direcionamento estratégico das atividades operacionais, produtivas e de manutenção. A partir dessa estrutura, os setores de produção, manutenção, engenharia, segurança do trabalho, qualidade e logística atuam de forma integrada para garantir o atendimento das metas produtivas e a confiabilidade dos processos.

A área de produção é responsável pela condução das atividades relacionadas ao processo siderúrgico, acompanhando indicadores operacionais e garantindo o fluxo contínuo das operações. Em conjunto com essa área, a manutenção desempenha papel fundamental na disponibilidade dos equipamentos, sendo responsável pelo planejamento e execução das atividades preventivas, corretivas e preditivas necessárias para assegurar o funcionamento adequado dos ativos industriais.

Dentro da estrutura de manutenção encontram-se equipes especializadas em manutenção mecânica, manutenção elétrica e automação, além do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), responsável pelo planejamento das intervenções, programação de serviços e acompanhamento dos indicadores de desempenho dos equipamentos. Essa organização permite maior controle das atividades de manutenção e melhor utilização dos recursos disponíveis.

A área de engenharia atua como suporte técnico às operações, desenvolvendo projetos de melhoria, estudos de confiabilidade, análises de falhas e iniciativas

voltadas para otimização dos processos produtivos. Paralelamente, o setor de segurança do trabalho é responsável pela implementação e fiscalização das práticas de segurança, contribuindo para redução dos riscos ocupacionais e preservação da integridade física dos trabalhadores.

As áreas de qualidade e logística também possuem participação relevante dentro da estrutura organizacional. Enquanto a qualidade atua no monitoramento dos processos e produtos fabricados, garantindo conformidade com requisitos técnicos estabelecidos, a logística é responsável pelo fluxo interno de materiais, abastecimento das áreas produtivas e movimentação dos produtos ao longo da planta industrial.

A integração entre essas áreas permite que a empresa mantenha seus processos operando de forma eficiente e segura. No contexto deste estudo, destaca-se especialmente a interação entre produção, manutenção e engenharia, uma vez que essas áreas possuem influência direta sobre o desempenho das pontes rolantes e sobre a gestão das falhas observadas nos cabos de aço analisados.

4.2 Descrição do Equipamento: Ponte Rolante

Nesse contexto, o Sistema de Tratamento de Falhas apresenta grande importância para identificação das causas associadas às falhas observadas nos cabos de aço, permitindo desenvolvimento de ações corretivas e preventivas voltadas para aumento da vida útil do componente e redução dos riscos operacionais envolvidos no processo de movimentação de cargas.

A movimentação de cargas é uma atividade indispensável dentro das operações siderúrgicas, uma vez que diferentes materiais precisam ser transportados continuamente entre as diversas etapas do processo produtivo. Para realização dessas atividades são utilizados equipamentos de elevação e transporte capazes de movimentar grandes massas com segurança e precisão. Dentre esses equipamentos, destacam-se as pontes rolantes, que possuem papel fundamental na continuidade operacional da planta industrial.

A ponte rolante analisada neste estudo é utilizada para movimentação de materiais e equipamentos entre diferentes áreas operacionais. Sua utilização permite

o transporte de cargas de grande porte, contribuindo para o abastecimento dos processos produtivos e para execução das atividades de manutenção e operação.

A Figura 3 apresenta uma vista geral da ponte rolante estudada.



Figura 3: Vista geral da ponte rolante analisada.

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Conforme observado na Figura 3, a ponte rolante é composta por uma estrutura metálica principal apoiada sobre trilhos, permitindo sua movimentação ao longo da área de operação. O equipamento possui ainda um carro de translação responsável pelo deslocamento transversal e um sistema de elevação destinado ao içamento das cargas.

A integração desses movimentos possibilita que as cargas sejam posicionadas com precisão dentro da área industrial, garantindo flexibilidade operacional e contribuindo para o fluxo contínuo dos processos produtivos. Em função da

criticidade das atividades executadas, a disponibilidade desse equipamento possui influência direta sobre o desempenho operacional da empresa.

Além da estrutura principal, o sistema de elevação representa um dos conjuntos mais importantes da ponte rolante. Esse conjunto é responsável pela sustentação das cargas e pela transmissão dos esforços necessários durante as operações de içamento. A Figura 4 apresenta o sistema de elevação do equipamento.

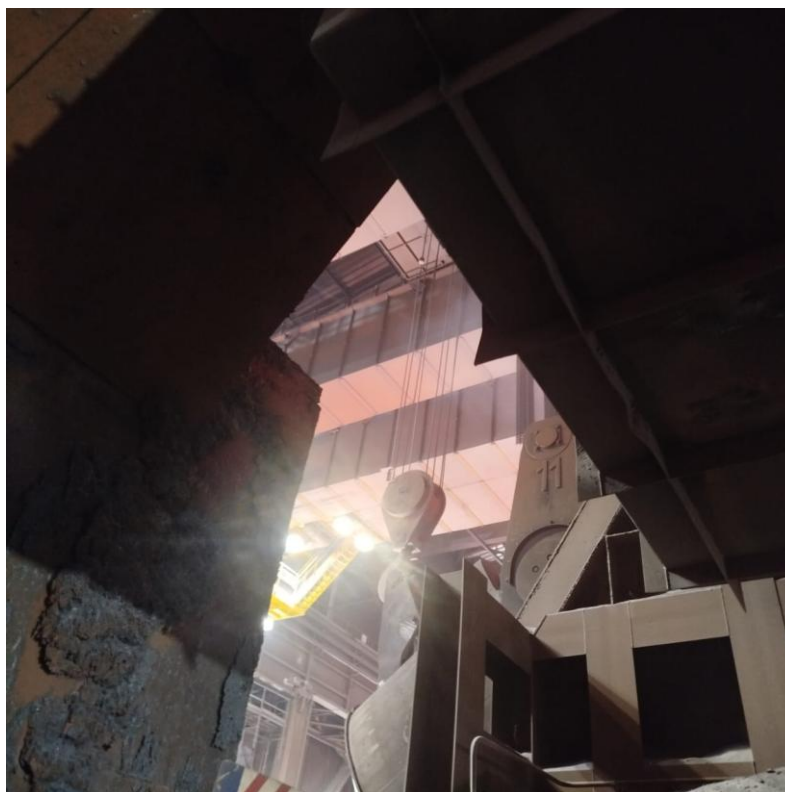


Figura 4: Sistema de elevação da ponte rolante.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Observa-se na Figura 4 que o sistema de elevação é composto por diferentes componentes mecânicos que atuam de forma integrada para garantir o levantamento e deslocamento das cargas. Entre esses componentes destacam-se o gancho de carga, as polias, o tambor de enrolamento e os cabos de aço.

