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

BRENNER DE MELO MARÇAL

MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE (RMC) APLICADA A UMA CINTADEIRA: OTIMIZAÇÃO DO PLANO DE MANUTENÇÃO

OURO PRETO – MG
2026

BRENNER DE MELO MARÇAL

(brenner.marcal@aluno.ufop.edu.br)

MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE (RMC) APLICADA A UMA CINTADEIRA: OTIMIZAÇÃO DO PLANO DE MANUTENÇÃO

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

Orientador: MSc. Sávio Sade Tayer

OURO PRETO – MG

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M313m Marcal, Brenner de Melo.
Manutenção Centrada na Confiabilidade (RMC) aplicada a uma cintadeira [manuscrito]: otimização do plano de manutenção. / Brenner de Melo Marcal. - 2026.
91 f.: il.: , gráf., tab..

Orientador: Prof. Me. Sávio Sade Tayer.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Manutenção centrada na confiabilidade (RCM). 2. Probabilidades - Probabilidade contínua. 3. Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA). 4. Manutenção - Planejamento. 5. laminação de tiras a quente (LTQ). I. Tayer, Sávio Sade. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Brenner de Melo Marçal

Manutenção Centrada na Confiabilidade (RMC) aplicada a uma Cintadeira: otimização do plano de manutenção

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

Aprovada em 05 deniovembro de 2026

Membros da banca

MSc - Sávio Sade tayeer- Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
DSc - Washiongton Luis Vieira da Silva - Universidade Federal de Ouro Preto
DSC - Diogo Antônio de Souza - Universidade Federal de Ouro Preto

Sávio Sade Tayer, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05 de novembro de 2026.

Documento assinado eletronicamente por **Savio Sade Tayer**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/11/2026, às 14:59, 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 **1226772** e o código CRC **6050BD06**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: - www.ufop.br

A Deus dedico mais esta etapa vencida.

Aos meus pais, por me proporcionarem essa oportunidade.

À Amanda, por ter sido minha companheira em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por desde cedo terem me incentivado e apoiado de todas as maneiras possíveis. Vocês serão sempre meu exemplo.

À Amanda, meu grande amor e companheira, por ter sido meu suporte e porto seguro fora de casa, por ter sido lar quando mais precisei e por sempre fazer valer a frase “no fim tudo dá certo pra nós dois”. Sem você nada disso teria sido como foi.

Ao meu orientador, Prof. MSc. Sávio Sade Tayer, pelo incentivo e pela orientação neste trabalho, e aos professores do curso de Engenharia Mecânica, por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

"Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos".

Martin Luther King

RESUMO

A manutenção de equipamentos auxiliares em linhas de laminação a quente exerce influência direta sobre a capacidade produtiva, uma vez que a indisponibilidade desses ativos compromete o escoamento do produto acabado. Este trabalho, conduzido como estudo de caso de abordagem qualitativa, aplicou a metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade a uma cintadeira circunferencial de bobinas recém incorporada a uma linha de laminação de tiras a quente, com o objetivo de propor um plano de manutenção voltado à redução de suas falhas operacionais. Por não dispor de histórico próprio em extensão suficiente para a modelagem de confiabilidade, adotou-se como fonte de dados o registro de paradas de uma segunda cintadeira de projeto idêntico instalada na mesma linha, com equivalência entre os ativos verificada quanto ao projeto e às condições de uso e de manutenção. Os 1.342 registros de manutenção não programada do período de dezembro de 2013 a julho de 2025 foram consolidados em 621 eventos de falha, segundo critério de agrupamento por turno, e submetidos ao ajuste da distribuição de Weibull de três parâmetros pelo método da máxima verossimilhança. Obteve-se tempo médio entre falhas de 162,3 horas, tempo médio para reparo de 27,3 minutos e disponibilidade de 99,72%, com parâmetro de forma inferior à unidade em todos os subsistemas analisados, entre 0,617 e 0,862. A análise dos modos de falha e efeitos identificou o desajuste, entendido como a perda de regulagem dos mecanismos que retêm, conduzem e tensionam a cinta, como responsável por 63,8% das ocorrências e pelos seis maiores números de prioridade de risco, sem indício prévio detectável. O confronto com o plano vigente revelou que suas 195 operações são compostas quase integralmente por inspeções sensitivas, sem qualquer tarefa de medição ou correção de parâmetros de regulagem. Propôs-se, em consequência, a verificação funcional programada desses parâmetros em periodicidade de vinte e quatro horas, acompanhada da padronização do procedimento de ajuste e da avaliação de instrumentação capaz de antecipar a perda de regulagem.

Palavras-chave: Manutenção centrada na confiabilidade. Distribuição de Weibull. Análise de modos de falha e efeitos. Plano de manutenção. Laminação de tiras a quente.

ABSTRACT

The maintenance of auxiliary equipment in hot strip rolling lines has a direct influence on productive capacity, since the unavailability of such assets compromises the flow of finished product. This work, conducted as a case study with a qualitative approach, applied the Reliability Centered Maintenance methodology to a circumferential coil strapping machine recently incorporated into a hot strip rolling line, aiming to propose a maintenance plan to reduce its operational failures. As the asset lacked a history of sufficient extent for reliability modelling, the stoppage records of a second strapping machine of identical design installed in the same line were adopted as the data source, with equivalence between the assets verified in terms of design and of operating and maintenance conditions. The 1,342 unscheduled maintenance records from December 2013 to July 2025 were consolidated into 621 failure events, according to a shift-based grouping criterion, and fitted to a three-parameter Weibull distribution by maximum likelihood estimation. A mean time between failures of 162.3 hours, a mean time to repair of 27.3 minutes and an availability of 99.72% were obtained, with shape parameters below unity in every subsystem analysed, ranging from 0.617 to 0.862. The failure mode and effects analysis identified misadjustment, understood as the loss of adjustment of the mechanisms that hold, guide and tension the strap, as responsible for 63.8% of occurrences and for the six highest risk priority numbers, with no detectable prior indication. Comparison with the current plan revealed that its 195 operations consist almost entirely of sensory inspections, without any task for measuring or correcting adjustment parameters. Consequently, a scheduled functional verification of these parameters at twenty-four-hour intervals was proposed, together with the standardisation of the adjustment procedure and the assessment of instrumentation capable of anticipating the loss of adjustment.

Key-words: Reliability centered maintenance. Weibull distribution. Failure mode and effects analysis. Maintenance plan. Hot strip rolling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemático do laminador de tiras a quente do tipo *Steckel* 4
Figura 2 – Cintadeira circunferencial de bobinas 5
Figura 3 – Evolução da manutenção e suas gerações 7
Figura 4 – Mudanças na visão do padrão de falhas do equipamento 8
Figura 5 – Evolução da manutenção 9
Figura 6 – Exemplo de curva da banheira 13
Figura 7 – A curva P-F 15

Figura 8 – Etapas de desenvolvimento do trabalho 26
Figura 9 – Tabela de registro de paradas 26

Figura 10 – Evolução anual dos eventos de falha 39
Figura 11 – Diagrama de Pareto dos modos de falha 40
Figura 12 – Curvas de confiabilidade estimadas 45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Variáveis e indicadores 28
Quadro 2 Escala de severidade adotada 29
Quadro 3 Escala de ocorrência adotada 29
Quadro 4 Escala de detecção adotada 30
Quadro 5 Estados funcionais da cintagem e capacidade produtiva associada 33
Quadro 6 Critérios de equivalência entre as Cintadeiras A e B 35
Quadro 7 Correspondência entre os subsistemas da Cintadeira A e as tarefas do plano da Cintadeira B 36
Quadro 8 Pontos de ajuste e manifestações do desajuste por subsistema 41
Quadro 9 Funções da cintadeira e subsistemas associados 47
Quadro 10 Falhas funcionais da cintadeira 48
Quadro 11 Matriz FMEA da cintadeira 49
Quadro 12 Tarefas propostas por modo de falha 52
Quadro 13 Plano de manutenção proposto 55
Quadro 14 Amostra dos registros de parada da Cintadeira A 72
Quadro 15 Amostra das operações do plano de manutenção vigente 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sensibilidade dos indicadores à janela de consolidação de eventos 31

Tabela 2 – Decomposição funcional e distribuição dos registros de parada por subsistema 34
Tabela 3 – Indicadores de desempenho da Cintadeira A no período analisado 38
Tabela 4 – Distribuição dos eventos de falha por subsistema 43
Tabela 5 – Comparação da aderência entre distribuições candidatas 43
Tabela 6 – Parâmetros da distribuição de Weibull de três parâmetros por subsistema . . 44
Tabela 7 – Periodicidade proposta para a verificação funcional a partir dos parâmetros de Weibull 53
Tabela 8 – Composição do plano de manutenção vigente 54
Tabela 9 – Modos de falha observados na Cintadeira B e previstos pela análise 56
Tabela 10 – Cenários de impacto da redução dos eventos de desajuste 57

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Disponibilidade
β	Parâmetro de forma da distribuição de Weibull
η	Parâmetro de escala da distribuição de Weibull
γ	Parâmetro de posição da distribuição de Weibull
Γ	Função gama
$\lambda(t)$	Taxa de falhas no instante t
$R(t)$	Função de confiabilidade
T	Variável aleatória tempo até a falha
t	Tempo de operação
w	Janela de consolidação de eventos de falha
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	Estatística de Anderson-Darling
AIC	*Akaike Information Criterion*
BIC	*Bayesian Information Criterion*
FMEA	*Failure Mode and Effect Analysis*
KS	Estatística de Kolmogorov-Smirnov
LTQ	Linha de Laminação de Tiras a Quente
MTBF	*Mean Time Between Failures*
MTTF	*Mean Time To Failure*
MTTR	*Mean Time To Repair*
NBR	Norma Brasileira
POP	Procedimento Operacional Padrão
RCM	*Reliability Centered Maintenance*
RPN	*Risk Priority Number*

SUMÁRIO

1 Introdução 1
1.1 Formulação do Problema 1
1.2 Justificativa 2
1.3 Objetivos 3
1.3.1 Geral 3
1.3.2 Específicos 3
1.4 Estrutura do Trabalho 3

2 Revisão bibliográfica 4
2.1 O Processo de Laminação a Quente de Produtos Planos de Aço 4
2.2 A Cintadeira no Contexto da Laminação a Quente 5
2.3 Manutenção 6
2.4 Evolução da Manutenção 6
2.4.1 Primeira Geração 7
2.4.2 Segunda Geração 7
2.4.3 Terceira Geração 8
2.4.4 Quarta Geração 9
2.5 Tipos de Manutenção 10
2.5.1 Manutenção Corretiva 10
2.5.2 Manutenção Preventiva 10
2.5.3 Manutenção Preditiva 11
2.5.4 Manutenção Detectiva 11
2.6 A Gestão da Manutenção no Contexto Siderúrgico 11
2.7 Tempo Médio até a Falha 12
2.8 Tempo Médio de Reparo 12
2.9 Conceitos Fundamentais de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade . 12
2.10 Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) 14
2.11 A Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA) 15
2.12 Consequências das Falhas e Seleção das Tarefas 16
2.13 Distribuição de Probabilidade 17
2.13.1 Distribuição de Weibull e Weibull de Três Parâmetros 17
2.14 Síntese da Revisão Bibliográfica 20

3 Metodologia 22
3.1 Tipo de Pesquisa 22
3.2 Materiais e Métodos 24
3.2.1 Objeto de Estudo 24

3.2.2 Fonte dos Dados de Confiabilidade e Equivalência entre os Ativos 24
3.2.3 Procedimento 25
3.3 Variáveis e Indicadores 27
3.4 Escalas de Avaliação do FMEA 28
3.5 Instrumento de Coleta de Dados 30
3.6 Tabulação dos Dados 30
3.6.1 Consolidação dos Eventos de Falha 31
3.6.2 Ajuste da Distribuição de Weibull 32
3.6.3 Estimativa do Impacto da Proposta 32
3.7 Considerações Finais 32

4 Resultados e discussões 33
4.1 Caracterização do Equipamento e do Contexto Operacional 33
4.1.1 Decomposição Funcional 34
4.1.2 Verificação da Equivalência entre os Ativos 35
4.2 Diagnóstico do Desempenho Atual do Equipamento 37
4.2.1 Consolidação dos Registros em Eventos de Falha 37
4.2.2 Indicadores de Desempenho 37
4.2.3 Evolução Temporal das Falhas 38
4.2.4 Priorização dos Modos de Falha 39
4.2.5 Caracterização do Desajuste 40
4.2.6 Criticidade por Subsistema 42
4.3 Modelagem dos Tempos até a Falha 43
4.3.1 Seleção da Distribuição de Probabilidade 43
4.3.2 Parâmetros Estimados 44
4.3.3 Comportamento da Taxa de Falhas 45
4.3.4 Implicações para a Seleção das Tarefas 46
4.4 Funções e Falhas Funcionais da Cintadeira 46
4.4.1 Funções 46
4.4.2 Falhas Funcionais 47
4.5 Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA) 48
4.5.1 Priorização dos Modos de Falha 50
4.6 Seleção das Tarefas de Manutenção 50
4.6.1 Tarefas Propostas 51
4.7 Plano de Manutenção Proposto 53
4.7.1 Análise do Plano Vigente 53
4.7.2 Proposta 55
4.8 Discussão dos Resultados 56
4.8.1 Confronto com o Comportamento Observado no Ativo em Estudo 56

4.8.2 Impacto Esperado da Proposta 57
4.8.3 Viabilidade da Periodicidade Proposta 57
4.8.4 Limitações 58

5 Conclusão e recomendações 59
5.1 Conclusão 59
5.2 Recomendações 60

Referências bibliográficas 62

Apêndices 64

APÊNDICE A Rotina computacional para o ajuste da distribuição de Weibull 65

Anexos 70

ANEXO A Registros de parada extraídos do sistema de controle 71

ANEXO B Plano de manutenção vigente 74

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A siderurgia, setor estratégico para a economia global e interna de um país, demanda processos contínuos, como laminação de tiras a quente, e equipamentos robustos que suportam ambientes extremamente agressivos. Nesse contexto, a manutenção torna-se essencial para garantir a disponibilidade operacional, evitar os altos custos associados a paradas não programadas e mitigar riscos de segurança, especialmente em ambientes agressivos como a laminação de tiras a quente.

Segundo Xenos (1998), as atividades de manutenção existem para preservar as funções de equipamentos e instalações contra a degradação, seja ela causada pelo tempo ou pelo uso. Tal degradação pode manifestar-se de maneira explícita na aparência do equipamento ou de forma implícita, afetando seu desempenho, produção ou a qualidade final do produto.

Para atender a essa necessidade de forma estruturada e analítica, destaca-se a metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) que, segundo Moubray (2000), o RCM é um processo utilizado para determinar as ações de manutenção mais adequadas para que qualquer ativo físico continue a fazer o que seus usuários exigem em seu contexto operacional. O processo é realizado por meio de uma série de perguntas estruturadas, que investigam as funções do equipamento, suas falhas funcionais, e os modos e efeitos dessas falhas.

A cintadeira, equipamento de alta criticidade localizado na fase final do processo de laminação, desempenha a função vital de cintar bobinas de aço para assegurar a integridade e o armazenamento do produto, o que a torna um objeto de estudo ideal para a aplicação da metodologia RCM (*Reliability Centered Maintenance*). Contudo, a elaboração de um plano de manutenção robusto para este ativo é um desafio complexo, visto que, por se encontrar em fase de acompanhamento inicial, o equipamento ainda não dispõe de um histórico consolidado de falhas, enquanto opera sob severas condições térmicas e mecânicas. É precisamente diante desse cenário de incerteza e alta exigência que a abordagem RCM se revela a ferramenta mais eficaz, pois permite fundamentar a análise no histórico de um ativo semelhante em operação na mesma linha, conforme detalhado no Capítulo 3, e assim avaliar de forma sistemática e proativa os riscos inerentes à operação. Ao conduzir uma Análise de Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA), que será tratada no Capítulo 2, como etapa fundamental do processo, é possível identificar fragilidades primordiais, como a quebra de fitas por tensão inadequada ou o desgaste acelerado de componentes por exposição a altas temperaturas.

Com base nessa análise de risco, o RCM guia a seleção das estratégias de manutenção tecnicamente viáveis e economicamente justificáveis para cada modo de falha, que podem incluir tanto tarefas proativas quanto alterações de projeto ou de procedimento, propondo a transformação da manutenção de reativa para proativa, garantindo que a cintadeira se torne um ativo confiável desde o início de seu ciclo de vida. Diante da importância de assegurar a *performance*

de ativos críticos na siderurgia, este trabalho busca responder ao seguinte questionamento:

Como a metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) pode contribuir para o aumento da confiabilidade e a redução das falhas operacionais de uma cintadeira?

1.2 Justificativa

A interrupção de equipamentos críticos como a cintadeira, peça fundamental na produção de bobinas a quente, evidencia a relação direta entre a confiabilidade de um ativo e o desempenho financeiro e produtivo de uma indústria. Qualquer falha neste componente não apenas compromete a qualidade do produto e a eficiência do processo, mas também pode levar a extensas e onerosas paralisações de toda a linha de produção. Essas paradas não planejadas, por sua vez, impactam diretamente a capacidade produtiva e a lucratividade da operação. Tal cadeia de consequências valida a premissa de que a manutenção transcende a função de mero reparo, consolidando-se como um pilar estratégico para o desempenho industrial (KARDEC; NASCIF, 2009). Desse modo, segundo Xenos (2014), a administração eficiente da manutenção e a garantia da segurança operacional dos equipamentos são indispensáveis para uma melhor produtividade e diminuição dos custos de operação.

A parada inesperada de um equipamento como a cintadeira pode até mesmo gerar um efeito em cadeia de paralisação da linha de produção de bobinas, o que eleva os prejuízos para além da manutenção que será realizada no equipamento. Além disso, o ambiente siderúrgico impõe desafios significativos para a manutenção, aumentando os riscos de segurança operacional caso não sejam devidamente administrados. Kardec e Nascif (2009) destacam que, com o desenvolvimento industrial, as falhas passaram a ter consequências cada vez mais sérias no sentido de segurança e meio ambiente. Dessa forma, as condições operacionais não apenas aumentam a probabilidade de falhas, mas também aceleram o processo de deterioração dos equipamentos, tornando o monitoramento preditivo e a detecção de anomalias, como defendido por Kardec e Nascif (2009), ainda mais importantes para evitar falhas graves ou acidentes.

Diante desse cenário de alta criticidade, a escolha da metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) justifica-se por sua abordagem lógica e estruturada, que vai além da simples prevenção de falhas; sua aplicação força uma análise profunda do contexto operacional do equipamento, de suas funções, das falhas funcionais e, crucialmente, dos modos e efeitos de cada falha. Esse processo analítico assegura que as estratégias de manutenção selecionadas sejam as mais apropriadas para mitigar os riscos identificados, resultando em um plano de manutenção tecnicamente defensável e economicamente viável.