Durante a operação da ponte rolante, esses elementos são submetidos continuamente a esforços mecânicos elevados e ciclos repetitivos de carregamento, fatores que exigem monitoramento constante e manutenção adequada para garantir a segurança das operações.

Dentre os componentes que integram o sistema de elevação, os cabos de aço merecem destaque especial devido à sua importância para sustentação das cargas e

para o funcionamento seguro do equipamento. Esses componentes são responsáveis pela transmissão dos esforços de tração gerados durante as operações de içamento e deslocamento dos materiais.

A Figura 5 apresenta o cabo de aço utilizado no sistema de elevação da ponte rolante analisada neste trabalho.



Figura 5: Cabo de aço utilizado no sistema de elevação.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Conforme pode ser observado na Figura 5, o cabo de aço encontra-se instalado ao longo do sistema de elevação, passando pelo conjunto de polias e tambores responsáveis pela movimentação das cargas. Trata-se de um componente submetido continuamente a esforços de tração, flexão e torção, além da ação de fatores ambientais presentes no ambiente industrial.

Segundo Costello (1997), os cabos de aço são constituídos por conjuntos de arames metálicos torcidos helicoidalmente ao redor de uma alma central, configuração que proporciona elevada resistência mecânica e flexibilidade operacional. Essas características tornam sua utilização amplamente difundida em sistemas de movimentação e elevação de cargas.

A Figura 6 apresenta uma vista mais detalhada da estrutura construtiva do cabo de aço utilizado no equipamento.



Figura 6: Detalhamento do cabo de aço analisado.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A partir da Figura 6 é possível observar os arames que compõem as pernas do cabo e sua disposição ao redor da alma central. Essa configuração permite distribuir os esforços mecânicos ao longo da estrutura do componente, contribuindo para sua resistência durante as operações de içamento.

Entretanto, devido às condições severas de operação encontradas no ambiente siderúrgico, os cabos de aço estão sujeitos a diferentes mecanismos de degradação ao longo de sua vida útil. Entre os principais mecanismos destacam-se desgaste abrasivo, fadiga dos arames, corrosão, deformações permanentes e falhas associadas à alma do cabo, conforme descrito pela ABNT NBR ISO 4309 (2018).

Em função da importância desse componente para segurança operacional da ponte rolante, torna-se fundamental a realização de inspeções periódicas e análises estruturadas das falhas observadas. Dessa forma, o cabo de aço foi definido como componente de interesse deste estudo, sendo posteriormente analisado por meio da aplicação do Sistema de Tratamento de Falhas, visando identificar causas,

consequências e oportunidades de melhoria relacionadas à sua confiabilidade operacional.

4.2.1 Caracterização do Cabo de Aço

O componente analisado neste estudo consiste em um cabo de aço utilizado no mecanismo de elevação da ponte rolante. Esse elemento é responsável pela transmissão dos esforços entre o tambor de enrolamento e o gancho de içamento, sendo submetido continuamente a solicitações de tração, flexão sobre polias e tambores, além de esforços decorrentes dos ciclos repetitivos de operação.

O cabo é constituído por arames de aço trefilados agrupados em pernas (strands), enroladas helicoidalmente ao redor de uma alma central, responsável por conferir sustentação às pernas, manter a estabilidade geométrica do conjunto e auxiliar na distribuição dos esforços internos. Além disso, a lubrificação interna e externa do cabo exerce papel importante na redução do atrito entre os arames e as pernas, contribuindo para minimizar o desgaste e aumentar sua vida útil.

A Figura XX apresenta os principais componentes constituintes de um cabo de aço, destacando os arames, as pernas e a alma central.

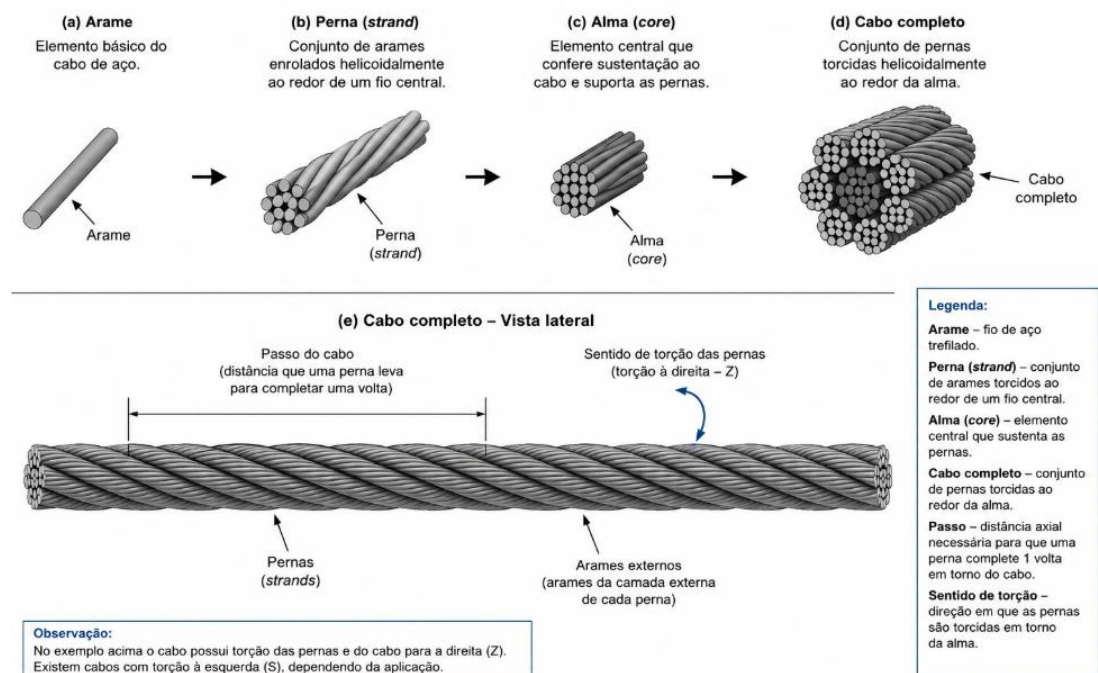


Figura 7: Componentes constituintes de um cabo de aço.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

No equipamento estudado foi especificado um cabo de aço com construção 35(W)x7, contendo alma de aço (IWRC – Independent Wire Rope Core), diâmetro nominal de 22 mm e classe de resistência 1960 N/mm². Essa configuração foi adotada para atender às condições operacionais da ponte rolante, que envolvem movimentação frequente de cargas e sucessivos ciclos de enrolamento e desenrolamento do cabo sobre o tambor e as polias.

Durante a investigação observou-se que as principais alterações estavam concentradas na região submetida aos maiores esforços durante a operação, sendo identificadas deformações características como aumento localizado do diâmetro, deslocamento da alma (alma saltada) e rompimento de arames externos. Essas evidências serviram como base para a análise das possíveis causas da falha apresentada nos itens seguintes.

4.3 Análise de Falha do Cabo de Aço

4.3.1 Identificação da Falha

Após a entrada em operação de uma nova ponte rolante, instalada em substituição ao equipamento anteriormente utilizado, passaram a ser registradas ocorrências relacionadas ao sistema de elevação, mais especificamente nos cabos de aço responsáveis pela movimentação das cargas. Ressalta-se que a intervenção realizada contemplou a substituição integral da ponte rolante e de seu sistema de elevação, não se restringindo apenas à troca do cabo de aço. Dessa forma, as primeiras anomalias observadas indicaram alterações nas condições normais de operação dos cabos, motivando o desenvolvimento de uma investigação técnica para identificação das possíveis causas do problema.

A análise dos registros de manutenção permitiu verificar que as ocorrências surgiram de forma progressiva após a entrada em operação da nova ponte rolante, apresentando diferentes manifestações ao longo do período de utilização do equipamento. Inicialmente, foi constatada a presença de arame rompido em um dos cabos do sistema de elevação. Posteriormente, foram observadas ocorrências de alma saltada e aumento localizado do diâmetro em determinados trechos dos cabos, indicando possíveis alterações estruturais internas do componente. Considerando que essas manifestações passaram a ocorrer somente após a modernização do

equipamento, a investigação buscou avaliar se as características construtivas e a especificação do cabo instalado eram compatíveis com as condições reais de operação da nova ponte rolante.

A Figura 8 apresenta o histórico cronológico das principais ocorrências registradas durante o período de investigação da falha.

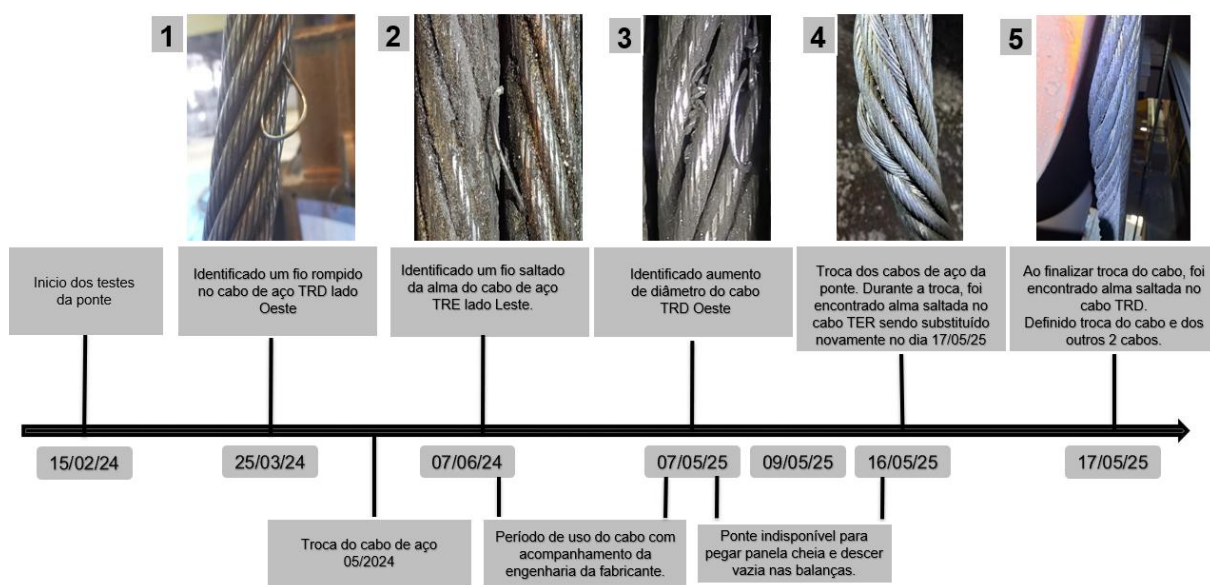


Figura 8: Linha do tempo das ocorrências relacionadas aos cabos de aço da ponte rolante.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Conforme apresentado na Figura 8, as anomalias foram surgindo ao longo do período de utilização dos cabos, exigindo inspeções adicionais, acompanhamento das condições operacionais e avaliação técnica dos componentes. A recorrência dos eventos indicou a necessidade de aplicação de ferramentas estruturadas de análise de falhas, visando identificar as causas do problema e definir ações corretivas adequadas.

4.3.2 Caracterização das Falhas Observadas

Durante o processo de inspeção foram identificados diferentes tipos de anomalias nos cabos de aço da ponte rolante. As principais evidências observadas consistiram em arames rompidos, ocorrência de alma saltada e aumento localizado do diâmetro do cabo.

4.3.2.1 Arame Rompido

O rompimento de arames é uma das falhas mais comuns observadas em cabos de aço submetidos a ciclos repetitivos de carregamento. Esse fenômeno normalmente

está associado aos mecanismos de fadiga, desgaste mecânico ou concentração localizada de tensões (COSTELLO, 1997).

A Figura 9 apresenta uma das ocorrências de arame rompido identificadas durante as inspeções realizadas no cabo estudado.



Figura 9: Arame rompido identificado durante inspeção do cabo de aço.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Conforme observado na Figura 9, o rompimento compromete a distribuição uniforme dos esforços ao longo da estrutura do cabo, podendo acelerar processos de degradação e reduzir sua capacidade de carga. Segundo a ABNT NBR ISO 4309 (2018), a quantidade e a distribuição dos arames rompidos constituem critérios fundamentais para avaliação da condição operacional dos cabos de aço.

4.3.2.2 Alma Saltada

Outra anomalia identificada durante a investigação foi a ocorrência de alma saltada. Esse tipo de falha caracteriza-se pelo deslocamento da alma em relação às pernas externas do cabo, provocando alterações geométricas significativas em sua estrutura.

A Figura 11 apresenta uma ocorrência de alma saltada observada no cabo analisado.



Figura 10: Ocorrência de alma saltada identificada no cabo de aço.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Conforme pode ser observado na Figura 10, o deslocamento da alma altera a configuração original do cabo, comprometendo seu comportamento mecânico e sua capacidade de suportar esforços de forma uniforme. Segundo Costello (1997), alterações -estruturais dessa natureza podem indicar problemas relacionados à construção do cabo, esforços internos excessivos ou incompatibilidade entre o componente e as condições de aplicação.

4.3.2.3 Aumento do Diâmetro

Além das anomalias anteriormente descritas, também foi identificado aumento localizado do diâmetro em determinados trechos do cabo. Esse fenômeno pode estar associado a alterações internas da estrutura do componente, provocando deformações permanentes e modificações em sua geometria original.