Portanto, este estudo justifica-se pela aplicação de uma metodologia consagrada para aumentar a confiabilidade da cintadeira, visando não apenas a solução de um problema prático na indústria siderúrgica, mas também a diminuição de custos e o aumento da disponibilidade do ativo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Propor um plano de manutenção para uma cintadeira de bobinas em uma linha de laminação de tiras a quente, por meio da aplicação da metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), com vistas ao aumento da confiabilidade do equipamento e à redução de suas falhas operacionais.

1.3.2 Específicos

a) realizar uma revisão bibliográfica sobre a metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM), focando em seus fundamentos, as sete perguntas do processo e as principais ferramentas utilizadas em sua aplicação;

b) caracterizar o sistema da cintadeira em estudo e detalhar seu contexto operacional;

c) avaliar o desempenho atual do equipamento a partir do histórico de paradas, calculando o tempo médio entre falhas (*MTBF*), o tempo médio para reparo (*MTTR*) e a disponibilidade, e modelando os tempos até a falha pela distribuição de Weibull;

d) aplicar as etapas da metodologia RCM para analisar sistematicamente a cintadeira, o que inclui: identificar suas funções e falhas funcionais, a análise dos modos de falha, seus efeitos e suas consequências;

e) selecionar, a partir da análise das consequências das falhas, as tarefas de manutenção mais apropriadas e tecnicamente viáveis para gerenciar os riscos associados à cintadeira, considerando também as alterações de projeto ou de procedimento previstas pela metodologia quando nenhuma tarefa proativa se mostrar aplicável;

f) reunir as tarefas selecionadas em uma proposta de plano de manutenção para a cintadeira, comparar essa proposta com o plano atualmente adotado para o equipamento e estimar o impacto esperado sobre os indicadores de desempenho.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro apresenta o problema, a justificativa e os objetivos da pesquisa. O segundo reúne a revisão bibliográfica, que começa pelo processo de laminação de tiras a quente e pela função da cintadeira e segue pelos tipos de manutenção, pelos conceitos de confiabilidade, mantenabilidade e disponibilidade, pelos indicadores *MTBF* e *MTTR*, pela distribuição de Weibull e, por fim, pela metodologia RCM e pela ferramenta FMEA. O terceiro capítulo descreve a metodologia, com a classificação da pesquisa, as variáveis e os indicadores adotados e os instrumentos usados na coleta e na tabulação dos dados. O quarto apresenta e discute os resultados: a caracterização do equipamento e do seu contexto operacional, o diagnóstico do desempenho atual, a análise dos modos de falha, a seleção das tarefas e o plano de manutenção proposto. O quinto capítulo traz as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Processo de Laminação a Quente de Produtos Planos de Aço

A laminação é um dos mais importantes processos de conformação mecânica, no qual a seção transversal de um material metálico é reduzida pela passagem entre dois ou mais cilindros giratórios (HELMAN; CETLIN, 1993). O processo de laminação a quente de produtos planos, especificamente, transforma placas de aço, previamente aquecidas em fornos de reaquecimento, em bobinas com espessuras e propriedades mecânicas controladas (RIZZO, 2007).

Uma linha de laminação de tiras a quente (LTQ) consiste em uma instalação industrial de grande porte, cujo arranjo geral é esquematizado na FIG. 1, e seu processo produtivo, descrito na literatura por Rizzo (2007), compreende as seguintes etapas:

a) **fornos de reaquecimento**: aquecem as placas de aço a temperaturas em torno de 1250 °C;

b) **descarepador**: jatos de água de alta pressão removem a camada de óxido (carepa) formada na superfície da placa;

c) **laminador desbastador** (*roughing mill*): realiza as primeiras e mais severas reduções de espessura, em passes reversíveis;

d) **laminador acabador** (*finishing mill*): um trem de 5 a 7 gaiolas de laminação em sequência, que controlam com alta precisão a espessura final, o perfil e a planicidade da tira;

e) **mesa de resfriamento laminar**: um longo trecho com bancos de jatos de água que resfriam a tira de forma controlada para atingir a microestrutura e as propriedades mecânicas desejadas;

f) **bobinadeira** (*downcoiler*): enrola a tira de aço quente na forma de uma bobina.

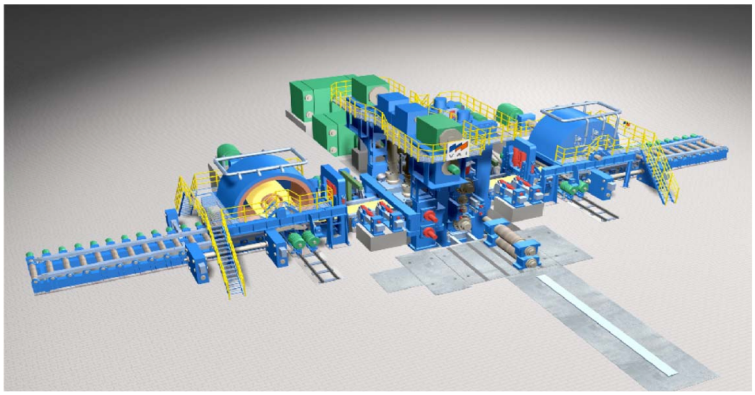


Figura 1 – Esquemático do laminador de tiras a quente do tipo *Steckel*

Fonte: Souza et al. (2012)

A planta da Gerdau, mostrada na FIG. 1, por exemplo, utiliza um laminador do tipo *Steckel*, que é um laminador de uma única cadeira reversível com fornos do tipo *coilbox* em cada lado, permitindo que a tira seja mantida em alta temperatura durante os múltiplos passes de laminação; essa tecnologia é uma alternativa compacta aos longos trens acabadores contínuos (SOUZA et al., 2012).

2.2 A Cintadeira no Contexto da Laminação a Quente

Após a bobina ser formada na bobinadeira, etapas subsequentes são necessárias para garantir sua integridade, identificação e rastreabilidade para os processos seguintes ou para o cliente final; entre essas etapas estão a marcação e a cintagem da bobina. O trabalho de Souza et al. (2012), assim, descreve a linha de laminação da Gerdau em Ouro Branco como possuindo máquinas de marcação e cintagem automáticas. A cintadeira é o equipamento responsável por aplicar cintas de aço ao redor da bobina, garantindo que ela não se desenrole e mantendo sua integridade física durante o manuseio, o armazenamento e o transporte.

Embora seja um equipamento auxiliar, sua função é crítica, conforme demonstra analogamente o estudo de caso de Sodré et al. (2014) com a máquina de marcar, uma falha na cintadeira pode levar à interrupção da remoção das bobinas da linha, criando um gargalo que, em minutos, pode forçar a parada de todo o processo de laminação, com perdas de produção e custos associados. A FIG. 2 mostra a cintadeira circunferencial de bobinas analisada neste trabalho.



Figura 2 – Cintadeira circunferencial de bobinas

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Na FIG. 2, observa-se a bobina posicionada no interior do equipamento, com o eixo na

horizontal e envolvida pela estrutura da cintadeira. Durante o ciclo, a cinta metálica é conduzida ao redor da circunferência externa da bobina e, em seguida, tensionada, cravada e cortada, de modo que a bobina deixa o equipamento cintada e pronta para o manuseio.

Para estudar a confiabilidade de sistemas como esse, é comum usar Diagramas de Blocos Funcionais (DBF), que separam o sistema em componentes e mostram como a confiabilidade de cada um e o tipo de ligação entre eles, em série ou em paralelo, influenciam a confiabilidade do conjunto. A confiabilidade de um sistema em série, por exemplo, é o produto da confiabilidade de seus componentes, o que significa que a falha de um único componente leva à falha de todo o sistema, ao passo que arranjos redundantes preservam a função do conjunto, ainda que muitas vezes com capacidade reduzida (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). A configuração adotada para a cintagem em cada instalação, portanto, determina em que medida a falha do equipamento compromete o processo, e é essa configuração que define a consequência a ser considerada na análise de criticidade.

2.3 Manutenção

A manutenção pode ser descrita como uma combinação de ações, sejam elas técnicas ou administrativas, englobando as ações de supervisão, que têm o objetivo de manter ou recolocar um item no seu estado pleno de desempenhar uma função requerida (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

As atividades de manutenção buscam incessantemente evitar a degradação dos ativos e instalações de uma organização, seja ela por desgaste natural ou pelo uso, principalmente a dos itens de alta criticidade, buscando manter o nível de qualidade e produtividade (XENOS, 1998).

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), a manutenção assume um papel estratégico dentro das indústrias após o surgimento do sistema de produção em série, sendo crucial para o processo um menor tempo de reparo possível, evitando assim prejuízos por queda de produção e gastos com manutenção.

2.4 Evolução da Manutenção

Segundo Moubray (2000), a manutenção provavelmente evoluiu mais do que qualquer outra disciplina de gerenciamento, devido aos diversos tipos de equipamentos e suas complexidades cada vez maiores, que devem ser mantidos em todo o mundo. Ainda segundo o autor, a evolução da manutenção pode ser investigada através de três gerações, como descreve a FIG. 3.

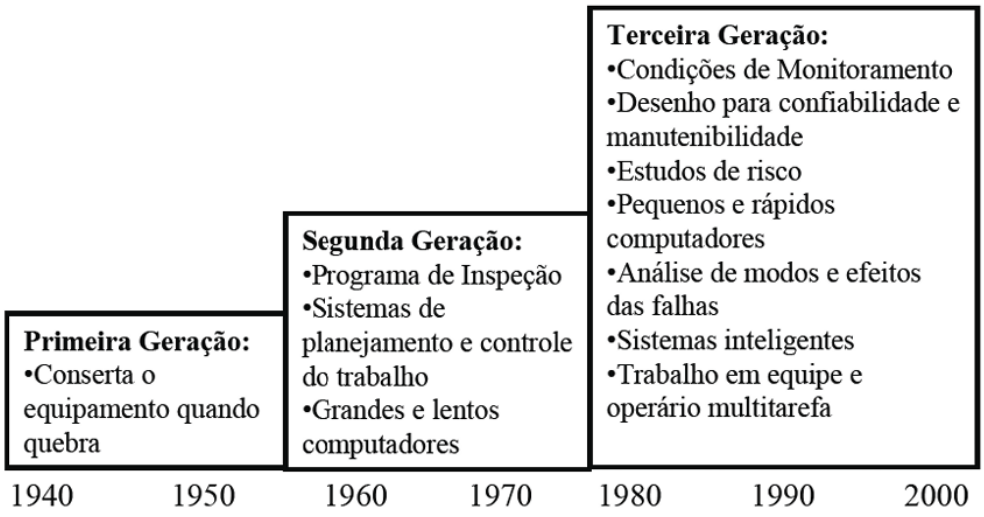


Figura 3 – Evolução da manutenção e suas gerações

Fonte: Adaptado de Moubray (2000)

De acordo com a FIG. 3, a primeira geração limita-se a consertar o equipamento quando ele quebra, a segunda introduz os programas de inspeção e os sistemas de planejamento e controle do trabalho, e a terceira reúne o monitoramento de condição, o projeto voltado à confiabilidade e à mantenabilidade, os estudos de risco e a análise de modos e efeitos de falhas, apoiados por computadores menores e mais rápidos e pelo trabalho em equipe. As subseções seguintes descrevem o contexto em que cada geração se desenvolveu.

2.4.1 Primeira Geração

A primeira geração ocorre no período da 2ª Guerra Mundial, época em que a indústria não era altamente mecanizada e o tempo de parada e espera para manutenção não eram de substancial importância. Portanto, pode-se considerar que a prevenção de falhas dos equipamentos não era prioridade para a gestão da manutenção. Entretanto, a maioria dos equipamentos possuía baixa complexidade e era superdimensionada, o que os tornava confiáveis e de fácil manutenção (MOUBRAY, 2000).

2.4.2 Segunda Geração

Durante a 2ª Guerra Mundial, a disponibilidade de mão de obra cai drasticamente, exigindo que as indústrias se tornassem cada vez mais mecanizadas, aumentando a dependência das indústrias em relação a equipamentos, que eram cada vez mais complexos e possuíam diversas funções. Com isso, o tempo de manutenção entrou no foco do gerenciamento de manutenção, tendo em vista que, quanto mais complexo, maior seria o tempo para reparo e, consequentemente, maior a dificuldade de reparo (MOUBRAY, 2000).

Inevitavelmente, percebeu-se que o melhor método para reduzir o tempo gasto para reparo seria evitar que as falhas ocorressem, fossem elas no início da vida útil ou no seu fim,

culminando no conceito de manutenção preventiva e, seguido da intensificação dos custos de manutenção, surgem os sistemas de planejamento e controle de manutenção (MOUBRAY, 2000).

Esse entendimento, de que as falhas se concentram no início e no fim da vida útil dos componentes, viria a ser representado pela curva da banheira, discutida em detalhe na Seção 2.9, e permaneceu como fundamento das políticas de substituição programada até que as pesquisas da geração seguinte demonstrassem sua aplicabilidade restrita.

2.4.3 Terceira Geração

Os investimentos em novos equipamentos, desde meados dos anos setenta, eram concebidos e planejados para assegurar o máximo retorno, assegurando que os ativos operem em plena capacidade pelo tempo requerido. À época, o custo de manutenção mantinha-se em ritmo acelerado de aumento, tornando-se o segundo maior, senão o maior, custo de operação (MOUBRAY, 2000).

Tendo em consideração a objetivação do retorno máximo de investimento em novos equipamentos, dá-se lugar a um novo pensamento sobre idade e falha, evidenciando, por meio de pesquisas, que havia cada vez menos relação entre idade operacional e a probabilidade de falha (MOUBRAY, 2000). Descobre-se, então, que não há apenas um padrão de falha, mas seis padrões, como demonstra a FIG. 4.

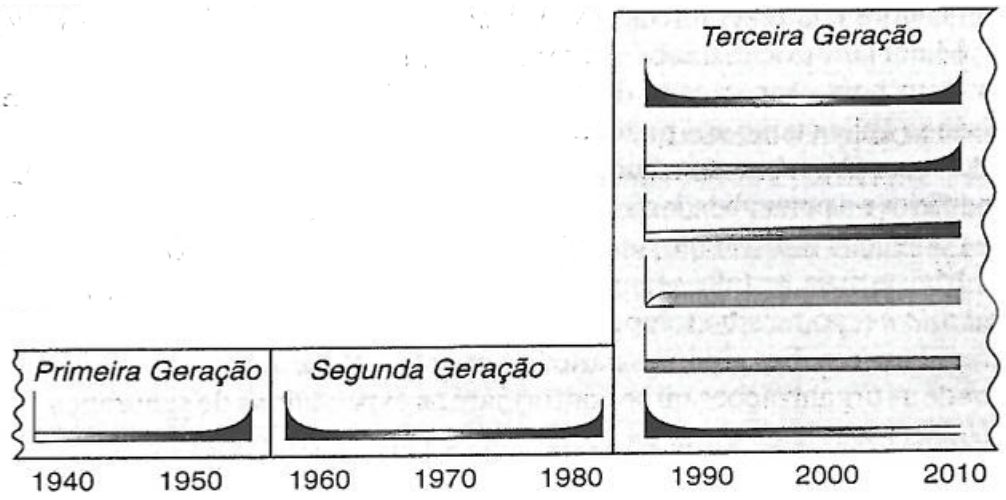


Figura 4 – Mudanças na visão do padrão de falhas do equipamento

Fonte: Adaptado de Moubray (2000)

Conforme a FIG. 4, a visão sobre as falhas evoluiu de uma única curva, na primeira geração, em que a probabilidade de falha cresce apenas no fim da vida do equipamento, para a curva da banheira, na segunda, que acrescenta as falhas prematuras do início da operação, e para seis padrões distintos, na terceira. Como parte desses padrões não apresenta aumento da probabilidade de falha com a idade, a substituição programada por tempo deixa de ser uma solução geral e passa a depender do padrão a que cada item obedece.

2.4.4 Quarta Geração

Segundo Kardec e Nascif (2009), a quarta geração da manutenção é marcada pela presença do indicador de disponibilidade, que é cada vez mais requerido dentro da manutenção, e do fator de confiabilidade, que é cada vez mais procurado dentro do setor de manutenção de qualquer empreendimento. Ainda segundo os autores, a manutenção tem a redução de falhas prematuras ou de mortalidade infantil como desafio, assumindo a prática de análise de falhas como metodologia consagrada para melhorar a *performance* dos ativos, como demonstra a FIG. 5.



EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO				
	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração
Ano	1940 – 1950	1960 – 1970	1980 – 1990	2000 – 2010
Aumento das expectativas em relação à Manutenção	• Conserto após a falha	• Disponibilidade crescente • Maior vida útil do equipamento	• Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Melhor relação custo-benefício • Preservação do meio ambiente	• Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Preservação do meio ambiente • Segurança • Influir nos resultados do negócio • Gerenciar os ativos
Visão quanto à falha do equipamento	• Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham	• Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira	• Existência de 6 padrões de falhas (Nowlan & Heap e Moubray) Ver Capítulo 5	• Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões A e F. (Nowlan & Heap e Moubray) Ver Capítulo 5
Mudança nas técnicas de Manutenção	• Habilidades voltadas para o reparo	• Planejamento manual da manutenção • Computadores grandes e lentos • Manutenção Preventiva (por tempo)	• Monitoramento da condição • Manutenção Preditiva • Análise de risco • Computadores pequenos e rápidos • Softwares potentes • Grupos de trabalho multidisciplinares • Projetos voltados para a confiabilidade • Contratação por mão de obra e serviços	• Aumento da Manutenção Preditiva e Monitoramento da Condição • Minimização nas Manutenções Preventiva e Corretiva não Planejada • Análise de Falhas • Técnicas de confiabilidade • Manutenibilidade • Engenharia de Manutenção • Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e Custo do Ciclo de Vida. • Contratação por resultados

Figura 5 – Evolução da manutenção

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009)

A FIG. 5 organiza essa evolução em três dimensões: as expectativas em relação à manutenção, a visão sobre a falha do equipamento e as técnicas empregadas. Na quarta geração, as expectativas passam a incluir a segurança, a preservação do meio ambiente e a influência nos resultados do negócio, a visão sobre a falha concentra-se na redução das falhas prematuras,

e as técnicas privilegiam o monitoramento da condição, a análise de falhas e a engenharia de manutenção, com redução das intervenções preventivas e das corretivas não planejadas.

2.5 Tipos de Manutenção

As atividades de manutenção costumam ser classificadas segundo o momento em que a intervenção ocorre em relação à falha, distinção que organiza tanto o planejamento das equipes quanto a alocação dos recursos. As subseções seguintes apresentam os quatro tipos que compõem essa classificação, os quais não se excluem mutuamente: um mesmo equipamento costuma reunir componentes atendidos por estratégias distintas, e a escolha entre elas é justamente o que a metodologia RCM, tratada na Seção 2.10, se propõe a fundamentar.