A Figura 11 apresenta a região onde foi identificado o aumento de diâmetro do cabo de aço.



Figura 11: Aumento localizado do diâmetro do cabo de aço.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A ocorrência desse tipo de deformação representa um indicativo importante de anormalidade estrutural e exige avaliação detalhada, uma vez que pode estar associada a processos internos de degradação capazes de comprometer a segurança operacional do equipamento.

4.3.3 Levantamento das Hipóteses

Após a identificação das falhas observadas, foi iniciado o processo de investigação técnica com o objetivo de determinar suas possíveis causas. Nessa etapa, foram levantadas diferentes hipóteses capazes de explicar as anomalias identificadas nos cabos de aço, considerando aspectos relacionados ao componente, ao processo de montagem e às condições de operação da ponte rolante.

As principais hipóteses consideradas durante a investigação foram:

- falha durante o processo de instalação do cabo de aço, envolvendo possíveis procedimentos inadequados de montagem, tensionamento incorreto, introdução de torções durante a instalação ou execução inadequada da fixação nas extremidades;
- defeito de fabricação, relacionado à possibilidade de irregularidades no processo de fabricação do cabo que pudessem comprometer seu desempenho em serviço;
- acúmulo de torção durante a utilização ou montagem, ocasionando alterações na distribuição dos esforços internos do cabo e favorecendo o aparecimento de anomalias estruturais;
- incompatibilidade da construção do cabo com as condições operacionais da aplicação, hipótese relacionada à possibilidade de a construção originalmente especificada não ser adequada às solicitações mecânicas impostas durante a operação da ponte rolante.

O levantamento dessas hipóteses teve como objetivo direcionar as etapas subsequentes da investigação, permitindo avaliar sistematicamente cada possibilidade até a determinação da causa raiz da falha.

4.3.4 Aplicação do Diagrama de Ishikawa

Como ferramenta inicial de investigação, foi utilizado o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito. Essa ferramenta permite organizar e relacionar possíveis causas associadas a um determinado problema, facilitando o processo de análise.

A Figura 12 apresenta o Diagrama de Ishikawa elaborado para investigação das falhas observadas nos cabos de aço.

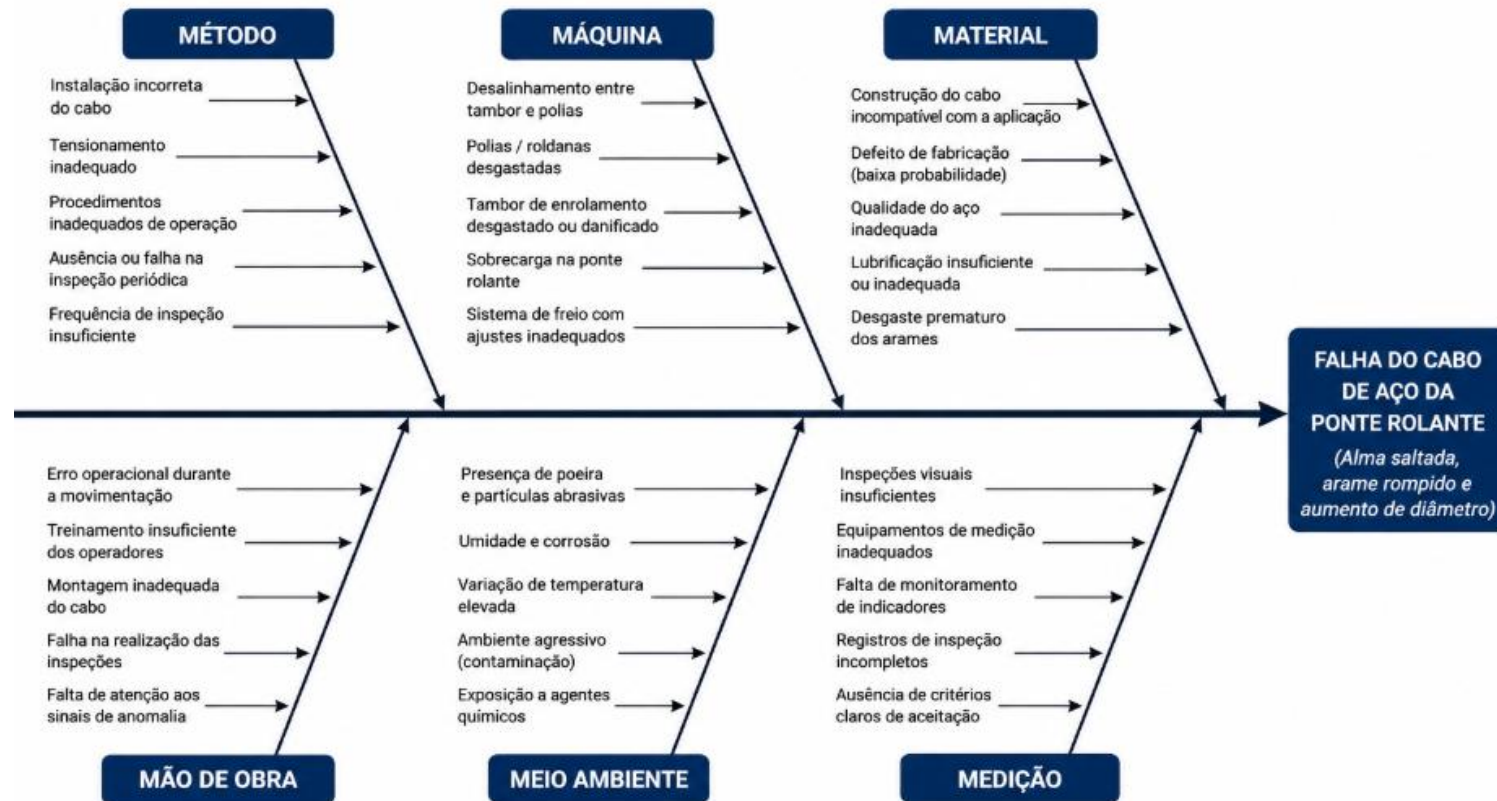


Figura 12: Diagrama de Ishikawa aplicado à análise das falhas do cabo de aço.

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Por meio da aplicação dessa ferramenta (Figura 12), foi possível organizar as possíveis causas em diferentes categorias, incluindo fatores relacionados ao método, à máquina, ao material, à mão de obra, ao meio ambiente e à medição. Entre as hipóteses levantadas, destacaram-se a incompatibilidade da construção do cabo com as condições de operação, a possibilidade de falhas durante o processo de instalação, como introdução de torções ou tensionamento inadequado, e a ocorrência de desalinhamentos ou desgaste de componentes do sistema de elevação, fatores que poderiam contribuir para a degradação prematura do cabo. A organização dessas informações permitiu direcionar a investigação para as hipóteses mais relevantes, servindo como base para a aplicação da Análise de Causa Raiz apresentada na seção seguinte.

4.3.5 Aplicação da Análise de Causas Raiz (RCA)

Após o levantamento das hipóteses iniciais, foi realizada a Análise de Causa Raiz (*Root Cause Analysis* – RCA), visando identificar os fatores efetivamente responsáveis pela ocorrência das falhas observadas.

A investigação envolveu a análise dos registros operacionais, histórico de manutenção, inspeções realizadas e avaliação técnica conduzida com apoio de especialistas do fabricante do cabo. A partir dessas informações, foi possível avaliar individualmente cada uma das hipóteses inicialmente levantadas.

A Figura 13 apresenta a árvore de falhas utilizada durante a investigação.

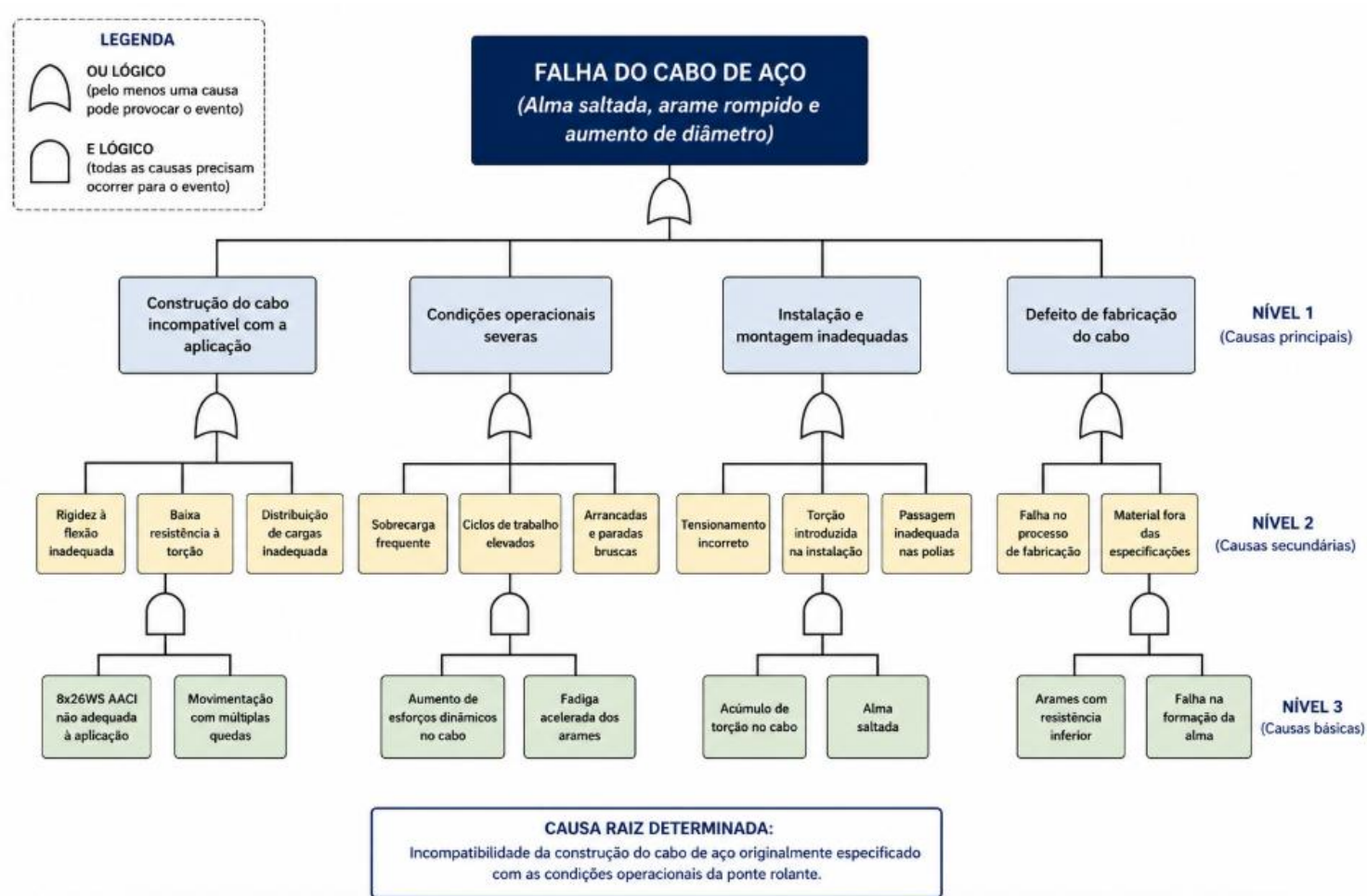


Figura 13:Árvore de falhas utilizada na análise da ocorrência.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Conforme apresentado na Figura 13, a Análise de Causa Raiz foi estruturada em três níveis hierárquicos, permitindo investigar de forma sistemática as possíveis causas relacionadas às falhas observadas no cabo de aço. No primeiro nível foram estabelecidas as causas principais, representando os grandes grupos de fatores que poderiam explicar a ocorrência de alma saltada, arames rompidos e aumento localizado do diâmetro. No segundo nível foram desdobradas as causas secundárias, detalhando os mecanismos associados a cada grupo principal. Por fim, no terceiro nível foram identificadas as causas básicas, correspondentes às condições específicas investigadas durante o processo de análise.

Inicialmente, foram avaliadas quatro hipóteses principais: construção do cabo incompatível com a aplicação, condições operacionais severas, instalação e montagem inadequadas e defeito de fabricação do cabo. Cada uma dessas hipóteses foi desdobrada em fatores específicos, permitindo analisar individualmente sua influência sobre as falhas observadas e verificar a existência de evidências que sustentassem sua contribuição para o problema.

No grupo relacionado à instalação e montagem inadequadas, foram investigados aspectos como tensionamento incorreto, introdução de torções durante a instalação e passagem inadequada do cabo pelas polias. Entretanto, não foram encontradas evidências que comprovassem falhas no procedimento de montagem, uma vez que a instalação foi executada conforme os procedimentos adotados pela empresa e acompanhada tecnicamente durante a substituição do equipamento. Além disso, as inspeções realizadas após a montagem não identificaram irregularidades capazes de justificar, isoladamente, as anomalias observadas.