2.5.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é aquela executada após a ocorrência da falha, com o objetivo de restabelecer a função perdida. Segundo Xenos (1998), sua adoção deve ser precedida da avaliação sobre ser mais econômico reparar a falha do que preveni-la, pois há componentes cuja substituição preventiva custa mais do que o reparo eventual. Essa comparação, contudo, precisa incorporar a perda de produção decorrente da parada do equipamento, parcela que frequentemente supera o custo direto do reparo e inverte o resultado da análise.

Ainda que a manutenção corretiva seja adotada deliberadamente para determinados componentes, o autor ressalta que a identificação das falhas, de suas causas e o bloqueio dessas causas permanecem fundamentais para a redução dos custos de manutenção. Aceitar a falha como estratégia não equivale, portanto, a renunciar à sua análise: sem o registro sistemático das ocorrências, perde-se a informação que permitiria identificar quais componentes deveriam migrar para uma estratégia proativa.

2.5.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva compreende as intervenções realizadas em intervalos predeterminados, por meio de ações sistemáticas como inspeções e substituições programadas, com a finalidade de evitar que a falha ocorra durante a operação (XENOS, 1998). Seu efeito econômico decorre da redução da frequência das falhas, que eleva a disponibilidade do ativo e diminui as interrupções não previstas da linha de produção.

O ponto crítico dessa estratégia é a definição da periodicidade. Um intervalo excessivamente longo não impede a falha, ao passo que um intervalo curto demais consome recursos e, em componentes cuja taxa de falhas não cresce com o tempo, pode até elevar a frequência de ocorrências, como se examina na Seção 2.13.1.1. É essa dificuldade que justifica a modelagem estatística dos tempos até a falha, em lugar da adoção de periodicidades arbitradas ou herdadas de recomendações genéricas do fabricante.

2.5.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva baseia-se no acompanhamento de parâmetros que indicam a condição do equipamento, de modo que a intervenção seja realizada apenas quando há evidência de degradação. Conforme Xenos (1998), trata-se de uma forma de inspeção que integra o planejamento da manutenção preventiva, e não de uma estratégia dela independente.

Sua principal vantagem está em substituir o critério temporal pelo critério de condição, evitando tanto a intervenção desnecessária quanto a falha em operação. Essa vantagem, porém, está condicionada à existência de um intervalo mensurável entre o instante em que a degradação se torna detectável e o instante da falha funcional, conceito formalizado pela curva P-F e discutido na Seção 2.10. Quando esse intervalo inexiste ou é demasiado curto, a estratégia preditiva perde a aplicabilidade, ainda que o parâmetro seja tecnicamente mensurável.

2.5.4 Manutenção Detectiva

A manutenção detectiva destina-se a verificar o funcionamento de sistemas de proteção, comando e controle, buscando identificar falhas ocultas, ou seja, aquelas que não se manifestam durante a operação normal e permanecem imperceptíveis às equipes de operação e manutenção (KARDEC; NASCIF, 2009). Um dispositivo de segurança que deixou de funcionar não altera o comportamento do equipamento enquanto não for solicitado, e sua falha só se revela no momento em que deveria atuar, geralmente em conjunto com a ocorrência que ele deveria conter.

Daí decorre a importância dessa estratégia em instalações industriais de grande porte, nas quais a multiplicação dos sistemas de proteção aumenta proporcionalmente a quantidade de falhas potencialmente ocultas. A metodologia RCM confere tratamento específico a esse tipo de falha, por entender que suas consequências só se materializam em combinação com outra ocorrência, o que exige critério próprio de avaliação.

2.6 A Gestão da Manutenção no Contexto Siderúrgico

A manutenção industrial atravessou uma profunda evolução, transitando de uma função historicamente reativa, focada em reparos emergenciais, para se consolidar como uma área de valor estratégico e essencial à competitividade das organizações. Essa transformação é particularmente crítica em setores de capital intensivo e processos de fluxo contínuo, como a siderurgia, nos quais a gestão eficiente dos ativos físicos se apresenta como um pilar determinante para a produtividade, a lucratividade e, fundamentalmente, para a segurança e estabilidade de toda a operação.

A concepção moderna da manutenção, que conforme aponta Xenos (2014) ultrapassa a noção de mero reparo, concentra-se na garantia de que equipamentos e instalações sejam sistematicamente preservados contra os efeitos da degradação, tendo como objetivo primordial assegurar a continuidade de suas funções essenciais, a integridade do processo produtivo e a qualidade final do produto. A vulnerabilidade inerente a sistemas produtivos de alta integração,

como uma linha de laminação de tiras a quente (LTQ), reside justamente em sua natureza interconectada, na qual a interrupção não planejada de um único equipamento pode desencadear severas consequências em cascata. É nesse contexto que a falha de um só componente pode originar o fenômeno conhecido como efeito gargalo, resultando na paralisação completa de toda a cadeia produtiva e gerando perdas substanciais.

Essa criticidade sistêmica é ilustrada por um estudo de caso relevante na ArcelorMittal Tubarão, documentado por Sodré et al. (2014), ao demonstrar que a falha em uma máquina de marcar automática, equipamento considerado auxiliar e posicionado ao final da linha, foi suficiente para gerar um gargalo insustentável que forçou a interrupção completa do laminador. Este exemplo evidencia, de forma clara, a elevada criticidade de todos os componentes do sistema, mesmo aqueles que não atuam diretamente na transformação metalúrgica do aço, justificando assim a necessidade da implementação de abordagens de manutenção que sejam proativas e integradas à estratégia do negócio.

2.7 Tempo Médio até a Falha

O Tempo Médio até a Falha, do inglês *Mean Time To Failure* (*MTTF*), indica o tempo médio de operação de um item até que ele falhe. Quando o item é reparável, como é o caso da cintadeira, o indicador equivalente é o Tempo Médio Entre Falhas (*MTBF*), que mede o tempo médio entre uma falha e a seguinte. Os dois podem ser calculados pela Equação 2.1:

$$MTTF = \frac{\text{tempo total de operação}}{\text{número de falhas}} \tag{2.1}$$

2.8 Tempo Médio de Reparo

O tempo médio para reparo, do inglês *Mean Time To Repair* (*MTTR*), corresponde ao tempo médio para reparo do equipamento após a detecção da falha, ou, mais conhecido, tempo médio de manutenção corretiva, e pode ser descrito pela Equação 2.2:

$$MTTR = \frac{\text{tempo de reparo}}{\text{número de reparos}} \tag{2.2}$$

2.9 Conceitos Fundamentais de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade

No cerne da manutenção moderna, o conceito de confiabilidade ultrapassou uma noção abstrata para se estabelecer como uma medida de desempenho quantificável, a qual, segundo a definição de Fogliatto e Ribeiro (2009), corresponde à probabilidade de um item, seja este um componente, um equipamento ou um sistema completo, desempenhar adequadamente sua função especificada por um determinado período, sob condições pré-estabelecidas de operação.

Desse modo, pode-se descrever matematicamente que, se a variável aleatória T representa o tempo até a falha de um item, a confiabilidade em um instante de tempo t, denotada por $R(t)$, é

a probabilidade P de o item sobreviver além desse instante:

$$R(t) = P(T > t) \tag{2.3}$$

Ademais, associada à confiabilidade está a taxa de falhas, $\lambda(t)$, que representa a probabilidade instantânea de um item falhar no instante t, dado que ele sobreviveu até aquele momento. O comportamento da taxa de falhas ao longo da vida de uma população de itens é frequentemente descrito pela curva da banheira, ilustrada na FIG. 6. Conforme Fogliatto e Ribeiro (2009), este modelo é dividido em três fases:

a) **mortalidade infantil**: fase inicial com taxa de falhas decrescente;

b) **vida útil (falhas aleatórias)**: fase de taxa de falhas aproximadamente constante;

c) **desgaste**: fase final com taxa de falhas crescente.

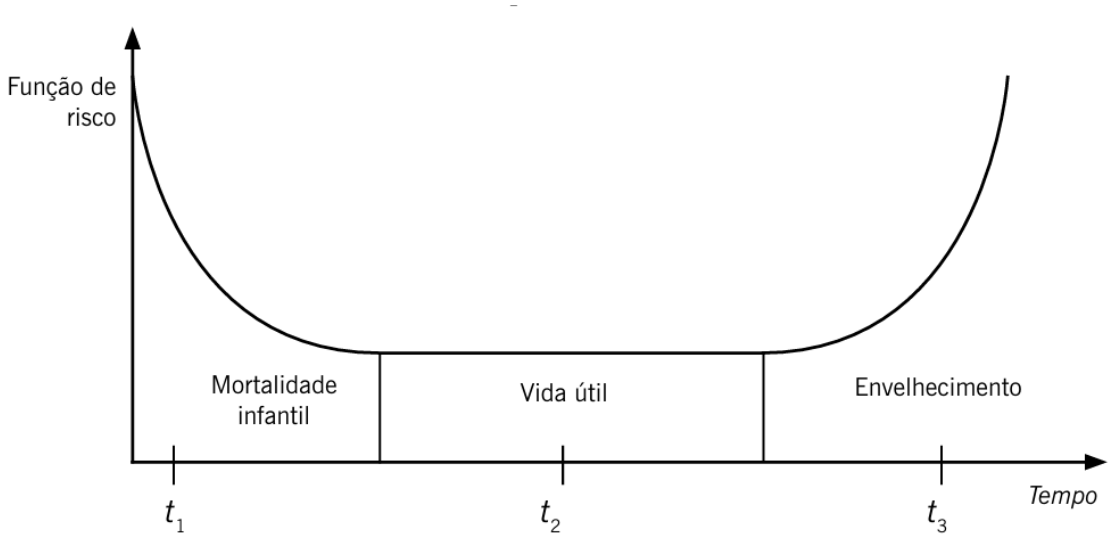


Figura 6 – Exemplo de curva da banheira

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009)

Na FIG. 6, a função de risco, isto é, a taxa de falhas, é elevada no início da operação e decresce rapidamente, permanece aproximadamente constante durante a vida útil e volta a crescer na fase de envelhecimento, que corresponde ao desgaste. Cada trecho está associado a uma faixa do parâmetro de forma da distribuição de Weibull, discutido na Seção 2.13.1.1, e a distinção entre eles importa para a manutenção, pois a substituição preventiva por tempo só reduz falhas no trecho de envelhecimento.

Contudo, a confiabilidade (a capacidade de não falhar) é apenas parte da equação, em que sua contraparte é a mantenabilidade, definida como a probabilidade de um item que falhou ser restaurado à sua condição operacional dentro de um período especificado, quando a manutenção

é executada sob condições prescritas (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Em termos práticos, a mantenabilidade mede a facilidade e rapidez com que um equipamento pode ser reparado.

A combinação desses dois fatores resulta no indicador de desempenho mais importante para a operação: a disponibilidade, que representa a porcentagem do tempo em que um equipamento está apto a produzir. A disponibilidade, *A*, pode ser calculada pela relação entre o *MTBF* e a soma do *MTBF* com o *MTTR*:

$$A = \frac{MTBF}{MTTR + MTBF} \tag{2.4}$$

Essa relação demonstra que um ativo pode apresentar disponibilidade elevada não apenas por ser muito confiável, isto é, por possuir *MTBF* alto, mas também por ser de reparo fácil e rápido, com *MTTR* baixo. Disso decorre uma implicação relevante para a análise: a disponibilidade isolada não distingue um equipamento que falha pouco de outro que falha com frequência mas é reparado depressa, situações que exigem estratégias de manutenção inteiramente distintas.

2.10 Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM)

A crescente demanda por alta confiabilidade em contextos industriais complexos impulsionou a consolidação de metodologias de manutenção estruturadas, entre as quais se destaca a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM, do inglês *Reliability Centered Maintenance*), a qual é formalmente definida por Moubray (2000), uma das maiores referências na área, como um processo usado para determinar o que deve ser feito para assegurar que qualquer ativo físico continue a fazer o que seus usuários querem que ele faça em seu contexto operacional atual.

Essa abordagem, portanto, transfere o foco da simples prevenção de falhas do equipamento para a preservação da função do sistema como um todo, objetivo que é metodologicamente alcançado por meio de um processo sistemático guiado por sete perguntas fundamentais, destinadas a construir um entendimento profundo do ativo dentro de seu contexto operacional específico:

a) quais são as funções e os padrões de desempenho do ativo em seu contexto operacional?

b) de que maneiras ele pode falhar em satisfazer suas funções?

c) o que causa cada falha funcional?

d) o que acontece quando cada falha ocorre?

e) de que maneira cada falha importa?

f) o que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha?

g) o que deverá ser feito se uma tarefa proativa adequada não puder ser encontrada?

Ao responder a essas questões de forma sistemática, o RCM garante que as estratégias de manutenção selecionadas sejam as mais adequadas e eficientes para o contexto operacional do ativo (MOUBRAY, 2000). A grande força do RCM reside nessa fase de decisão, na qual se utiliza um diagrama lógico para selecionar as estratégias de manutenção mais apropriadas e, após identificar um modo de falha e avaliar suas consequências (sejam elas de segurança, ambientais, operacionais ou não operacionais), o RCM questiona se uma tarefa proativa é tecnicamente viável e se vale a pena realizá-la.

Uma tarefa proativa só é viável se for capaz de reduzir a probabilidade de falha a um nível tolerável. Para isso, o conceito da curva P-F, ilustrado na FIG. 7, é fundamental, pois tarefas de manutenção na condição (preditivas) dependem da existência de um intervalo P-F detectável (MOUBRAY, 2000).

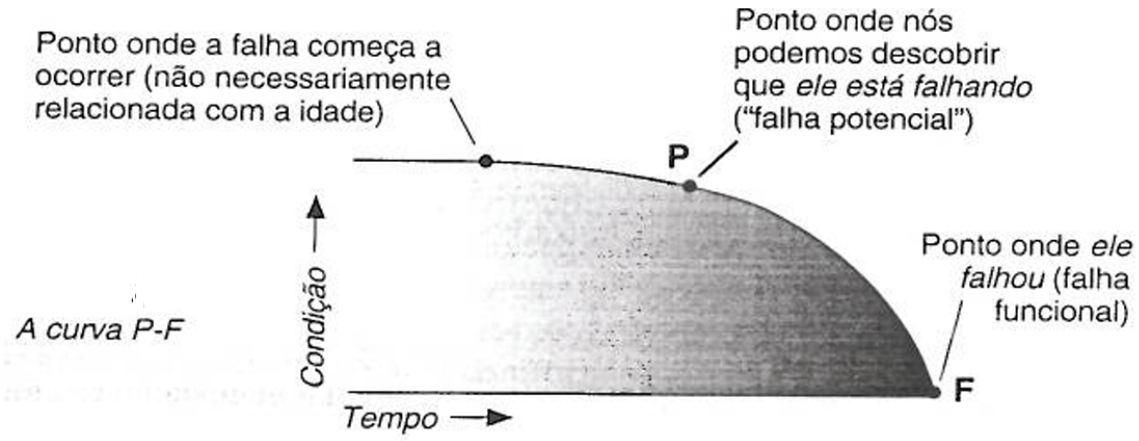


Figura 7 – A curva P-F

Fonte: Adaptado de Moubray (2000)

De acordo com a FIG. 7, a deterioração do item começa em um instante que não guarda, necessariamente, relação com a idade, torna-se detectável no ponto P, denominado falha potencial, e progride até o ponto F, em que ocorre a falha funcional. O intervalo entre esses dois pontos, chamado intervalo P-F, é o tempo disponível para identificar a degradação e intervir antes da perda da função, razão pela qual a periodicidade de uma tarefa sob condição deve ser inferior a ele (MOUBRAY, 2000).

Quando nenhuma tarefa proativa se mostra viável, o processo não se encerra sem resposta: o RCM prevê como alternativas a alteração de projeto do componente ou, quando as consequências da falha o permitem, a adoção deliberada da manutenção corretiva planejada, decisão que passa a ser fundamentada e não simplesmente omissa.

2.11 A Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA)

Para responder às questões centrais do RCM, em especial "de que maneiras ele pode falhar?" e "o que causa cada falha funcional?", uma ferramenta analítica destaca-se: a Análise

dos Modos de Falha e seus Efeitos, conhecida como FMEA (do inglês, *Failure Mode and Effect Analysis*). O FMEA é um método sistemático que visa reconhecer e avaliar as falhas potenciais de um sistema e seus efeitos, identificar ações para eliminar ou reduzir a chance de sua ocorrência e documentar o processo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). No âmbito do RCM, portanto, o FMEA não é uma metodologia concorrente, mas sim a principal ferramenta técnica empregada durante a fase de análise, fornecendo a estrutura necessária para identificar os modos de falha, suas causas e seus efeitos, informações que constituem a matéria-prima para a posterior avaliação de consequências e seleção das tarefas de manutenção.

A priorização dos modos de falha identificados é conduzida por meio de três índices atribuídos a cada um deles. A severidade mede a gravidade do efeito da falha sobre o sistema, a ocorrência expressa a frequência com que o modo se manifesta e a detecção avalia a probabilidade de que a falha seja identificada antes de produzir seu efeito, de modo que valores elevados nesse último índice correspondem a menor capacidade de detecção (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Os três índices são usualmente graduados em escala de 1 a 10 e seu produto resulta no número de prioridade de risco, designado pela sigla RPN (do inglês, *Risk Priority Number*), conforme a Equação 2.5:

$$RPN = S \times O \times D \tag{2.5}$$

em que S, O e D representam, respectivamente, os índices de severidade, ocorrência e detecção. O RPN varia, portanto, de 1 a 1000, e os modos de falha com valores mais altos são os que demandam tratamento prioritário. A definição das escalas associadas a cada índice não é universal e deve refletir o contexto do sistema analisado, razão pela qual as escalas adotadas neste trabalho são apresentadas na Seção 3.4.

2.12 Consequências das Falhas e Seleção das Tarefas

A etapa que distingue o RCM de outras abordagens de planejamento da manutenção é a avaliação das consequências da falha, pois é dela que decorre a decisão sobre o que fazer. Segundo Moubray (2000), as consequências classificam-se em quatro categorias, ordenadas por prioridade. As falhas ocultas são aquelas que não se tornam evidentes para a equipe de operação em condições normais, situação típica dos dispositivos de proteção, e cuja consequência somente se materializa em combinação com uma segunda falha. As consequências para a segurança e o meio ambiente abrangem as falhas com potencial de causar lesão a pessoas ou de infringir normas ambientais. As consequências operacionais reúnem as falhas que afetam a capacidade produtiva, seja pela interrupção do processo, seja pela redução do volume ou da qualidade da produção. As consequências não operacionais, por fim, compreendem as falhas cujo efeito se restringe ao custo direto do reparo.

Essa classificação determina o critério de aceitação da tarefa. Para falhas com consequên-

cias de segurança ou ambientais, a tarefa proativa deve reduzir a probabilidade de ocorrência a um nível tolerável, e a ausência de tarefa viável obriga à alteração de projeto. Já para as consequências operacionais e não operacionais, o critério é econômico: a tarefa somente se justifica se seu custo for inferior ao das consequências que ela evita, sendo admissível, em caso contrário, deixar que a falha ocorra e tratá-la de forma corretiva (MOUBRAY, 2000).

Definidas as consequências, o RCM emprega um diagrama de decisão que conduz à seleção da tarefa. As alternativas disponíveis, conforme Moubray (2000), são as tarefas sob condição, que monitoram sintomas de falha potencial e dependem da existência do intervalo P-F discutido na Seção 2.10; as tarefas de restauração e de descarte programados, que devolvem o item à condição original ou o substituem em intervalo fixo, e que exigem a existência de uma idade a partir da qual a probabilidade condicional de falha aumenta de forma perceptível; e as tarefas de busca de falha, aplicáveis a falhas ocultas, que verificam periodicamente se a função de proteção permanece disponível.

Propõe-se, neste trabalho, considerar ainda uma quarta possibilidade: a verificação funcional de parâmetros de regulagem. Distingue-se das tarefas sob condição por não buscar sintomas de degradação, e das tarefas de restauração por não devolver o item à condição original nem reiniciar sua vida útil, limitando-se a medir uma grandeza de ajuste e corrigi-la quando situada fora da faixa especificada. Sua aplicabilidade não depende, por isso, nem da existência de intervalo P-F nem do comportamento da taxa de falhas com a idade, características que a tornam adequada a modos de falha associados à perda de regulagem.

Quando nenhuma tarefa proativa se mostra tecnicamente viável ou economicamente justificável, restam ao RCM duas alternativas: a alteração de projeto, que modifica o item ou o processo de modo a eliminar o modo de falha ou a torná-lo tratável, e a manutenção corretiva planejada, que consiste em aceitar a ocorrência da falha e preparar-se para repará-la. Esta última somente é admissível quando as consequências da falha não envolvem segurança ou meio ambiente (MOUBRAY, 2000).

2.13 Distribuição de Probabilidade

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), a definição de confiabilidade de uma unidade pode ser dada em termos da probabilidade da sua sobrevivência até um determinado tempo t de interesse do usuário, sendo a probabilidade determinada pela modelagem dos tempos até a falha do objeto de estudo. Portanto, o estudo da modelagem dos tempos até a falha é de suma importância para os estudos de confiabilidade. Pode-se considerar o "tempo até a falha" como o tempo decorrido desde seu início de operação até a sua primeira falha.

2.13.1 Distribuição de Weibull e Weibull de Três Parâmetros

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), a distribuição de Weibull é apropriada para a modelagem de tempos até a falha por acomodar funções de risco constantes, estritamente crescentes e

estritamente decrescentes, sendo uma das mais importantes em confiabilidade devido à sua flexibilidade e à sua capacidade de representar amostras com comportamentos distintos. Os autores acrescentam que, em amostras pequenas, supor tempos até a falha seguindo uma distribuição de Weibull costuma ser um bom ponto de partida para a análise.

Antes das formulações, convém uma observação sobre a notação, uma vez que a literatura não é uniforme nesse ponto. Neste trabalho adota-se a simbologia mais difundida na prática de engenharia de confiabilidade, na qual β designa o parâmetro de forma, η o parâmetro de escala e γ o parâmetro de posição. Parte da literatura consultada, incluindo Fogliatto e Ribeiro (2009), emprega γ para o parâmetro de forma e θ para o de escala. Trata-se apenas de diferença de símbolos: as funções e as interpretações são as mesmas.

Na forma de três parâmetros, a função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull é dada pela Equação 2.6:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right] \tag{2.6}$$

válida para $t \geq \gamma$, $\beta > 0$ e $\eta > 0$, sendo β o parâmetro de forma, η o parâmetro de escala e γ o parâmetro de posição. A função de confiabilidade, que fornece a probabilidade de o item operar até o instante t sem falhar, decorre diretamente da Equação 2.6:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right] \tag{2.7}$$

A função de risco, que expressa a taxa instantânea de falha, e o tempo médio até a falha da distribuição são dados, respectivamente, pelas Equações 2.8 e 2.9:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \tag{2.8}$$

$$MTTF = \gamma + \eta\,\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \tag{2.9}$$

em que $\Gamma(\cdot)$ designa a função gama (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

2.13.1.1 Significado dos parâmetros

O parâmetro de forma β é o que orienta a escolha da tarefa de manutenção. Quando $\beta < 1$, a taxa de falhas é decrescente e as falhas se concentram no início da vida do item, o que costuma indicar problemas de montagem, instalação ou qualidade do sobressalente. Com β próximo de 1, a taxa de falhas fica praticamente constante, a distribuição se aproxima da exponencial e as falhas são aleatórias, situação em que substituir o item por tempo não traz

ganho e a manutenção preditiva ou detectiva é mais indicada. Com $\beta > 1$, a taxa de falhas cresce ao longo do tempo, o que caracteriza desgaste e justifica intervenções preventivas com periodicidade definida a partir do parâmetro de escala (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

O parâmetro de escala η é frequentemente designado vida característica da unidade. Isso decorre de uma propriedade da Equação 2.7: ao se fazer $t - \gamma = \eta$, obtém-se $R = e^{-1} \approx 0{,}368$, qualquer que seja o valor de β. Em outras palavras, aproximadamente 63 % da população falha até a vida característica, o que faz de η uma referência natural na definição de periodicidades de intervenção (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

O parâmetro de posição γ desloca a distribuição ao longo do eixo do tempo e é também conhecido como parâmetro de vida mínima ou de garantia (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Quando $\gamma > 0$, o modelo assume que nenhuma falha ocorre antes desse instante, o que é fisicamente coerente com componentes sujeitos a desgaste progressivo, nos quais existe um período inicial durante o qual a falha é improvável. Quando $\gamma = 0$, a Equação 2.6 reduz-se à forma de dois parâmetros. É justamente a possibilidade de estimar γ a partir dos dados que torna a Weibull de três parâmetros mais aderente a históricos de campo do que a formulação de dois parâmetros.

2.13.1.2 Estimação dos parâmetros

Os parâmetros de uma distribuição de probabilidade são estimados a partir dos tempos até a falha observados. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), os métodos mais difundidos são o dos momentos, o dos mínimos quadrados e o da máxima verossimilhança, sendo este último o mais utilizado. Os autores destacam que um bom estimador deve ser não tendencioso, consistente, eficiente e suficiente, e que os estimadores de máxima verossimilhança apresentam propriedades assintóticas favoráveis: para amostras grandes, são não tendenciosos e apresentam a menor variância possível.

O método da máxima verossimilhança consiste em construir a função de verossimilhança da amostra, que é o produto das densidades avaliadas em cada tempo observado, e determinar os valores dos parâmetros que a maximizam. Para a distribuição de Weibull, a maximização é obtida derivando o logaritmo da função de verossimilhança em relação a cada parâmetro e igualando as derivadas a zero, conforme indicam as Equações 2.10 e 2.11, apresentadas aqui na notação adotada neste trabalho e para o caso de amostra completa com $\gamma = 0$:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} t_i^{\hat{\beta}} \ln t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i^{\hat{\beta}}} - \frac{1}{\hat{\beta}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \ln t_i = 0 \tag{2.10}$$

$$\hat{\eta} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} t_i^{\hat{\beta}} \right]^{1/\hat{\beta}} \tag{2.11}$$

Conforme observam Fogliatto e Ribeiro (2009), a Equação 2.10 não permite isolar o

parâmetro de forma de maneira independente, de modo que sua estimativa precisa ser obtida por processo iterativo; obtido $\hat{\beta}$, o valor é substituído na Equação 2.11 para a estimativa do parâmetro de escala. Os autores registram que a estimação dos parâmetros do modelo de Weibull não dispõe de formulário fechado de baixa complexidade e costuma demandar o uso de pacotes computacionais dedicados. Na formulação de três parâmetros, a estimativa de γ é incorporada ao mesmo procedimento numérico de maximização da verossimilhança, o que aumenta o esforço computacional mas não altera a lógica do método.

2.13.1.3 Verificação da aderência

Estimar os parâmetros não garante que a distribuição escolhida descreva adequadamente os dados, razão pela qual o ajuste deve ser verificado. A verificação gráfica é feita pelo papel de probabilidade, no qual os tempos até a falha são plotados em escala transformada de modo que uma amostra proveniente da distribuição hipotetizada se disponha ao longo de uma reta; quanto mais próximos da reta estiverem os pontos, maior a plausibilidade da distribuição, sendo os pontos das extremidades particularmente informativos (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

À inspeção gráfica somam-se os testes analíticos de aderência, que comparam a função de distribuição empírica com a hipotetizada e fornecem uma medida objetiva do ajuste. Fogliatto e Ribeiro (2009) citam o teste do qui-quadrado e o de Kolmogorov-Smirnov (KS), indicando que a distribuição selecionada deve ser aprovada em ambos para que a hipótese não seja rejeitada. Também é usual, em aplicações de confiabilidade, o emprego da estatística de Anderson-Darling (AD), que atribui maior peso às caudas da distribuição (ANDERSON; DARLING, 1954) e permite comparar diretamente o ajuste de modelos concorrentes: entre distribuições candidatas, seleciona-se aquela com o menor valor da estatística. Quando os modelos comparados diferem no número de parâmetros, como as formulações de dois e de três parâmetros da distribuição de Weibull, recorre-se também aos critérios de informação de Akaike (AIC) e bayesiano (BIC). Ambos partem da verossimilhança maximizada e a penalizam pelo número de parâmetros estimados, sendo a penalização do BIC mais severa e crescente com o tamanho da amostra; entre os modelos candidatos, prefere-se o de menor valor (AKAIKE, 1974; SCHWARZ, 1978).

2.14 Síntese da Revisão Bibliográfica

Conforme demonstrado na literatura (KARDEC; NASCIF, 2009; SODRÉ et al., 2014), a manutenção em uma planta siderúrgica não consiste na função de apenas reparo, para se tornar estratégica, dado que falhas em equipamentos, mesmo nos considerados auxiliares, podem acarretar perdas de produção substanciais. Nesse contexto, a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) surge como uma metodologia robusta e consagrada para a definição de estratégias de manutenção fundamentadas na preservação da função e na análise sistemática dos riscos de falha, tornando o complexo e crítico processo de laminação a quente um campo particularmente fértil para sua aplicação.

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe-se a aplicar a metodologia RCM em um equipamento auxiliar localizado no final da linha de laminação: a cintadeira. A escolha deste ativo se justifica pelo alto impacto operacional associado às suas falhas, também indicado pela literatura (SODRÉ et al., 2014), o que torna a aplicação detalhada do RCM uma contribuição de alta relevância prática, visando aumentar não apenas a confiabilidade do equipamento, mas, por consequência, a estabilidade de todo o processo produtivo.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o percurso metodológico adotado para a aplicação da metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade a uma cintadeira circunferencial de bobinas instalada em uma linha de laminação de tiras a quente. São descritos, na sequência, a classificação da pesquisa, o objeto de estudo e a origem dos dados, as variáveis e os indicadores considerados, as escalas de avaliação empregadas na análise dos modos de falha, os instrumentos de coleta e os procedimentos de tratamento aplicados aos registros antes da análise.

3.1 Tipo de Pesquisa

A metodologia empregada neste trabalho, que teve como ponto de partida uma pesquisa literária para a construção do embasamento teórico sobre Manutenção Centrada em Confiabilidade, será detalhada a seguir quanto à sua classificação em relação à forma de abordagem, aos objetivos propostos e aos procedimentos técnicos aplicados.

Quanto à forma de abordagem do problema, a pesquisa classifica-se como qualitativa. Segundo Prodanov e Freitas (2013, p. 70), nessa abordagem a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicas, o ambiente natural é a fonte direta para a coleta de dados e o processo e seu significado constituem os focos principais da análise. Os mesmos autores distinguem a abordagem qualitativa da quantitativa nos seguintes termos:

> A utilização desse tipo de abordagem difere da abordagem quantitativa pelo fato de não utilizar dados estatísticos como o centro do processo de análise de um problema, não tendo, portanto, a prioridade de numerar ou medir unidades. Os dados coletados nessas pesquisas são descritivos, retratando o maior número possível de elementos existentes na realidade estudada. Preocupa-se muito mais com o processo do que com o produto (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 70).

Esse enquadramento corresponde ao percurso adotado neste trabalho, cujo centro é a interpretação do comportamento de falha da cintadeira segundo a lógica do RCM. A identificação das funções e das falhas funcionais, a análise dos modos de falha, de suas causas e de seus efeitos e a seleção das tarefas de manutenção resultam da interpretação dos registros de manutenção, dos documentos da empresa e da observação do equipamento em seu ambiente de operação. Os indicadores de manutenção e a modelagem dos tempos até a falha, apresentados no Capítulo 4, não constituem o objeto da investigação, mas instrumentos descritivos que caracterizam o comportamento das falhas e subsidiam essa interpretação, uma vez que o estudo não formula hipóteses a serem testadas nem pretende generalizar estatisticamente seus resultados. Como observam Prodanov e Freitas (2013, p. 70-71), é a maneira pela qual se pretende analisar o problema, e o enfoque adotado, que determina o caráter quantitativo ou qualitativo de uma metodologia.

Para classificar este trabalho quanto aos seus objetivos, tomam-se como base as tipologias consolidadas na literatura que, segundo Gil (2008), Lakatos e Marconi (2000) e Vergara (2000), classificam a pesquisa como híbrida, sendo aplicada e exploratória simultaneamente. Seu caráter aplicado é claro, pois o foco é a proposta de uma solução para um problema concreto e imediato no chão de fábrica, visando um impacto prático e mensurável na confiabilidade do equipamento. Essa finalidade é precisamente o que define a pesquisa aplicada, conforme descrito por Brasileiro:

> É o tipo de pesquisa com finalidade prática. Assim, com o objetivo de resolver um problema concreto, o pesquisador apresenta uma proposta, coloca-a em prática e observa as reações e os resultados do fenômeno (BRASILEIRO, 2021, p. 77).

Contudo, para que essa aplicação seja possível, é indispensável uma fase anterior de caráter exploratório, que é dedicada a aprofundar o conhecimento sobre o ativo e seu contexto, sendo crucial para fornecer familiaridade com o problema que os manuais e dados existentes não fornecem por completo. Este procedimento investigativo se alinha com a visão de Mattar (2013) sobre a pesquisa exploratória, que frequentemente se utiliza de fontes secundárias, estudos de caso e observação para um melhor entendimento do fenômeno.

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida a partir de uma pesquisa bibliográfica inicial, que, baseada na análise de materiais como livros e artigos (GIL, 2019), teve o objetivo de construir uma sólida base teórica sobre a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) e suas aplicações. Essa fundamentação permitiu que a investigação avançasse para uma pesquisa documental, focada no exame de fontes primárias da empresa, como manuais, registros de manutenção e relatórios de parada, caracterizando um procedimento alinhado à definição de pesquisa documental apresentada por Brasileiro (2021, p. 78):

> É um estudo realizado quando há a necessidade de análise de documentos de primeira mão, ou seja, que ainda não foram analisados, e que possam contribuir para a realização da investigação proposta (GIL, 2006). Tais documentos, impressos ou digitais, podem conter informações de cunho público ou privado, históricas ou oficiais, reveladas em fotos, relatos, registros, anais, circulares, balancetes etc. Para a interpretação dos dados documentais, o pesquisador pode construir um roteiro para identificação dos dados, a partir dos objetivos propostos, e para a interpretação desses dados, pode lançar mão da análise de conteúdo ou análise do discurso.

Com o conhecimento teórico e documental consolidado, o trabalho culminou em um estudo de caso, abordagem escolhida por ser ideal para a análise profunda do objeto de estudo, conforme aponta Gil (2019). A condução deste estudo de caso, por sua vez, seguiu a perspectiva apresentada por Brasileiro (2021, p. 79), que detalha o método como um processo de raciocínio dedutivo, descrito da seguinte forma:

> Seguindo um raciocínio dedutivo, o pesquisador estuda uma teoria e analisa um caso específico. É usado em pesquisas descritivas, para compreender determinados fenôme-

> nos ou situações de modo profundo e detalhado (DENCKER, 2000), possibilitando ao leitor sua compreensão e visualização. É muito utilizado para apresentar vivências de grupos, empresas, comunidades etc., recorrendo a instrumentos de coleta como observação, análise de documentos, entrevista e história da vida. Atualmente, tem sido prática a elaboração de estudos de casos duplos e estudos de casos múltiplos. Esse meio de pesquisa também tem sido considerado um gênero textual.

É a articulação desses procedimentos que torna possível aplicar o raciocínio dedutivo à teoria do RCM, valendo-se dos documentos e da observação do fenômeno para compreender em profundidade a realidade operacional da cintadeira e, a partir dela, propor um plano de manutenção eficaz.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Objeto de Estudo

O ativo estudado neste trabalho é uma cintadeira circunferencial de bobinas, aqui designada Cintadeira B, situada na saída da linha de laminação de tiras a quente da empresa pesquisada. Por ser um equipamento recém-incorporado à linha, em operação desde abril de 2025, a Cintadeira B já possui um plano de manutenção preventiva definido, mas ainda não acumulou um histórico de falhas com extensão suficiente para sustentar a modelagem de confiabilidade. Essa condição, em que o plano de manutenção precisa ser estabelecido justamente quando ainda não há dados próprios sobre as falhas do equipamento, é uma das situações em que a aplicação do RCM se mostra mais útil, e também uma das mais desafiadoras. Segundo Moubray (2000), a ausência de histórico não impede a análise, desde que se recorra a outras fontes de informação sobre o comportamento das falhas, entre as quais o desempenho de equipamentos semelhantes operando em contextos semelhantes. No mesmo sentido, Fogliatto e Ribeiro (2009) observam que a modelagem dos tempos até a falha exige amostras compatíveis com a estimação dos parâmetros da distribuição, condição que um ativo com poucos meses de operação não atende.

3.2.2 Fonte dos Dados de Confiabilidade e Equivalência entre os Ativos

Como fonte dos dados de confiabilidade adotou-se, portanto, o histórico de paradas de uma segunda cintadeira circunferencial, aqui designada Cintadeira A, de mesma função, instalada na mesma linha de laminação e submetida ao mesmo contexto operacional, o que inclui o mesmo produto, o mesmo regime de operação e o mesmo ambiente térmico. Em operação desde 2013, a Cintadeira A acumula histórico suficiente tanto para a estratificação das falhas por subsistema quanto para o ajuste de distribuições de probabilidade aos tempos entre falhas. Desse histórico foram considerados apenas os eventos classificados como manutenção não programada de responsabilidade da manutenção mecânica, por serem estes os que caracterizam falhas do ativo, e não interrupções operacionais ou intervenções programadas; o recorte resultante compreende o período de dezembro de 2013 a julho de 2025.