Também foi analisada a hipótese de defeito de fabricação do cabo, considerando possíveis não conformidades no processo produtivo ou nas propriedades do material. Contudo, essa possibilidade foi descartada por não terem sido identificadas evidências de desvios dimensionais, defeitos de fabricação ou materiais fora das especificações. Adicionalmente, o fabricante realizou análises técnicas do componente e concluiu que não havia indícios que associassem a falha ao processo de fabricação ou à qualidade do cabo fornecido.

Em relação às condições operacionais severas, verificou-se que fatores como ciclos elevados de trabalho, sobrecargas ocasionais e sucessivas partidas e paradas contribuíam para o aumento dos esforços dinâmicos atuantes no cabo, favorecendo a aceleração do processo de fadiga dos arames. Entretanto, essas condições representam características inerentes à

operação da ponte rolante e, isoladamente, não justificavam a ocorrência das falhas observadas.

Por outro lado, a hipótese de construção do cabo incompatível com a aplicação apresentou maior consistência com as evidências obtidas durante a investigação. Foram analisados fatores relacionados à rigidez à flexão, resistência à torção e capacidade de distribuição das cargas entre os arames. A construção originalmente especificada (8×26WS ACI) apresenta maior rigidez estrutural, característica adequada para determinadas aplicações, porém menos favorável para equipamentos submetidos a frequentes passagens por polias e múltiplas mudanças de direção, como ocorre na ponte rolante estudada. Nessas condições, verificou-se maior concentração de tensões internas e menor capacidade de acomodação das solicitações mecânicas impostas durante a operação.

A partir da eliminação das hipóteses que não apresentaram sustentação técnica e da correlação entre as evidências observadas e as características construtivas do cabo, concluiu-se que a causa raiz da falha estava relacionada à incompatibilidade entre a construção do cabo originalmente especificado e as condições reais de operação da ponte rolante. Essa incompatibilidade favoreceu a concentração de esforços internos, acelerando a degradação do componente e resultando nas manifestações observadas, como alma saltada, rompimento de arames e aumento localizado do diâmetro.

Dessa forma, a aplicação da Análise de Causa Raiz permitiu demonstrar que a falha não decorreu de um evento isolado, mas da interação entre as condições operacionais do equipamento e uma especificação de cabo inadequada para a aplicação. Essa conclusão forneceu embasamento técnico para a definição das ações corretivas apresentadas no item seguinte, incluindo a substituição da construção originalmente especificada por outra mais adequada às solicitações mecânicas da ponte rolante.

4.3.6 Determinação da Causa Raiz

Com base nas evidências levantadas durante a investigação, nas inspeções realizadas e na avaliação das hipóteses consideradas, verificou-se que a causa raiz mais provável da falha estava relacionada à incompatibilidade da construção do cabo de aço originalmente especificado para as condições de operação da ponte rolante.

Durante a investigação foram analisadas diferentes hipóteses para explicar as anomalias observadas, incluindo falhas durante a instalação do cabo, defeitos de fabricação,

acúmulo de torção durante a operação e inadequação da construção do cabo em relação às solicitações mecânicas do equipamento. As verificações realizadas permitiram descartar as hipóteses relacionadas à instalação inadequada e ao defeito de fabricação, uma vez que não foram encontradas evidências técnicas que sustentassem essas possibilidades. Da mesma forma, embora o acúmulo de torção pudesse contribuir para o agravamento das anomalias, essa condição não foi suficiente para justificar, isoladamente, a recorrência das falhas observadas.

A investigação demonstrou que a construção originalmente utilizada no cabo apresentava características que não atendiam de forma satisfatória às condições reais de operação da ponte rolante. Embora o cabo estivesse corretamente dimensionado quanto ao diâmetro e à capacidade de carga, sua construção interna, definida pela disposição dos arames, das pernas e da alma, apresentava menor capacidade de acomodar os esforços de flexão, torção e compressão impostos durante os ciclos repetitivos de elevação e movimentação de cargas. Como consequência, ocorreram concentrações de tensões internas que favoreceram a degradação prematura do componente.

Esse comportamento ficou evidenciado pelo aparecimento de alma saltada, arames rompidos e aumento localizado do diâmetro do cabo, anomalias que indicam perda da estabilidade estrutural e alteração na distribuição dos esforços entre os elementos constituintes do cabo. Essas características demonstram que o componente não conseguia acomodar adequadamente as solicitações impostas durante sua operação, comprometendo seu desempenho e sua vida útil.

A confirmação dessa hipótese ocorreu após a substituição da construção originalmente especificada por outra mais adequada às características operacionais da ponte rolante, mantendo-se as demais condições de utilização do equipamento. Após essa modificação, as anomalias anteriormente observadas deixaram de ocorrer, reforçando que a origem do problema não estava relacionada ao processo de instalação, à qualidade de fabricação ou às condições de operação da ponte, mas sim à inadequação da construção do cabo para aquela aplicação específica.

Assim, concluiu-se que a causa raiz da falha foi a incompatibilidade da construção do cabo de aço originalmente aplicado em relação às solicitações mecânicas e às condições reais de operação da ponte rolante. Essa conclusão forneceu o embasamento técnico necessário para a definição das ações corretivas e preventivas apresentadas no capítulo seguinte.

4.4 Contribuições do Sistema de Tratamento de Falhas

Após a determinação da causa raiz, foram definidas tratativas voltadas à eliminação do problema identificado e à prevenção de novas ocorrências. O plano de ação foi estruturado com o objetivo de corrigir a condição observada nos cabos de aço, reduzir a possibilidade de reincidência da falha e aumentar a confiabilidade operacional da ponte rolante.

A principal tratativa adotada foi a substituição da construção do cabo originalmente utilizado por uma configuração mais adequada às condições operacionais do equipamento. A alteração manteve o mesmo diâmetro nominal e a mesma classe de resistência mecânica, porém modificou a construção interna do cabo, buscando melhor desempenho frente aos esforços de tração, flexão e torção presentes durante a operação. A Figura 14 apresenta a comparação entre a construção originalmente utilizada e a construção adotada após a análise da falha.

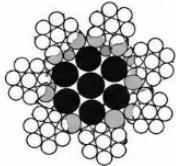
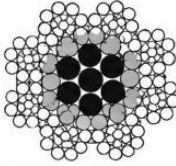
ITEM	CONSTRUÇÃO ORIGINAL	CONSTRUÇÃO ADOTADA APÓS A ANÁLISE DA FALHA
Designação (Construção)	8x26WS AACI (Alma de Aço – Arames de Aço Comuns – Independente)	8x36WS EPAACI (Alma de Aço – Arames de Aço – Pré-formados – Independente)
Seção transversal (esquema)	 Legenda: ○ Arame externo ● Arame interno ● Alma de aço	 Legenda: ○ Arame externo ● Arame interno ● Alma de aço
Vista em detalhe da seção	 Arames de aço comuns (redondos).	 Arames de aço pré-formados (perfilados).
Vista externa do cabo (exemplo)		
Características principais	• Arames externos redondos. • Menor quantidade de arames externos. • Menor resistência à flexão e à fadiga. • Menor estabilidade dimensional.	• Arames externos pré-formados (perfilados). • Maior quantidade de arames externos. • Maior resistência à flexão e à fadiga. • Melhor estabilidade dimensional e resistência ao desgaste.
Aplicação recomendada	Aplicações gerais com menor exigência de flexão e fadiga.	Aplicações severas com alta flexão, cargas dinâmicas e maior vida útil.