O uso de dados de um ativo para analisar outro exige, no entanto, que a equivalência entre eles seja demonstrada, e não apenas assumida. O fundamento dessa transposição está na própria definição de confiabilidade da NBR 5462, entendida como a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo; segundo a mesma norma, as condições especificadas relacionam-se com o próprio item e com a forma como ele é usado e mantido (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, p. 3). Dois equipamentos de mesmo projeto, que desempenham a mesma função sob as mesmas condições de uso e de manutenção, estão sujeitos, portanto, aos mesmos modos de falha, com as mesmas causas e os mesmos efeitos. É nesse sentido que Fogliatto e Ribeiro (2009, p. 219) consideram passíveis de ocorrer os modos de falha que já ocorreram no passado em componentes similares, princípio que fundamenta a indicação de Moubray (2000), apresentada na Seção 3.2.1, de recorrer ao desempenho de equipamentos semelhantes quando o ativo não dispõe de histórico próprio.

Com base nesse fundamento, a equivalência foi examinada segundo três critérios, correspondentes aos fatores que determinam o comportamento de falha: o projeto do equipamento, as condições de uso e as condições de manutenção. O projeto idêntico das duas cintadeiras foi constatado por observação direta em campo e confirmado por uma verificação documental, que confrontou os subsistemas registrados no histórico de paradas da Cintadeira A com os itens efetivamente inspecionados nas listas de tarefas preventivas da Cintadeira B. As condições de uso e de manutenção foram examinadas a partir da observação dos dois equipamentos na linha e dos registros de parada de ambos. Os resultados dessa verificação são apresentados na Seção 4.1.2. A Cintadeira B, por sua vez, vem sendo acompanhada desde a sua entrada em operação, e esse acompanhamento, embora insuficiente para a modelagem de confiabilidade, fornece um conjunto independente de ocorrências, utilizado na Seção 4.8 para confrontar os modos de falha previstos pela análise com aqueles efetivamente observados no equipamento. As limitações decorrentes do uso de dados de ativo semelhante são discutidas na Seção 5.2.

3.2.3 Procedimento

O estudo foi elaborado a partir de uma revisão bibliográfica na área de manutenção, especificamente com foco em Manutenção Centrada na Confiabilidade, utilizando-se de livros, artigos científicos e anais de congressos para elucidar o assunto e os métodos de manutenção. A sequência completa do trabalho, que parte dessa revisão, é apresentada na FIG. 8.

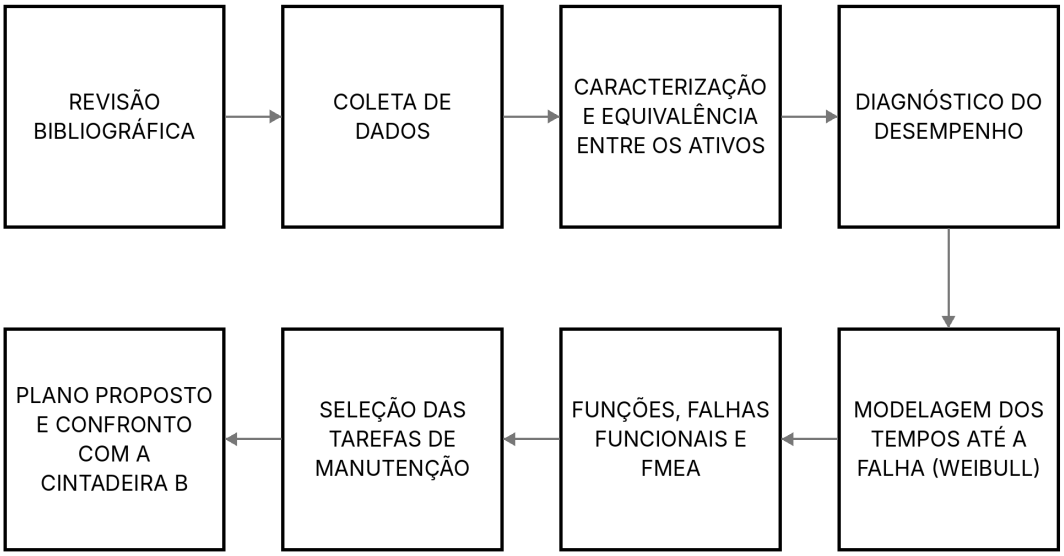


Figura 8 – Etapas de desenvolvimento do trabalho

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De acordo com a FIG. 8, a revisão bibliográfica fundamentou as etapas seguintes, a começar pela coleta de dados, que reuniu os registros de parada da Cintadeira A, as listas de tarefas preventivas da Cintadeira B, a documentação técnica e a observação direta do equipamento. A partir desses dados, caracterizou-se o equipamento e verificou-se a equivalência entre os dois ativos, condição para que o histórico de um sustente a análise do outro. O diagnóstico do desempenho consolidou os registros em eventos de falha e calculou os indicadores de manutenção, e a modelagem dos tempos até a falha pela distribuição de Weibull caracterizou o comportamento da taxa de falhas. Essas informações, somadas à identificação das funções, das falhas funcionais e dos modos de falha por meio do FMEA, orientaram a seleção das tarefas de manutenção, reunidas no plano proposto, que foi comparado ao plano vigente e confrontado com as ocorrências registradas na Cintadeira B.

A principal fonte de dados é o sistema de controle de paradas da empresa, no qual ficam registradas as ocorrências que afetam o equipamento, conforme mostra a FIG. 9.

Data	Início	Fim	Tempo	Responsável	Classif.	Processo	Equipamento	Sistema	Componente	Motivo	Perda	Q.Ritmo	Observação

Figura 9 – Tabela de registro de paradas

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Conforme a FIG. 9, cada registro informa a data, os horários de início e fim e a duração da parada, sua classificação, o processo, o equipamento, o sistema e o componente afetados, o motivo da ocorrência e campos complementares, como a perda e as observações. São esses

campos que permitem associar cada parada a um subsistema e a um modo de falha, além de medir sua duração.

A partir desses registros, obtêm-se os indicadores de manutenção como Tempo Médio Entre Falhas (*MTBF*), Tempo Médio até a Falha (*MTTF*) e Tempo Médio para Reparo (*MTTR*), além da disponibilidade, que caracterizam o desempenho do equipamento. A análise dos registros de parada concentra-se nos modos de falha de maior recorrência e na descrição de suas manifestações, cuja interpretação orienta a seleção das ações de manutenção.

3.3 Variáveis e Indicadores

Para a correta estruturação da análise de dados, é fundamental estabelecer a distinção conceitual entre as variáveis e os indicadores que norteiam o estudo e, segundo Prodanov e Freitas (2013), uma variável pode ser compreendida como um aspecto, propriedade ou fator de um objeto de estudo que é passível de variação e pode ser medido. Embora as variáveis existam em todos os tipos de pesquisa, a forma como são tratadas se diferencia: enquanto nas pesquisas quantitativas elas são expressas numericamente, nas qualitativas o foco está em sua descrição ou explicação detalhada (PRODANOV; FREITAS, 2013). Neste trabalho, mesmo os indicadores expressos numericamente cumprem essa função descritiva, ao caracterizar o desempenho do equipamento e fundamentar as decisões da análise.

Por sua vez, um indicador atua como uma ferramenta de avaliação dessas variáveis, funcionando como um parâmetro que mede a diferença entre um resultado esperado e a situação atual. Conforme descrevem Gerhardt e Silveira (2009), é o indicador que permite quantificar e avaliar o desempenho de um processo, fornecendo a base para a execução de análises críticas sobre o estado do ponto medido. Com base nessas definições, foi possível então delinear o conjunto de variáveis e indicadores específicos utilizados para a coleta e a análise de dados desta pesquisa.

A partir dessas definições, as variáveis e os indicadores pertinentes ao estudo foram organizados conforme o QUADRO 1, que associa a cada variável os indicadores correspondentes e a respectiva forma de medição.

Quadro 1 - Variáveis e indicadores

Variável	Indicador	Forma de medição
Contexto operacional	Contexto operacional do equipamento	Funções, condições de operação e fronteiras do sistema, a partir da documentação técnica e da observação direta
	Documentação técnica	Manuais, desenhos e plano de manutenção vigente
Desempenho do equipamento	Número de falhas	Contagem de ocorrências por modo de falha, no sistema de controle de paradas
	Tempo de parada	Horas de indisponibilidade por ocorrência (h)
	Tempo médio entre falhas (*MTBF*)	Tempo total de operação dividido pelo número de falhas (h), conforme a Equação 2.1
	Tempo médio para reparo (*MTTR*)	Tempo total de reparo dividido pelo número de intervenções (h), conforme a Equação 2.2
	Disponibilidade (A)	*MTBF* dividido pela soma de *MTBF* e *MTTR* (%) conforme a Equação 2.4
	Confiabilidade $R(t)$	Equação 2.7, com β, η e γ ajustados aos tempos entre falhas
Criticidade das falhas	Efeitos das falhas	Descrição das consequências operacionais, de segurança e ambientais
	Análise de criticidade	Índices de severidade, ocorrência e detecção e o RPN resultante, no FMEA
Plano de manutenção	Atividades de manutenção	Tipo de tarefa e periodicidade definidos pelo diagrama de decisão do RCM
	Planos de ação	Tarefas propostas, executante e tempo estimado de execução

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

3.4 Escalas de Avaliação do FMEA

A análise dos modos de falha e efeitos requer a atribuição dos índices de severidade, ocorrência e detecção definidos na Seção 2.11, cujo produto resulta no número de prioridade de risco, conforme a Equação 2.5. Como as escalas convencionais foram concebidas para o contexto da indústria automotiva, e descrevem consequências em termos de insatisfação do cliente final que não correspondem à realidade de um equipamento auxiliar de linha de laminação, optou-se por construir escalas ancoradas no contexto operacional do ativo em estudo.

A escala de severidade, apresentada no QUADRO 2, toma como referência os estados funcionais da cintagem descritos na Seção 4.1, aos quais se acrescentam os patamares correspondentes a consequências de segurança e ambientais, que Moubray (2000) classifica como

prioritárias em relação às consequências operacionais.

Quadro 2 - Escala de severidade adotada

Índice	Classificação	Critério
9–10	Crítica	Falha com potencial de lesão a pessoas ou de dano ambiental
7–8	Muito alta	Falha que leva ao estado crítico, com cintagem manual e capacidade inferior a 20 %
5–6	Alta	Falha que leva ao estado degradado, com capacidade reduzida a 60 %
3–4	Moderada	Falha que exige intervenção corretiva sem redução imediata de capacidade, por ser absorvida por folga de processo
1–2	Baixa	Falha sem efeito perceptível sobre a capacidade ou a qualidade da cintagem

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A escala de ocorrência, apresentada no QUADRO 3, foi calibrada a partir da frequência anual efetivamente observada no histórico de paradas, e não por faixas arbitrárias. Adotam-se, para essa finalidade, os registros brutos, e não os eventos consolidados definidos na Seção 3.6.1, uma vez que o índice de ocorrência mede a frequência com que o efeito da falha é sentido pela produção, e cada interrupção da linha constitui uma manifestação desse efeito.

Quadro 3 - Escala de ocorrência adotada

Índice	Classificação	Frequência anual
9–10	Muito alta	Acima de 50 ocorrências por ano
7–8	Alta	De 10 a 50 ocorrências por ano
5–6	Moderada	De 3 a 10 ocorrências por ano
3–4	Baixa	De 1 a 3 ocorrências por ano
1–2	Remota	Menos de uma ocorrência por ano

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A escala de detecção, no QUADRO 4, considera o momento em que a condição de falha pode ser identificada, tomando por base o intervalo P-F discutido na Seção 2.10. Índices elevados correspondem a falhas cuja manifestação coincide com a perda da função, não havendo, portanto, intervalo útil para intervenção.

Modos de falha com RPN igual ou superior a 100, ou com índice de severidade igual ou superior a 9 independentemente do RPN, são tratados como prioritários na seleção das tarefas de manutenção, conforme desenvolvido no Capítulo 4.

Quadro 4 - Escala de detecção adotada

Índice	Classificação	Critério
9–10	Muito baixa	Falha detectada apenas quando ocorre; não há indício prévio identificável
7–8	Baixa	Detectável somente por inspeção com o equipamento parado
5–6	Moderada	Detectável por inspeção sensitiva durante a operação
3–4	Alta	Detectável por monitoramento de parâmetro de processo ou por sinalização do operador
1–2	Muito alta	Detectada automaticamente pelo sistema de controle, com alarme antes da perda de função

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

3.5 Instrumento de Coleta de Dados

A coleta de dados para este estudo foi realizada por meio de um conjunto diversificado de instrumentos e fontes, combinando a análise de documentos com métodos interativos para garantir a profundidade e a precisão da investigação. A base da pesquisa foi formada pela análise documental, que abrangeu desde os manuais técnicos dos fabricantes dos equipamentos, em formatos digitais e impressos, até a documentação técnica interna da empresa, como os procedimentos de manutenção vigentes e outros registros referentes à operação.

A esta análise de documentos somou-se a extração de dados operacionais diretamente do sistema de controle de paradas da empresa, focada em parâmetros como histórico de falhas e seus devidos registros, e a já mencionada pesquisa bibliográfica, que forneceu o embasamento teórico para o trabalho. Para capturar o conhecimento prático e o contexto não documentado, que são essenciais para uma análise RCM, foram empregadas técnicas de observação direta do equipamento em funcionamento.

Quanto ao plano de manutenção vigente, foram obtidas do sistema corporativo da empresa pesquisada as listas de tarefas preventivas associadas à Cintadeira B, que abrangem as inspeções mecânicas de periodicidade semanal, quinzenal, mensal, trimestral e semestral, além do plano mensal de lubrificação. Esse conjunto constitui a referência contra a qual a proposta elaborada neste trabalho é comparada.

3.6 Tabulação dos Dados

Os registros de parada foram exportados do sistema de controle da empresa e tabulados em planilhas do Microsoft Excel, ambiente no qual se procedeu à filtragem dos eventos de interesse e à sua organização cronológica. Sobre esse conjunto foram aplicados os dois procedimentos descritos a seguir, dos quais resultam os dados efetivamente submetidos à análise.

3.6.1 Consolidação dos Eventos de Falha

O sistema de controle registra cada interrupção da produção como uma ocorrência independente. Contudo, uma mesma falha frequentemente origina diversas paradas sucessivas em um curto intervalo, como tentativas seguidas de reajuste do equipamento, o que faz com que a contagem bruta de registros superestime o número de falhas e subestime os tempos entre falhas. Utilizar os registros brutos conduziria a um parâmetro de forma β artificialmente reduzido, indicando mortalidade infantil em um ativo com mais de uma década de operação, o que não corresponde ao estado real da Cintadeira A.

Adotou-se, por isso, um critério de consolidação: paradas cujo início ocorre dentro de uma janela de tempo *w* após o término da parada anterior são tratadas como um único evento de falha. A TAB. 1 apresenta a sensibilidade dos indicadores a esse critério.

Tabela 1 - Sensibilidade dos indicadores à janela de consolidação de eventos

Janela *w* (h)	Eventos de falha	*MTBF* (h)	*MTTR* (h)	Disponibilidade (%)
0	1312	77,6	0,216	99,72
4	721	140,6	0,392	99,72
8	621	162,3	0,456	99,72
24	490	201,8	0,577	99,72
72	315	288,6	0,898	99,69

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Adotou-se a janela de oito horas, valor correspondente à duração do turno de trabalho. A escolha apoia-se em critério operacional, e não no resultado do ajuste: paradas sucessivas ocorridas dentro de um mesmo turno são atendidas pela mesma equipe e tratadas como um único chamado de manutenção, ainda que o sistema de controle as registre separadamente por corresponderem a interrupções distintas da produção. A aplicação desse critério aos registros da Cintadeira A é apresentada na Seção 4.2.1.

Observe-se que a consolidação afeta a distribuição dos eventos entre os indicadores, mas não o tempo total de indisponibilidade, que permanece inalterado, tampouco a disponibilidade resultante, que varia menos de 0,05 % entre os extremos examinados. O critério, portanto, não altera o diagnóstico agregado do equipamento; ele define a unidade de contagem apropriada à modelagem estatística.

Por essa mesma razão, a consolidação aplica-se à modelagem estatística e aos indicadores de confiabilidade calculados sobre os mesmos eventos, como o *MTBF*, o *MTTR* e a disponibilidade. O índice de ocorrência empregado na análise dos modos de falha utiliza os registros brutos, uma vez que mede a frequência com que a interrupção é sentida pela produção, e cada parada constitui uma manifestação desse efeito.

3.6.2 Ajuste da Distribuição de Weibull

Sobre os tempos entre falhas resultantes da consolidação foi ajustada a distribuição de Weibull de três parâmetros (Equação 2.6), com estimação dos parâmetros β, η e γ pelo método da máxima verossimilhança. O parâmetro de posição foi limitado a 99 % do menor tempo observado, pois, quando o parâmetro de forma é inferior à unidade, a função de verossimilhança cresce indefinidamente à medida que γ se aproxima desse tempo, e a estimativa não converge. O ajuste foi conduzido para o conjunto completo de falhas e, separadamente, para cada subsistema com pelo menos trinta eventos de falha, de modo a permitir a definição de periodicidades de intervenção específicas por subsistema; o limite de trinta eventos foi adotado como critério para assegurar a estabilidade da estimativa de três parâmetros. Os cálculos foram realizados no ambiente estatístico R, versão 4.3.3 (R CORE TEAM, 2024), com o pacote `fitdistrplus` (DELIGNETTE-MULLER; DUTANG, 2015), por meio da rotina reproduzida no Apêndice A.

3.6.3 Estimativa do Impacto da Proposta

Como o plano proposto não seria implantado dentro do horizonte deste trabalho, seu efeito não poderia ser medido diretamente. Adotou-se, portanto, um procedimento de simulação sobre o próprio histórico, com o objetivo de dimensionar a ordem de grandeza do ganho esperado. O procedimento consiste em remover do conjunto de eventos consolidados uma parcela daqueles atribuídos ao modo de falha prioritário e recalcular, sobre o conjunto remanescente, os indicadores definidos na Seção 2.9. Foram considerados três níveis de redução, de 30 %, 50 % e 70 %, escolhidos por delimitarem uma faixa plausível de eficácia para tarefas de verificação funcional, sem que se pretenda atribuir probabilidade a qualquer um deles; o tempo de reparo associado aos eventos removidos é igualmente descontado do tempo total de indisponibilidade.

Trata-se de análise de sensibilidade, não sendo caracterizada como previsão, uma vez que o resultado indica quanto os indicadores respondem a variações na frequência do modo prioritário, e não o desempenho que o equipamento efetivamente apresentará. A verificação do ganho real depende da implantação do plano e do acompanhamento posterior dos registros de parada, conforme recomendado no Capítulo 5.

3.7 Considerações Finais

Uma vez apresentada a metodologia que guiou esta pesquisa e os instrumentos utilizados para a coleta e análise dos dados, o foco do trabalho se volta, no capítulo seguinte, para a apresentação e discussão dos resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do Equipamento e do Contexto Operacional

A cintadeira circunferencial de bobinas objeto deste estudo, designada Cintadeira B, está instalada na saída da linha de laminação de tiras a quente da empresa pesquisada e entrou em operação em abril de 2025. Sua função é aplicar cintas metálicas ao redor da bobina recém formada na bobinadeira, de modo a impedir o desenrolamento e preservar a integridade do produto durante o manuseio, o armazenamento e o transporte. O equipamento opera em regime contínuo, acompanhando a cadência da linha, e está sujeito ao calor irradiado pelas bobinas, que deixam a bobinadeira ainda em temperatura elevada, bem como à presença de carepa e de particulado em suspensão.

Embora seja classificado como equipamento auxiliar, sua posição no fluxo produtivo lhe confere criticidade elevada, uma vez que a cintagem antecede a retirada da bobina da linha e condiciona o escoamento do produto acabado. A função de cintagem, contudo, não depende de um único equipamento. Desde a entrada em operação da Cintadeira B, as duas cintadeiras operam em redundância, de modo que a falha de uma delas é compensada pela outra, situação em que a linha passa a operar a 60 % de sua capacidade nominal. Na indisponibilidade simultânea das duas, resta o recurso da cintagem manual, cuja produtividade é mais de 80 % inferior à do processo automático. Configuram-se, assim, três estados funcionais distintos, apresentados no QUADRO 5.

Quadro 5 - Estados funcionais da cintagem e capacidade produtiva associada

Estado	Capacidade	Descrição
Normal	100 %	Ambas as cintadeiras em operação
Degradado	60 %	Uma cintadeira indisponível; a outra assume integralmente a função de cintagem
Crítico	Inferior a 20 %	Ambas as cintadeiras indisponíveis; a cintagem passa a ser executada manualmente

Fonte: Empresa pesquisada (2025)

Não é a paralisação da linha, portanto, a consequência da falha, e sim a perda de capacidade produtiva, o que a enquadra entre as consequências operacionais da classificação apresentada na Seção 2.12. Essa distinção é relevante para a seleção das tarefas de manutenção conduzida na Seção 4.6, uma vez que a justificativa econômica de uma tarefa proativa depende do custo da consequência que ela evita.

Essa configuração, contudo, é recente, pois ao longo do período abrangido pelo histórico de falhas analisado neste trabalho, a Cintadeira A operou sem redundância, e suas falhas eram

compensadas apenas pela cintagem manual, com perda de produção substancialmente maior. O comportamento de falha do equipamento não se altera em função disso, e os parâmetros estimados na Seção 4.3 permanecem válidos; a avaliação de consequências, no entanto, deve tomar como referência o contexto operacional vigente, e não o do período de coleta.

4.1.1 Decomposição Funcional

A aplicação do RCM exige que as fronteiras do sistema sejam estabelecidas e que o equipamento seja decomposto em subsistemas, de modo que as funções, as falhas funcionais e os modos de falha possam ser analisados em nível adequado de detalhe. Essa decomposição foi obtida a partir do histórico de paradas da Cintadeira A, equipamento de referência descrito na Seção 3.2.2, cujo sistema de controle classifica cada ocorrência segundo o subsistema afetado. A TAB. 2 apresenta os quinze subsistemas identificados, acompanhados do número de registros de parada e do tempo de indisponibilidade acumulado ao longo do período analisado.

Tabela 2 - Decomposição funcional e distribuição dos registros de parada por subsistema

Subsistema	**Registros**	**%**	**Horas**
Cabeçote de cintagem	260	25,7	62,8
Arco guia da cinta	143	14,2	25,9
Acionamento da cintadeira	143	14,2	20,3
Lança de emenda do arco de cintagem	142	14,1	33,1
Acumulador de cinta	85	8,4	11,7
Unidade de corte e formação da cinta	55	5,4	18,0
Unidade de alimentação de cinta	53	5,2	18,6
Proteção térmica do cabeçote	44	4,4	11,7
Dispositivo de parada de cinta	23	2,3	4,1
Carro inferior de ajuste de posição	23	2,3	10,9
Dispensador de bobina	13	1,3	2,4
Carro de transporte do cabeçote	11	1,1	1,4
Estrutura da cintadeira	8	0,8	2,4
Bloco de válvulas do cabeçote	5	0,5	2,3
Bloco de válvulas da máquina	2	0,2	2,9
Total	**1010**	**100,0**	**228,5**

Fonte: Empresa pesquisada (2025)

Dos 1.342 registros de manutenção não programada que compõem o histórico do período, 332 não trazem o campo de subsistema preenchido, o que equivale a 24,7 % do total. A TAB. 2 contempla, por isso, os 1.010 registros efetivamente classificados. A lacuna não compromete a identificação dos subsistemas, já que os quinze itens listados esgotam a estrutura do equipamento, mas recomenda cautela na leitura das participações relativas: elas podem estar subestimadas

naqueles subsistemas cujo registro é menos consistente.

Chama atenção, na distribuição, a forte concentração das falhas. Os quatro primeiros subsistemas respondem por 68,2 % das ocorrências, e o cabeçote de cintagem, isoladamente, por mais de um quarto delas. É essa proporção que orienta a priorização da análise dos modos de falha conduzida na Seção 4.5.

4.1.2 Verificação da Equivalência entre os Ativos

Conforme estabelecido na Seção 3.2.2, a modelagem de confiabilidade apoia-se no histórico da Cintadeira A, o que exige a demonstração da equivalência entre os dois equipamentos quanto aos fatores que determinam o comportamento de falha: o projeto, as condições de uso e as condições de manutenção. O QUADRO 6 sintetiza a verificação de cada um desses critérios e registra as diferenças identificadas entre os ativos.

Quadro 6 - Critérios de equivalência entre as Cintadeiras A e B

Critério	Situação verificada	Base da verificação
Projeto	Projeto idêntico, com a mesma concepção construtiva e os mesmos quinze subsistemas, designados pelos mesmos termos técnicos	Observação direta em campo e confronto entre o histórico da Cintadeira A e as listas de tarefas da Cintadeira B
Função	Cintagem circunferencial das bobinas na saída da linha de laminação de tiras a quente	Observação direta e registros de parada, vinculados ao mesmo processo de manuseio de bobinas
Condições de uso	Mesmo produto, mesmo regime contínuo, acompanhando a cadência da linha, e mesmo ambiente, com calor irradiado pelas bobinas, carepa e particulado em suspensão	Observação direta em campo
Condições de manutenção	Mesma área responsável, a manutenção mecânica da linha, com registro das intervenções no mesmo sistema de controle de paradas e segundo a mesma classificação de motivos	Registros de parada dos dois ativos
Diferenças	Data de entrada em operação, padrão de codificação no sistema corporativo e configuração operacional, pois a Cintadeira A operou sem redundância durante o período do histórico	Registros corporativos e contexto operacional descrito na Seção 4.1

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

As duas cintadeiras distinguem-se, portanto, apenas pela data de entrada em operação, pelo padrão de codificação adotado no sistema corporativo e pela configuração operacional. A mudança do modelo de gestão da manutenção ocorrida entre as duas instalações alterou a forma de cadastramento dos ativos e de seus componentes, e é a essa mudança de padrão, e não a diferenças construtivas, que se deve a divergência de nomenclatura observada entre os registros dos dois equipamentos. A configuração operacional, por sua vez, altera a consequência da falha e pode alterar o número de ciclos executados por cada máquina em um dado intervalo, mas não os mecanismos pelos quais o equipamento falha.

A identidade de projeto foi confirmada por uma verificação documental, que confrontou os subsistemas identificados na TAB. 2 com as operações constantes das listas de tarefas preventivas da Cintadeira B, as quais reúnem 195 operações distribuídas entre inspeções mecânicas de periodicidade semanal, quinzenal, mensal, trimestral e semestral. O resultado é apresentado no QUADRO 7: os quinze subsistemas que registram falha na Cintadeira A possuem tarefa de inspeção correspondente no plano da Cintadeira B, e a correspondência estende-se à nomenclatura empregada nos dois documentos, que designa os mesmos conjuntos pelos mesmos termos técnicos, como cabeçote de cintagem, acumulador de cinta, arco guia, lança e proteção térmica.

Quadro 7 - Correspondência entre os subsistemas da Cintadeira A e as tarefas do plano da Cintadeira B

Subsistema	**Corresp.**	**Exemplo de tarefa no plano**
Cabeçote de cintagem	Sim	Inspeção do cabeçote de cintagem
Arco guia da cinta	Sim	Inspeção da aba de guia da lança
Acionamento	Sim	Inspeção da cremalheira e do acionamento
Lança de emenda	Sim	Inspeção da estrutura da lança móvel
Acumulador de cinta	Sim	Inspeção da estrutura do acumulador
Unidade de corte	Sim	Inspeção do conjunto de cravamento e corte
Unidade de alimentação	Sim	Inspeção da roda de tração
Proteção térmica	Sim	Inspeção da cremalheira da proteção térmica
Dispositivo de parada	Sim	Inspeção do cilindro de trava de cinta
Carro inferior de ajuste	Sim	Inspeção do bloco deslizante do trilho
Dispensador de bobina	Sim	Inspeção da estrutura do dispensador
Carro de transporte	Sim	Inspeção da estrutura do carro de translação
Estrutura	Sim	Inspeção da estrutura da lança móvel
Bloco de válvulas (cabeçote)	Sim	Inspeção das válvulas direcionais
Bloco de válvulas (máquina)	Sim	Inspeção do conjunto manifold

Fonte: Empresa pesquisada (2025)

É dessa equivalência que decorre a pertinência de transpor a análise de um equipamento

para o outro. Ao compartilharem o projeto e as condições de uso e de manutenção, os dois ativos compartilham também os modos de falha, suas causas e seus efeitos, que dependem desses fatores, e não de particularidades de cada máquina: o desajuste do cabeçote, caracterizado na Seção 4.2.5, ocorre nos mesmos mecanismos de retenção, condução e tensionamento da cinta presentes nas duas máquinas. Por esse motivo, a análise dos modos de falha e a seleção das tarefas, núcleo deste trabalho, aplicam-se diretamente ao ativo em estudo. Os valores numéricos, como o tempo médio entre falhas e os parâmetros da distribuição de Weibull, constituem estimativa inicial, sujeita às diferenças apontadas e às substituições de componentes ocorridas ao longo da vida da unidade mais antiga, razão pela qual as periodicidades propostas devem ser reavaliadas à medida que o equipamento em estudo acumule histórico próprio. A equivalência encontra, ainda, confirmação nas ocorrências já registradas na Cintadeira B, que reproduzem os modos de falha e as manifestações do desajuste observados na Cintadeira A, conforme examinado na Seção 4.8.1.

4.2 Diagnóstico do Desempenho Atual do Equipamento

4.2.1 Consolidação dos Registros em Eventos de Falha

Conforme o critério estabelecido na Seção 3.6.1, adotou-se a janela de oito horas para a consolidação dos registros de parada em eventos de falha. A escolha desse valor apoia-se na organização do trabalho de manutenção: como o turno tem duração de oito horas, paradas sucessivas ocorridas nesse intervalo são atendidas pela mesma equipe e tratadas como uma única ocorrência, ainda que o sistema de controle as registre separadamente por corresponderem a interrupções distintas da produção.

Aplicado esse critério, os 1.342 registros de manutenção não programada reduzem-se a 621 eventos de falha. Cada falha do equipamento gerou, em média, 2,2 interrupções da linha. A relação confirma o comportamento antecipado na Seção 3.6.1 e justifica a consolidação: sem ela, os indicadores calculados a seguir descreveriam a frequência de interrupção da produção, e não a frequência de falha do ativo.

4.2.2 Indicadores de Desempenho

Sobre os eventos assim consolidados foram calculados os indicadores definidos na Seção 2.9, cujos valores, referentes ao período completo de análise, constam da TAB. 3 e servem de referência para a comparação conduzida ao longo deste capítulo.

Lidos em conjunto, esses indicadores revelam uma característica que a disponibilidade, avaliada isoladamente, pode mascarar. Os 99,72 % sugerem, à primeira vista, desempenho satisfatório, e o tempo médio para reparo é de fato baixo, pouco menos de meia hora. Mas o problema não está na duração das intervenções, e sim na frequência com que elas se repetem: um *MTBF* de 162,3 h equivale a uma falha a cada sete dias de operação contínua, ou seja, aproximadamente uma falha por semana ao longo de mais de uma década.

Essa distinção é decisiva para a análise, pois, conforme caracterizado na Seção 4.1, cada

Tabela 3 - Indicadores de desempenho da Cintadeira A no período analisado

Indicador	**Valor**
Período analisado	11,6 anos
Registros de manutenção não programada	1.342
Eventos de falha consolidados	621
Frequência média de falhas	53,5 por ano
Tempo total de indisponibilidade	282,9 h
Tempo médio entre falhas (*MTBF*)	162,3 h
Tempo médio para reparo (*MTTR*)	27,3 min
Disponibilidade (*A*)	99,72 %

Fonte: Empresa pesquisada (2025)

falha da cintadeira transfere a função para o equipamento redundante ou para a cintagem manual, e em ambos os casos há perda de capacidade produtiva enquanto durar a intervenção. O custo de uma falha não se mede, assim, apenas pelo tempo de reparo, e a disponibilidade isolada subestima a consequência operacional: é a frequência, e não a duração, que deve orientar a definição das tarefas de manutenção.

4.2.3 Evolução Temporal das Falhas

Distribuídos ao longo dos anos, conforme mostra a FIG. 10, os eventos não indicam estabilização do desempenho. Os menores números concentram-se em 2016 e 2018, e os maiores em 2022, 2024 e 2025, com 74 a 75 eventos, contra média geral de 53,5 por ano. O valor de 2025 é ainda mais expressivo por corresponder a apenas sete meses de registro. O tempo de indisponibilidade acompanha a mesma tendência e alcançou 44,8 h em 2024, o maior valor da série.

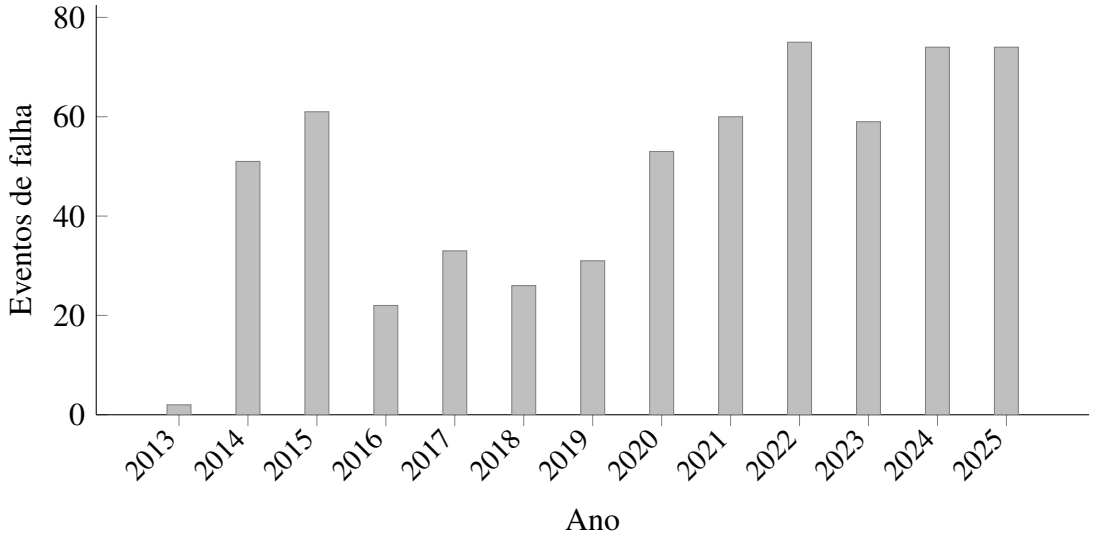


Figura 10 – Evolução anual dos eventos de falha

Fonte: Empresa pesquisada (2025)

A ausência de tendência de melhoria ao longo de mais de uma década, visível na FIG. 10, indica que as intervenções realizadas até aqui têm caráter predominantemente corretivo e não atuam sobre as causas das falhas recorrentes, o que reforça a pertinência de uma revisão do plano de manutenção fundamentada nos modos de falha efetivamente observados.

4.2.4 Priorização dos Modos de Falha

Trinta modos de falha distintos comparecem entre os 621 eventos, e sua distribuição é fortemente concentrada, conforme mostra a FIG. 11. O desajuste, ou falha de ajuste, responde isoladamente por 63,8 % das ocorrências; somados, os quatro modos mais frequentes acumulam 82,8 % do total. É um comportamento compatível com o princípio de Pareto, segundo o qual poucas causas respondem pela maior parte dos efeitos (JURAN; GODFREY, 1999), e que permite concentrar a análise subsequente em um conjunto reduzido de causas.

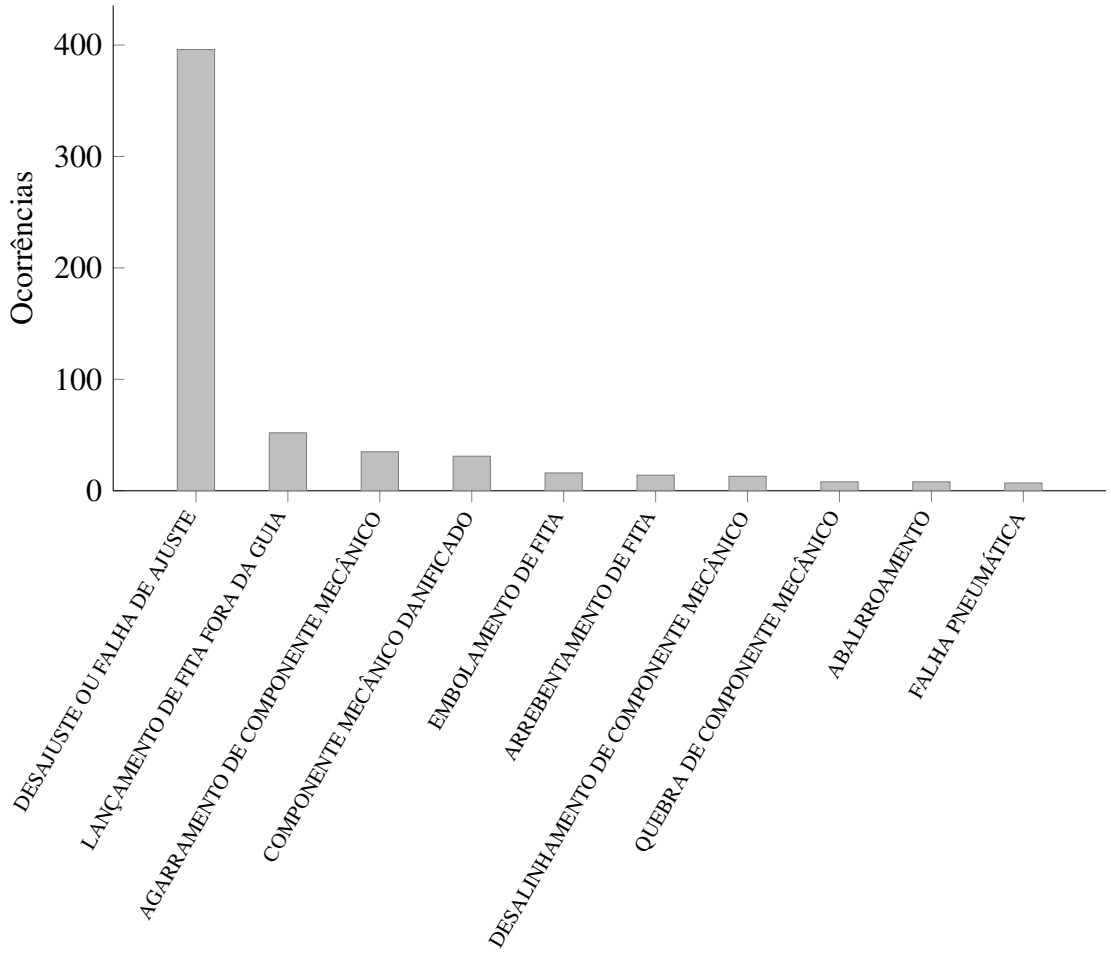


Figura 11 – Diagrama de Pareto dos modos de falha

Fonte: Empresa pesquisada (2025)

A predominância do desajuste, que corresponde à primeira barra da FIG. 11, é, em si, um resultado relevante, tratando-se de um modo de falha que não decorre da ruptura de componentes, mas da perda progressiva de regulagem do equipamento, o que sugere que parcela expressiva das paradas poderia ser evitada por tarefas de verificação e correção de ajuste executadas em periodicidade adequada. Os demais modos de maior frequência, como o lançamento de fita fora da guia, agarramento e dano de componente mecânico, concentram-se nos conjuntos responsáveis pela condução e pelo tensionamento da cinta.