Figura 14: Comparação entre a construção original e a construção adotada após a análise da falha.
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A partir da Figura 14, observa-se que a tratativa não se limitou apenas à substituição do cabo danificado, mas envolveu uma mudança técnica na especificação do componente. Essa decisão foi importante porque a simples troca por um cabo de mesma construção poderia resultar na reincidência da falha, uma vez que a causa raiz estava relacionada à incompatibilidade da construção original com a aplicação.

Além da substituição do cabo, foram definidas ações de acompanhamento após a instalação da nova configuração. Essas ações tiveram como objetivo verificar o comportamento do novo cabo durante a operação e confirmar a eficácia da solução adotada. Dessa forma, o acompanhamento passou a fazer parte da tratativa, permitindo avaliar se as anomalias anteriormente observadas voltariam a ocorrer. A Tabela 2 apresenta as ações definidas a partir da análise da falha.

Tabela 2: Ações apresentadas após a análise da falha do cabo de aço.

Ação	Objetivo	Responsável
Substituir a construção do cabo originalmente utilizado.	Eliminar a incompatibilidade identificada na análise da causa raiz	Manutenção / Engenharia
Instalar o novo cabo com construção adequada à aplicação.	Garantir melhor desempenho do sistema de elevação	Manutenção
Acompanhar o comportamento do cabo após instalação.	Verificar a eficácia da solução adotada	Engenharia / Manutenção
Intensificar inspeções periódicas no sistema de elevação.	Identificar precocemente possíveis anomalias	Manutenção
Registrar as ocorrências e inspeções realizadas.	Garantir rastreabilidade das informações	PCM / Manutenção
Atualizar recomendações internas de inspeção e substituição	Reduzir possibilidade de reincidência da falha	Engenharia / Manutenção

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

As ações apresentadas na Tabela 2 evidenciam que o tratamento da falha envolveu tanto medidas corretivas quanto preventivas. As ações corretivas estiveram relacionadas à substituição do cabo e à adequação da sua construção. Já as ações preventivas envolveram acompanhamento operacional, intensificação das inspeções e registro sistemático das informações obtidas durante o período de avaliação.

A Figura 15 apresenta o fluxo simplificado das tratativas adotadas após a identificação da causa raiz.



Figura 15: Fluxo das tratativas adotadas após a determinação da causa raiz.

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Conforme apresentado na Figura 15, o processo de tratativa iniciou-se com a confirmação da causa raiz, seguida pela definição da nova especificação do cabo, substituição do componente, acompanhamento operacional e registro das condições observadas após a implantação da solução.

A aplicação dessas tratativas contribuiu para transformar a análise da falha em um processo de melhoria da manutenção, uma vez que a solução adotada foi direcionada à causa do problema e não apenas ao efeito observado. Com isso, o Sistema de Tratamento de Falhas possibilitou maior organização das informações, melhor direcionamento das ações e aumento da confiabilidade na tomada de decisão.

Além da solução da ocorrência, a aplicação do Sistema de Tratamento de Falhas proporcionou diversas contribuições para a gestão da manutenção da ponte rolante, destacando-se: a identificação sistemática da causa raiz da falha; a eliminação de hipóteses sem evidências técnicas, como defeito de fabricação e falha de instalação; a definição de uma especificação de cabo mais adequada às condições de operação; a redução da probabilidade de reincidência da falha; a padronização do processo de investigação de ocorrências; o fortalecimento do registro e da rastreabilidade das informações de manutenção; a atualização dos procedimentos de inspeção e substituição dos cabos de aço; e da segurança do sistema de movimentação de cargas.

Dessa forma, as ações adotadas permitiram tratar a falha de maneira estruturada, reduzindo a possibilidade de reincidência e fortalecendo o controle sobre o desempenho dos cabos de aço utilizados na ponte rolante. Assim, verificou-se que o Sistema de Tratamento de Falhas não apenas solucionou a ocorrência analisada, mas também promoveu melhorias permanentes no processo de manutenção, contribuindo para a segurança operacional do equipamento.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo analisar como o Sistema de Tratamento de Falhas (STF) pode contribuir para a análise de falhas em cabos de aço de uma ponte rolante utilizada em uma empresa do setor siderúrgico. Para isso, foi realizada uma investigação fundamentada em conceitos de manutenção industrial, métodos de manutenção e ferramentas de análise de falhas, associando o embasamento teórico à aplicação prática em um estudo de caso.

A partir da revisão bibliográfica, foi possível compreender a evolução da manutenção industrial e sua importância para a confiabilidade dos ativos, destacando o papel das estratégias preventiva, preditiva e da manutenção centrada na confiabilidade como instrumentos para redução de falhas e aumento da disponibilidade operacional. Também foram abordados os conceitos relacionados ao Sistema de Tratamento de Falhas, evidenciando sua aplicação como metodologia estruturada para investigação de ocorrências, com o apoio de ferramentas como o Diagrama de Ishikawa e a Análise de Causa Raiz.

Na etapa prática, realizou-se a caracterização da empresa, da ponte rolante e do cabo de aço analisado, possibilitando compreender o contexto operacional em que a falha ocorreu. Destaca-se que o estudo foi desenvolvido após a substituição integral da ponte rolante e de seu sistema de elevação, contexto em que passaram a ser registradas as ocorrências investigadas. A partir da identificação das anomalias observadas, entre elas arames rompidos, alma saltada e aumento localizado do diâmetro do cabo, foi conduzida uma investigação técnica visando identificar os fatores que poderiam estar associados ao problema.

A utilização do Diagrama de Ishikawa permitiu organizar de forma sistemática as possíveis causas relacionadas às falhas observadas, enquanto a aplicação da Análise de Causa Raiz possibilitou avaliar criticamente cada uma das hipóteses levantadas ao longo da investigação. A análise das evidências permitiu descartar hipóteses que não apresentaram sustentação técnica suficiente e indicar, para o caso estudado, que a incompatibilidade entre a construção do cabo originalmente especificado e as condições reais de operação da ponte rolante representava a hipótese mais consistente para explicar as ocorrências observadas.