4.2.5 Caracterização do Desajuste

O desajuste corresponde ao motivo de parada registrado no sistema de controle da empresa pesquisada como desajuste ou falha de ajuste, empregado quando a interrupção decorre da perda de regulagem de um conjunto do equipamento, e não da ruptura ou do desgaste de um componente. Trata-se, em termos técnicos, do afastamento de uma grandeza de ajuste em relação ao valor requerido para a execução do ciclo de cintagem, seja ela uma posição, um alinhamento, um curso, uma pressão, uma tensão ou um tempo de atuação. Na terminologia da NBR 5462,

esse afastamento constitui um defeito, isto é, um desvio de uma característica do item em relação aos seus requisitos, que pode ou não afetar a capacidade de desempenhar a função requerida, ao passo que a falha corresponde ao término dessa capacidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, p. 3). Enquanto o desvio permanece dentro da tolerância do mecanismo, o ciclo se completa; quando a ultrapassa, a cintagem não se conclui e o defeito converte-se em falha.

Quanto à localização, o desajuste não se restringe a um conjunto específico. A matriz FMEA, apresentada na Seção 4.5, registra esse modo de falha em oito subsistemas, com maior frequência no cabeçote de cintagem, seguido do acionamento, da lança de emenda, do arco guia, do acumulador e da unidade de alimentação. Em cada um deles, a perda de regulagem incide sobre pontos de ajuste específicos e se manifesta de forma característica, conforme as descrições registradas nas próprias ocorrências, sintetizadas no QUADRO 8.

Quadro 8 - Pontos de ajuste e manifestações do desajuste por subsistema

Subsistema	Pontos de ajuste	Manifestação do desajuste
Cabeçote de cintagem	Grampo prendedor e mandíbulas; rodas recartilhadas; pressão e curso do cilindro de tensionamento; posição de cravamento; sensores de detecção da cinta	Cinta se solta do cabeçote, não chega a ele ou não para na posição; cinta não tensionada, não cravada ou não cortada
Acionamento	Posicionamento dos conjuntos móveis; folgas em cremalheira, engrenagens e acoplamentos	Cinta lançada fora da posição na bobina; movimentação irregular
Lança de emenda	Alinhamento da lança com o arco; abas de guia e molas; curso de avanço	Arco não se fecha; cinta escapa na emenda; lança permanece avançada
Arco guia da cinta	Abertura das abas e dos grampos de guia; molas dos grampos	Cinta sai da calha no lançamento ou no recolhimento
Acumulador de cinta	Curso do acumulador; tensão nas roldanas	Reserva de cinta insuficiente (acumulador vazio)
Unidade de alimentação	Pressão das rodas de tração; guia central da cinta	Cinta patina ou não avança
Unidade de corte	Conjunto de travamento, cravamento e corte	Cinta não travada, não cravada ou não cortada
Proteção térmica	Curso das portas; posição dos sensores das portas	Porta não completa o curso ou não sinaliza sua posição

Fonte: Empresa pesquisada (2025)

No cabeçote de cintagem, subsistema que concentra o maior número de ocorrências de desajuste, as descrições registradas permitem localizar a perda de regulagem com maior precisão.

A manifestação mais recorrente, presente em cerca de dois quintos das ocorrências descritas, é a soltura da cinta, que escapa do cabeçote por não ser retida pelo grampo prendedor e pelas mandíbulas durante o tensionamento. Seguem-se as falhas de alimentação e de lançamento, em que a cinta não chega ao cabeçote, fica presa na guia ou não para na posição prevista, presentes em pouco mais de um quinto das descrições, e, em menor proporção, as perdas de regulagem do tensionamento, do cravamento e do corte e o deslocamento dos sensores e atuadores que detectam a cinta e confirmam as etapas do ciclo. Os componentes mais citados nesses registros, o grampo prendedor da cinta, o motor e as rodas recartilhadas de alimentação e o cilindro de tensionamento, confirmam que o desajuste do cabeçote se concentra nos mecanismos que retêm, conduzem e tensionam a cinta.

As descrições revelam, ainda, que a correção do desajuste consiste em reajuste executado em campo, com valores definidos no momento da intervenção. Há registros de reposicionamento de atuadores e sensores, de alteração da pressão de trabalho de cilindros, de inserção de calços e de alteração do tempo de monitoramento de movimentos, sem que os registros façam referência a valores padronizados. Esse aspecto é retomado na Seção 4.7.1, ao se examinar a ausência de procedimento operacional padrão (POP) para o ajuste do equipamento.

4.2.6 Criticidade por Subsistema

A TAB. 4 apresenta a distribuição dos eventos consolidados por subsistema, acompanhada do tempo de indisponibilidade correspondente. Dos 621 eventos, 514 possuem o subsistema identificado no registro, proporção coerente com a lacuna de preenchimento apontada na Seção 4.1.1.

Por ambos os critérios, o cabeçote de cintagem destaca-se como o subsistema de maior criticidade: responde por 24,7 % dos eventos e por 26,8 % do tempo de indisponibilidade, seguido do acionamento, o arco guia e a lança de emenda, com participações semelhantes entre si. Somados ao cabeçote, esses três subsistemas concentram 68,9 % dos eventos.

Chama atenção, ainda, o comportamento de subsistemas que apresentam poucos eventos, mas tempo de reparo elevado, como a unidade de corte e formação da cinta e o carro inferior de ajuste de posição. Embora falhem com pouca frequência, suas intervenções são mais demoradas, o que sugere menor acessibilidade ou maior complexidade de reparo e deve ser considerado na análise de mantenabilidade conduzida na Seção 4.6.

Tabela 4 - Distribuição dos eventos de falha por subsistema

Subsistema	**Eventos**	**Horas**
Cabeçote de cintagem	127	67,0
Acionamento da cintadeira	78	32,1
Arco guia da cinta	75	29,9
Lança de emenda do arco de cintagem	74	28,9
Acumulador de cinta	50	18,6
Unidade de alimentação de cinta	32	18,2
Unidade de corte e formação da cinta	23	17,9
Proteção térmica do cabeçote	18	10,4
Dispensador de bobina	11	2,4
Dispositivo de parada de cinta	8	4,0
Carro inferior de ajuste de posição	7	8,0
Estrutura da cintadeira	6	3,7
Bloco de válvulas do cabeçote	2	2,3
Carro de transporte do cabeçote	2	2,6
Bloco de válvulas da máquina	1	4,0
Total	**514**	**250,0**

Fonte: Empresa pesquisada (2025)

4.3 Modelagem dos Tempos até a Falha

4.3.1 Seleção da Distribuição de Probabilidade

Adotar a distribuição de Weibull por convenção seria conveniente, mas fragilizaria a análise e, antes do ajuste, foi verificado se ela é efetivamente adequada aos dados: cinco distribuições candidatas foram ajustadas aos 620 tempos entre falhas pelo método da máxima verossimilhança e comparadas pela estatística de Anderson-Darling, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e pelos critérios de informação de Akaike e bayesiano, conforme descrito na Seção 2.13.1.3. A TAB. 5 apresenta o resultado, ordenado pela estatística de Anderson-Darling.

Tabela 5 - Comparação da aderência entre distribuições candidatas

Distribuição	**AD**	**KS**	**AIC**	**BIC**
Lognormal (2 parâmetros)	1,5072	0,0415	7362,8	7371,6
Weibull (3 parâmetros)	1,8227	0,0430	7320,3	7333,6
Weibull (2 parâmetros)	9,1017	0,0964	7487,4	7496,2
Gama (2 parâmetros)	13,9351	0,1101	7524,4	7533,2
Exponencial	27,2655	0,1520	7553,2	7557,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Três leituras decorrem desse resultado, e a primeira delas é que a formulação de dois parâmetros da distribuição de Weibull não descreve adequadamente os dados, apresentando estatística de Anderson-Darling cinco vezes superior à da formulação de três parâmetros. Confirma-se, assim, a pertinência de estimar o parâmetro de posição, conforme discutido na Seção 2.13.1.1.

A segunda é que a distribuição exponencial, que pressupõe taxa de falhas constante, é a de pior aderência entre as candidatas. Isso indica que as falhas do equipamento não ocorrem de forma puramente aleatória e que existe estrutura temporal a ser modelada.

A terceira, e mais relevante, é que a distribuição lognormal apresenta a menor estatística de Anderson-Darling, enquanto a Weibull de três parâmetros apresenta os menores valores de AIC e BIC. As duas distribuições descrevem, assim, os dados de maneira comparável, e não há superioridade estatística inequívoca de uma sobre a outra. Diante disso, a escolha recaiu sobre a Weibull de três parâmetros por um critério adicional: seu parâmetro de forma possui interpretação física direta em termos do comportamento da taxa de falhas, o que orienta a seleção das tarefas de manutenção conforme exposto na Seção 2.13.1.1. A distribuição lognormal, embora de aderência ligeiramente superior, não oferece parâmetro com essa correspondência, e sua adoção não produziria informação aplicável à definição do plano de manutenção.

4.3.2 Parâmetros Estimados

O ajuste foi conduzido para a amostra completa e, separadamente, para cada subsistema com pelo menos trinta eventos de falha, conforme o critério estabelecido na Seção 3.6.2; dos quinze subsistemas identificados na Seção 4.1.1, seis atendem a esse critério, e a TAB. 6 reúne os resultados obtidos para cada um deles.

Tabela 6 - Parâmetros da distribuição de Weibull de três parâmetros por subsistema

Subsistema	n	β	η **(h)**	γ **(h)**	***MTTF*** **(h)**	**AD**
Amostra completa	620	0,701	118,4	7,97	157,7	1,823
Cabeçote de cintagem	127	0,667	128,3	8,04	178,5	0,314
Acionamento	78	0,709	120,2	8,48	158,8	0,463
Arco guia da cinta	75	0,617	182,8	11,09	276,7	0,269
Lança de emenda	74	0,712	115,9	8,05	152,5	0,626
Acumulador de cinta	50	0,862	84,8	9,16	100,7	0,296
Unidade de alimentação	32	0,699	94,5	9,54	129,4	0,377

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

As estatísticas de Anderson-Darling obtidas por subsistema, entre 0,269 e 0,626, são substancialmente inferiores à da amostra completa, o que indica que o ajuste estratificado descreve os dados melhor do que o ajuste global. Isso é coerente com a natureza do equipamento: cada subsistema apresenta mecanismo de degradação próprio, e reuni-los em uma única amostra mistura populações com comportamentos distintos.

Um detalhe do parâmetro de posição merece cuidado na interpretação porque ele se situa entre 7,97 h e 11,09 h em todos os ajustes, valores próximos ao limite imposto pela janela de consolidação: por construção, dois eventos consecutivos não podem estar separados por menos de oito horas. O que se observa decorre do critério definido na Seção 3.6.1, e não de característica intrínseca do equipamento, assim, o parâmetro não representa, portanto, um período de imunidade a falhas.

4.3.3 Comportamento da Taxa de Falhas

O resultado de maior relevância para este trabalho é o valor do parâmetro de forma, que em todos os subsistemas analisados, β é inferior à unidade, variando entre 0,617 e 0,862. Conforme exposto na Seção 2.13.1.1, isso caracteriza taxa de falhas decrescente, ou seja, a probabilidade instantânea de falha é máxima logo após o retorno do equipamento à operação e diminui à medida que ele permanece em funcionamento.

De um equipamento com mais de uma década de operação esperava-se o oposto: predominância de mecanismos de desgaste e, com eles, taxa de falhas crescente. O comportamento observado é plenamente coerente com o resultado da Seção 4.2.4, em que o desajuste responde por 63,8 % das ocorrências. Combinados, os dois resultados sugerem que parcela expressiva das falhas é induzida pela própria intervenção: o equipamento é reajustado, retorna à operação e perde a regulagem em prazo curto, sem que a causa do desajuste tenha sido eliminada.

Essa interpretação é expressa graficamente nas curvas de confiabilidade da FIG. 12, construídas com os parâmetros estimados para a amostra completa e para os três subsistemas de maior criticidade.

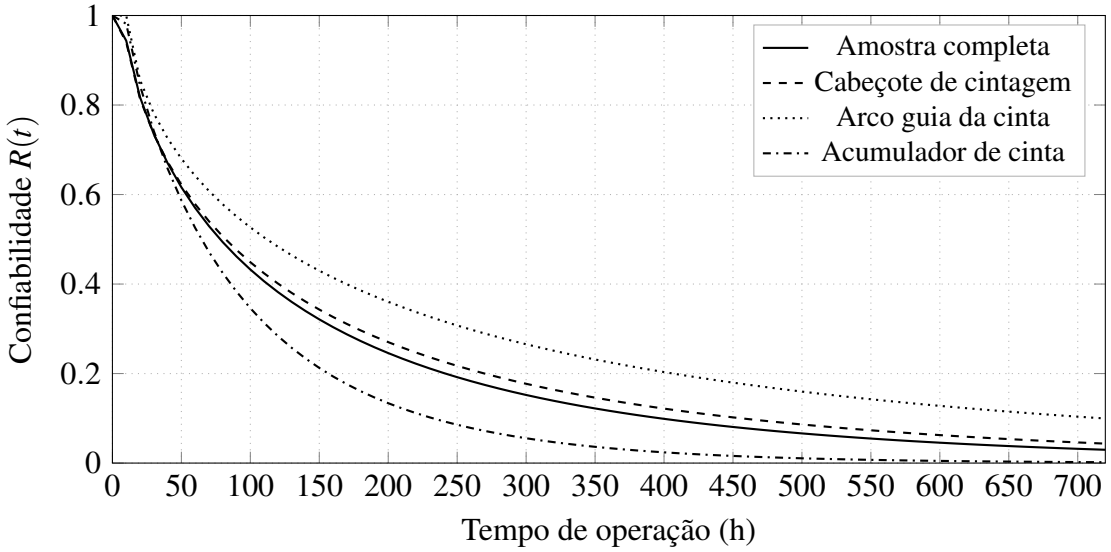


Figura 12 – Curvas de confiabilidade estimadas

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

As curvas da FIG. 12 quantificam o desempenho do equipamento em horizontes de interesse operacional. Considerando a amostra completa, a confiabilidade é de 78,2 % para 24 h de operação, 52,2 % para 72 h e 29,1 % para uma semana de operação contínua. Em outras palavras, a probabilidade de a cintadeira operar uma semana sem falhar é inferior a um terço.

Comparados entre si, os subsistemas evidenciam comportamentos distintos, mostrando que, em horizontes longos, o arco guia da cinta apresenta a maior confiabilidade, 40,2 % para uma semana, e o acumulador de cinta a menor, 18,0 %. Este último possui o maior parâmetro de forma entre os subsistemas analisados, o que indica comportamento mais próximo do aleatório, com menor influência do efeito de intervenção observado nos demais.

4.3.4 Implicações para a Seleção das Tarefas

Os parâmetros estimados condicionam diretamente as tarefas admissíveis no plano de manutenção mostrando que, com taxa de falhas decrescente, a substituição preventiva em intervalo fixo é contraindicada: como a probabilidade de falha é maior logo após a intervenção, substituir componentes por tempo introduziria falhas em vez de evitá-las. Essa conclusão é reforçada por Moubray (2000), para quem tarefas de restauração ou substituição programadas somente são tecnicamente viáveis quando existe idade em que se observa aumento da probabilidade condicional de falha.

Restam, desse modo, três caminhos, desenvolvidos na Seção 4.6: tarefas sob condição, que monitoram o estado do equipamento sem intervir desnecessariamente; revisão do procedimento de ajuste e da qualificação da execução, dado que o desajuste recorrente aponta para deficiência no próprio ato de manutenção; e investigação da causa-raiz do desajuste, com eventual alteração de projeto, alternativa prevista pelo RCM quando nenhuma tarefa proativa se mostra viável.

4.4 Funções e Falhas Funcionais da Cintadeira

A primeira das sete perguntas do processo RCM, enunciadas na Seção 2.10, diz respeito às funções do ativo e aos padrões de desempenho esperados em seu contexto operacional. Definidas as funções, as falhas funcionais correspondem aos estados em que o equipamento deixa de cumpri-las nos padrões estabelecidos.

4.4.1 Funções

A cintadeira desempenha uma função principal e um conjunto de funções secundárias, sem as quais a função principal não se realiza nos padrões requeridos. O QUADRO 9 apresenta essas funções, cada uma associada ao subsistema responsável por sua execução.

Quadro 9 - Funções da cintadeira e subsistemas associados

Nº	Subsistema	Função
F1	Dispensador de bobina	Fornecer cinta metálica ao processo de forma contínua
F2	Unidade de alimentação	Tracionar a cinta e conduzi-la até o cabeçote na velocidade requerida
F3	Acumulador de cinta	Manter reserva de cinta que compense as diferenças de velocidade entre a alimentação e a cintagem
F4	Arco guia da cinta	Conduzir a cinta ao redor da bobina, mantendo-a na trajetória prevista
F5	Lança de emenda	Posicionar e unir as extremidades do arco de cintagem
F6	Cabeçote de cintagem	Tensionar, prender e cravar a cinta em torno da bobina
F7	Unidade de corte	Seccionar a cinta ao término do ciclo de cintagem
F8	Carro de transporte e carro inferior	Posicionar o conjunto de cintagem em relação à bobina
F9	Acionamento	Fornecer movimento aos conjuntos móveis do equipamento
F10	Proteção térmica	Proteger o cabeçote da radiação térmica emitida pela bobina
F11	Blocos de válvulas	Distribuir e controlar o fluxo dos atuadores pneumáticos

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.4.2 Falhas Funcionais

As falhas funcionais do sistema de cintagem correspondem aos estados funcionais caracterizados no QUADRO 5. É importante notar que a perda de qualquer uma das funções listadas no QUADRO 9 conduz à perda da função principal do equipamento, uma vez que os subsistemas atuam em série no ciclo de cintagem: sem alimentação não há cinta a tensionar, sem arco guia não há condução, sem corte não se conclui o ciclo. A redundância, conforme discutido na Seção 4.1, situa-se no nível do equipamento, e não no de seus subsistemas.