Com base nesse resultado, foram propostas tratativas voltadas à mitigação do problema, contemplando a substituição da construção do cabo por outra mais adequada à

aplicação, o acompanhamento operacional do novo componente, a intensificação das inspeções periódicas e a revisão dos procedimentos internos de manutenção. Essas ações evidenciam que o Sistema de Tratamento de Falhas não se restringe à identificação da origem de uma ocorrência, mas também pode subsidiar a definição de medidas corretivas e preventivas direcionadas ao aumento da confiabilidade dos equipamentos.

Dessa forma, responde-se à pergunta de pesquisa proposta neste trabalho: **como o Sistema de Tratamento de Falhas pode contribuir para a análise de falhas em cabos de aço de uma ponte rolante de uma empresa do setor siderúrgico?** Os resultados obtidos indicam que sua aplicação contribuiu para estruturar a investigação, organizar as hipóteses, analisar criticamente as evidências disponíveis e fundamentar a determinação da causa raiz para o caso estudado.

Por fim, conclui-se que, no contexto desta pesquisa, o Sistema de Tratamento de Falhas mostrou-se uma ferramenta adequada para apoiar a investigação de falhas em cabos de aço, fornecendo uma metodologia organizada para identificação e análise das possíveis causas das ocorrências. Embora as conclusões estejam restritas às condições do estudo de caso analisado, a abordagem empregada demonstra potencial para auxiliar investigações semelhantes em equipamentos de movimentação de cargas, desde que consideradas as particularidades de cada aplicação e de seu contexto operacional.

5.2 Recomendações

A partir do estudo realizado, recomendam-se os seguintes trabalhos futuros relacionados à aplicação do Sistema de Tratamento de Falhas em equipamentos de movimentação de cargas utilizados na indústria siderúrgica:

1. Aplicação de técnicas de monitoramento preditivo para avaliação da integridade estrutural de cabos de aço em pontes rolantes siderúrgicas;
2. Desenvolvimento de uma metodologia de inspeção baseada em análise de risco para cabos de aço utilizados em equipamentos de movimentação de cargas;
3. Aplicação do Sistema de Tratamento de Falhas em outros componentes críticos de pontes rolantes, visando ao aumento da confiabilidade e da disponibilidade operacional.

Essas são apenas algumas sugestões de estudos que podem ser desenvolvidos para ampliar o conhecimento sobre análise de falhas e confiabilidade aplicada aos cabos de aço e

aos equipamentos de movimentação de cargas. A continuidade dessas pesquisas poderá contribuir para o aperfeiçoamento das estratégias de manutenção, para o aumento da segurança operacional e para o desenvolvimento de metodologias cada vez mais eficientes de gestão da confiabilidade na indústria siderúrgica.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8400: cálculo de equipamentos para levantamento e movimentação de cargas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4309: cabos de aço: cuidados, manutenção, inspeção e descarte**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ALSYOUF, I. The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. **International Journal of Production Economics**, v. 105, n. 1, p. 70-78, jan. 2007. DOI: 10.1016/j.ijpe.2004.06.057.

BLANCHARD, B. S. **Logistics engineering and management**. 6. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.

CARVALHO, T. P. et al. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. **Computers & Industrial Engineering**, v. 137, p. 106024, nov. 2019. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106024.

COSTELLO, G. A. **Theory of wire rope**. 2. ed. New York: Springer, 1997.

GARG, A.; DESHMUKH, S. G. Maintenance management: literature review and directions. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 12, n. 3, p. 205-238, 2006. DOI: 10.1108/13552510610685075.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60812: failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)**. Geneva: IEC, 2018.

JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 7, p. 1483-1510, 2006. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.

KELLY, A. **Maintenance systems and documentation**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.

- LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. **Procedia CIRP**, v. 16, p. 3-8, 2014. DOI: 10.1016/j.procir.2014.02.001.
- MINAYO, M. C. S. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. 9. ed. São Paulo: Hucitec, 2001.
- MOBLEY, R. K. **An introduction to predictive maintenance**. 2. ed. Burlington: Elsevier, 2002.
- MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.
- NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM: total productive maintenance**. Cambridge: Productivity Press, 1988.
- NOWLAN, F. S.; HEAP, H. F. **Reliability-centered maintenance**. Washington: United States Department of Defense, 1978.
- PALADY, P. **FMEA: análise dos modos de falha e efeitos**. São Paulo: IMAM, 1997.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.
- RAUSAND, M.; HØYLAND, A. **System reliability theory: models, statistical methods, and applications**. 2. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004.
- ROONEY, J. J.; HEUVEL, L. N. V. Root cause analysis for beginners. **Quality Progress**, v. 37, n. 7, p. 45-53, jul. 2004.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Mechanical engineering design**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- SILVA, M. A. **Gestão da manutenção industrial**. São Paulo: Érica, 2013.
- SLACK, N. et al. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- SMITH, R.; HINCHCLIFFE, G. R. **RCM: gateway to world class maintenance**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2011.
- TSANG, A. H. C. Strategic dimensions of maintenance management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 8, n. 1, p. 7-39, 2002. DOI: 10.1108/13552510210420577.

- TUPKARY, R. H.; TUPKARY, V. R. **Introduction to modern steelmaking**. New Delhi: Khanna Publishers, 2017.
- VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016.
- VESELY, W. E. et al. **Fault tree handbook with aerospace applications**. Washington: NASA, 2002.
- VIANA, H. R. G. **Planejamento e controle da manutenção**. São Paulo: Artliber, 2002.
- WIREMAN, T. **Maintenance strategies**. New York: Industrial Press, 2004.
- WIREMAN, T. **Benchmarking best practices in maintenance management**. New York: Industrial Press, 2005.
- XENOS, H. **Gerenciando a manutenção produtiva**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.
- YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- ZHENG, H.; PAIVA, A. R.; GURCIULLO, C. S. **Advancing from predictive maintenance to intelligent maintenance with AI and IIoT**. arXiv, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2009.00351>. Acesso em: 3 jul. 2026.
- ISHIKAWA, K. **Controle de qualidade total: à maneira japonesa**. Rio de Janeiro: Campus, 1993.
- WERKEMA, M. C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1995.
- GUERRA-FUENTES, L.; TORRES-LÓPEZ, M.; HERNANDEZ-RODRIGUEZ, M. A. L.; GARCIA-SANCHEZ, E. **Failure analysis of steel wire rope used in overhead crane system**. *Engineering Failure Analysis*, v. 118, p. 104893, 2020. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104893.
- TORKAR, M.; ARZENSEK, B. **Failure of crane wire rope**. *Engineering Failure Analysis*, v. 9, n. 2, p. 227-233, 2002. DOI: 10.1016/S1350-6307(00)00047-9.