Disso decorre que a falha funcional da cintadeira é, em regra, total, e não parcial: o equipamento cinta ou não cinta. Duas exceções, contudo, merecem registro, sendo a primeira delas a falha da proteção térmica, que não interrompe a cintagem de imediato, mas acelera a degradação do cabeçote e, portanto, antecipa falhas subsequentes. A segunda é a falha parcial do tensionamento, em que a cinta é aplicada com tensão inferior à especificada e a bobina segue para a expedição sem que a deficiência seja percebida na linha, o que caracteriza uma falha com efeito sobre a qualidade do produto e não sobre a capacidade produtiva.

Considerados esses aspectos, o QUADRO 10 sintetiza as falhas funcionais adotadas na análise, das quais decorrem os efeitos avaliados na matriz FMEA.

Quadro 10 - Falhas funcionais da cintadeira

Nº	Falha funcional	Descrição
FF1	Incapacidade de cintar	O equipamento não conclui o ciclo de cintagem, e a função é transferida para a cintadeira redundante ou para o processo manual
FF2	Cintagem fora de especificação	O ciclo se conclui, mas a cinta é aplicada com tensão, posição ou acabamento fora do padrão
FF3	Perda de proteção do cabeçote	A função de cintagem é mantida, porém sob condição térmica que acelera a degradação dos componentes
FF4	Redução da cadência	O ciclo se conclui em tempo superior ao previsto, limitando a capacidade de processamento da linha

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Verifica-se que a falha funcional FF1 é a predominante no histórico analisado, o que é coerente com o fato de os registros de parada contabilizarem interrupções da produção. As falhas FF2 e FF3, por não interromperem o ciclo, tendem a ser sub-representadas nesse histórico, limitação que deve ser considerada na atribuição do índice de ocorrência conduzida na Seção 4.5.

4.5 Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA)

Definidas as funções e as falhas funcionais, a análise avança para as perguntas seguintes do processo RCM, que investigam os modos pelos quais cada falha funcional se manifesta, suas causas e seus efeitos. A matriz FMEA foi construída a partir dos modos de falha efetivamente registrados no histórico de paradas, e não de um levantamento hipotético, o que assegura que a análise contemple os mecanismos que de fato ocorrem no equipamento.

Os índices de severidade, ocorrência e detecção seguem as escalas definidas na Seção 3.4, e os critérios adotados na atribuição são os seguintes. A severidade parte do estado funcional resultante: como a falha de uma cintadeira transfere a função para a unidade redundante, conduzindo ao estado degradado, os modos que interrompem o ciclo de cintagem recebem índice 6. Recebem índice 7 os modos que provocam dano material ao equipamento ou que comprometem a qualidade da cintagem, e índice 4 aqueles que não interrompem o ciclo, mas aceleram a degradação de componentes. A ocorrência decorre diretamente da frequência anual observada no histórico, apresentada na própria matriz. A detecção reflete a constatação de que o desajuste, modo predominante, somente se evidencia no momento da parada, sem indício prévio perceptível, o que lhe confere índice 9.

Estabelecidos esses critérios, o QUADRO 11 apresenta a matriz completa, ordenada de forma decrescente pelo número de prioridade de risco, de modo que os modos que demandam tratamento prioritário figurem nas primeiras linhas.

Quadro 11 - Matriz FMEA da cintadeira

Subsistema	FF	Modo de falha	Freq. (/ano)	Causa provável	Efeito	S	O	D	RPN
Cabeçote de cintagem	FF1	Desajuste ou falha de ajuste	12,0	Perda de regulagem do grampo prendedor e das mandíbulas, das rodas recartilhadas, da tensão ou da posição de cravamento; sensores de detecção da cinta fora de posição	Cinta se solta do cabeçote, não chega a ele ou não é tensionada; ciclo de cintagem não se conclui; função transferida à unidade redundante	6	7	9	**378**
Acionamento	FF1	Desajuste ou falha de ajuste	8,9	Folga em cremalheira, engrenagem ou acoplamento; perda de referência de posicionamento	Movimentação irregular dos conjuntos móveis; interrupção do ciclo	6	6	9	**324**
Lança de emenda	FF1	Desajuste ou falha de ajuste	6,8	Desalinhamento entre as extremidades do arco; folga nos blocos deslizantes	Arco não se fecha; ciclo interrompido	6	6	9	**324**
Arco guia da cinta	FF1	Desajuste ou falha de ajuste	5,8	Deslocamento das abas de guia; acúmulo de carepa na trajetória	Cinta perde a trajetória prevista; ciclo interrompido	6	6	9	**324**
Acumulador de cinta	FF1	Desajuste ou falha de ajuste	4,6	Perda de tensão nas roldanas; desregulagem do curso do acumulador	Reserva de cinta insuficiente; interrupção da alimentação	6	5	9	**270**
Unidade de alimentação	FF1	Desajuste ou falha de ajuste	3,3	Desregulagem da pressão das rodas de tração; desgaste do recartilhado	Cinta não é tracionada na velocidade requerida	6	5	9	**270**
Arco guia da cinta	FF1	Lançamento de fita fora da guia	2,7	Abertura excessiva entre abas; deformação da calha	Cinta escapa da trajetória; necessidade de remoção manual	6	4	9	216
Lança de emenda	FF1	Lançamento de fita fora da guia	1,8	Desalinhamento na junção do arco	Cinta escapa no ponto de emenda; ciclo interrompido	6	4	9	216
Unidade de corte	FF1	Desajuste ou falha de ajuste	1,8	Desregulagem do conjunto de cravamento e corte	Cinta não é seccionada; ciclo não se conclui	6	4	9	216
Cabeçote de cintagem	FF1	Lançamento de fita fora da guia	1,5	Posicionamento incorreto da cinta na entrada do cabeçote	Cinta escapa antes do tensionamento	6	4	9	216
Carro de transporte	FF1	Abalroamento	1,2	Erro de posicionamento do conjunto em relação à bobina	Dano material ao equipamento; parada para reparo	7	3	10	210
Cabeçote de cintagem	FF2	Tensionamento insuficiente da cinta	...	Perda de regulagem da tensão sem interrupção do ciclo	Bobina segue para expedição com cinta frouxa; risco de desenrolamento no manuseio	7	3	10	210
Cabeçote de cintagem	FF1	Componente mecânico danificado	2,2	Choque mecânico; fadiga de componentes sujeitos a esforço cíclico	Perda de função do cabeçote; substituição de componente	6	4	8	192
Cabeçote de cintagem	FF1	Agarramento de componente mecânico	1,7	Deficiência de lubrificação; acúmulo de particulado	Travamento do mecanismo; interrupção do ciclo	6	4	8	192
Lança de emenda	FF1	Componente mecânico danificado	1,5	Esforço além do previsto na junção do arco	Perda de função da lança; substituição de componente	6	4	8	192
Acumulador de cinta	FF1	Lançamento de fita fora da guia	1,0	Desalinhamento das roldanas do acumulador	Cinta escapa do acumulador; interrupção da alimentação	6	3	9	162
Proteção térmica	FF3	Desajuste ou falha de ajuste	1,9	Desregulagem do curso da proteção; folga na cremalheira	Exposição do cabeçote à radiação térmica; degradação acelerada	4	4	7	112
Arco guia da cinta	FF1	Arrebentamento de fita	0,9	Tensão excessiva; aresta cortante na trajetória	Interrupção do ciclo; remoção manual da cinta rompida	6	2	9	108
Acionamento	FF1	Agarramento de componente mecânico	0,9	Deficiência de lubrificação em guias e mancais	Travamento da movimentação; interrupção do ciclo	6	2	8	96
Unidade de corte	FF1	Desgaste de componente mecânico	0,7	Desgaste natural das facas de corte	Corte irregular da cinta; necessidade de substituição	6	2	6	72
Proteção térmica	FF3	Empeno de componente mecânico	0,6	Exposição prolongada a temperatura elevada	Perda de eficácia da proteção; degradação do cabeçote	4	2	6	48

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.5.1 Priorização dos Modos de Falha

Adotado o critério estabelecido na Seção 3.4, dezoito dos 21 modos de falha apresentam RPN igual ou superior a 100 e são, portanto, prioritários, enquanto nenhum atinge severidade igual ou superior a 9, o que é coerente com a caracterização do equipamento: as falhas registradas não apresentam potencial de lesão a pessoas nem de dano ambiental, e suas consequências são de natureza operacional.

Os seis modos de maior RPN, entre 270 e 378, correspondem, todos eles, ao mesmo mecanismo de falha manifestando-se em subsistemas distintos, e juntos respondem por parcela expressiva das paradas, mostrando que a prioridade do plano de manutenção não deve recair sobre um componente específico, e sim sobre a estabilidade do ajuste do equipamento como um todo.

Contribui para a elevação do RPN desses modos o índice de detecção 9, consequência de o desajuste somente se evidenciar quando a máquina para. Trata-se de uma característica com implicação prática direta: como não há intervalo P-F útil, no contexto discutido na Seção 2.10, tarefas preditivas baseadas em monitoramento de condição não são aplicáveis a esses modos no estado atual do equipamento. Reduzir o índice de detecção exigiria instrumentação capaz de sinalizar a perda de regulagem antes da interrupção do ciclo, alternativa examinada na Seção 4.6.

Situação distinta apresenta o modo de tensionamento insuficiente da cinta, associado à falha funcional FF2 que, diferentemente dos demais, ele não consta do histórico de paradas, pois não interrompe o ciclo: a bobina segue para a expedição com a cinta aplicada abaixo da tensão especificada. Seu índice de ocorrência foi estimado, o que constitui limitação da análise. Ainda assim, sua inclusão justifica-se pela severidade atribuída, uma vez que o desenrolamento de uma bobina durante o manuseio ou o transporte tem consequências que extrapolam a linha de produção.

4.6 Seleção das Tarefas de Manutenção

Identificados e priorizados os modos de falha, a etapa seguinte do processo RCM consiste em determinar, para cada um, se existe tarefa proativa tecnicamente viável e economicamente justificável, conforme as duas últimas perguntas enunciadas na Seção 2.10. A seleção apoia-se em dois resultados obtidos anteriormente, que restringem de forma decisiva o conjunto de tarefas admissíveis.

O primeiro desses resultados é o comportamento da taxa de falhas: como demonstrado na Seção 4.3.3, o parâmetro de forma é inferior à unidade em todos os subsistemas analisados, o que significa que a probabilidade condicional de falha não aumenta com a idade de operação. Nessa condição, tarefas de restauração ou substituição programadas por tempo não são tecnicamente viáveis: substituir um componente em intervalo fixo reconduziria o item ao início de sua vida, período em que a taxa de falhas é mais elevada, de modo que a intervenção aumentaria a

frequência de falhas em vez de reduzi-la.

O segundo é a ausência de intervalo P-F para o modo predominante que, conforme registrado na Seção 4.5.1, o desajuste somente se evidencia no instante em que o ciclo é interrompido, sem sinal prévio perceptível. Sem intervalo entre a falha potencial e a falha funcional, não há janela para intervenção, e tarefas sob condição baseadas em inspeção sensitiva não conseguem antecipar a ocorrência.

A junção desses dois resultados conduz à situação prevista na Seção 2.12: quando nenhuma das tarefas proativas convencionais é viável e as consequências da falha são operacionais, restam a manutenção corretiva planejada e a alteração de projeto ou de procedimento. Como a frequência das falhas é elevada, com uma ocorrência a cada sete dias de operação, aceitar a manutenção corretiva significaria manter o patamar atual de perdas, o que não atende ao objetivo do trabalho, então, a análise deve ser focada em ações proativas viáveis.

4.6.1 Tarefas Propostas

Foram identificadas três linhas de ação, que não são excludentes entre si e cuja combinação define a proposta apresentada na Seção 4.7. O QUADRO 12 as reúne por modo de falha, e o texto que se segue detalha o critério que sustenta cada uma.

A verificação funcional programada, cujo conceito foi apresentado na Seção 2.12, é a tarefa que responde às duas restrições identificadas. Como consiste em medir o parâmetro de regulagem e compará-lo a uma faixa de referência, corrigindo-o apenas quando necessário, sua viabilidade não depende da existência de intervalo P-F, uma vez que o desvio de regulagem é grandeza mensurável a qualquer momento; e sua eficácia não é comprometida pelo parâmetro de forma inferior à unidade, pois a tarefa não devolve o componente à condição original nem reinicia sua vida útil. É justamente por não se enquadrar nem entre as tarefas sob condição nem entre as de restauração programada que ela permanece ausente do plano vigente, conforme se demonstra na Seção 4.7.1.

A periodicidade dessas verificações pode ser estabelecida a partir dos parâmetros estimados na Seção 4.3.2. Adotando-se como critério a manutenção da confiabilidade acima de 80 % entre intervenções, e considerando os subsistemas de maior criticidade, obtém-se o intervalo apresentado na TAB. 7.

Quadro 12 - Tarefas propostas por modo de falha

Modo de falha	Tipo de tarefa	Descrição
Desajuste do cabeçote, do acionamento, da lança, do arco guia, do acumulador e da alimentação	Verificação funcional programada	Medição e registro dos parâmetros de regulagem com o equipamento parado, seguidos de correção quando fora de faixa
Idem	Alteração de procedimento	Padronização do procedimento de ajuste, com valores de referência documentados e meios de aferição
Idem	Alteração de projeto	Instrumentação capaz de sinalizar a perda de regulagem antes da interrupção do ciclo, criando intervalo P-F
Desajuste da unidade de corte e da proteção térmica	Verificação funcional programada	Medição e registro da regulagem do conjunto de cravamento e corte e do curso da proteção térmica, seguidos de correção quando fora de faixa
Lançamento de fita fora da guia	Verificação funcional programada	Verificação da abertura das abas de guia e do alinhamento da junção do arco e das roldanas, incluída na verificação diária de regulagem
Agarramento de componente mecânico	Tarefa sob condição	Verificação do estado de lubrificação e da presença de particulado nos mecanismos de acionamento
Componente mecânico danificado	Tarefa sob condição	Inspeção dos componentes conforme as listas do plano vigente, mantidas na proposta
Arrebentamento de fita	Tarefa sob condição	Inspeção da trajetória da cinta conforme as listas vigentes, somada à aferição da tensão aplicada
Desgaste de componente mecânico	Tarefa sob condição	Medição do desgaste das facas de corte, com substituição condicionada ao limite estabelecido
Abalroamento	Alteração de procedimento	Verificação do posicionamento do carro antes do ciclo, com registro das ocorrências para análise de causa
Tensionamento insuficiente	Verificação funcional programada	Aferição periódica da tensão aplicada, por amostragem, com registro do valor medido

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Tabela 7 - Periodicidade proposta para a verificação funcional a partir dos parâmetros de Weibull

Subsistema	β	η **(h)**	t **para** $R = 80\,\%$ **(h)**	**Periodicidade**
Cabeçote de cintagem	0,667	128,3	21,6	Diária
Acionamento	0,709	120,2	23,0	Diária
Lança de emenda	0,712	115,9	22,2	Diária
Arco guia da cinta	0,617	182,8	27,2	Diária
Acumulador de cinta	0,862	84,8	24,0	Diária
Unidade de alimentação	0,699	94,5	20,6	Diária

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O resultado é convergente entre os seis subsistemas, situando-se em torno de vinte e quatro horas de operação e isso indica que a verificação funcional deve ocorrer em base diária, e não semanal ou mensal, para que o equipamento se mantenha no patamar de confiabilidade adotado. Cabe ressalva quanto à interpretação desses valores: como o parâmetro de forma é inferior à unidade, o intervalo assim obtido não corresponde a uma idade de substituição, mas ao horizonte em que a probabilidade de operar sem falha se mantém no nível desejado. A periodicidade diária deve, portanto, ser entendida como frequência de verificação, e o esforço associado precisa ser confrontado com a disponibilidade da equipe, o que se discute na Seção 4.8.

Os demais modos prioritários são atendidos de forma complementar. O lançamento de fita fora da guia tem como causas prováveis a abertura das abas de guia, o desalinhamento na junção do arco e nas roldanas do acumulador e o posicionamento da cinta na entrada do cabeçote, grandezas de regulagem dos mesmos conjuntos submetidos à verificação diária, que passa a abrangê-las. O desajuste da unidade de corte e o da proteção térmica, por sua vez, não reúnem eventos suficientes para o ajuste da distribuição de Weibull, e sua frequência observada é inferior a duas ocorrências por ano; para esses dois conjuntos, adota-se a verificação funcional semanal, coincidente com a lista de inspeção semanal já existente e conservadora diante dessa frequência. Já o dano de componente mecânico e o arrebentamento de fita, ligados à integridade física dos componentes e à condição da trajetória da cinta, permanecem atendidos pelas inspeções do plano vigente, às quais se soma a aferição semanal da tensão aplicada.

4.7 Plano de Manutenção Proposto

4.7.1 Análise do Plano Vigente

Antes de apresentar a proposta, examinou-se o plano de manutenção preventiva atualmente adotado, obtido conforme descrito na Seção 3.5. Ele é composto por cinco listas de tarefas de inspeção mecânica, distribuídas conforme a TAB. 8, às quais se soma um plano mensal de lubrificação.

Examinado o conteúdo dessas operações, revela-se uma característica determinante para

Tabela 8 - Composição do plano de manutenção vigente

Lista de tarefas	Periodicidade	Operações
IM (1S)	Semanal	8
IM (2S)	Quinzenal	29
IM (1M)	Mensal	54
IM (3M)	Trimestral	28
IM (6M)	Semestral	76
Total		**195**

Fonte: Empresa pesquisada (2025)

a análise, mostrando que, das 195 operações, 193 são descritas como inspeção, sendo 150 delas explicitamente descritas como inspeção sensitiva, e apenas uma menciona lubrificação. Nenhuma operação de medição de folga, de aferição de parâmetro de regulagem ou de correção de ajuste consta do plano. As tarefas consistem, todas elas, na observação sensitiva de componentes individuais identificados pela numeração da documentação do fabricante, como se verifica em descrições do tipo inspeção sensitiva do rolo de suporte, da mola de compressão ou do suporte de montagem da roldana.

Confrontado o plano vigente com os resultados da Seção 4.5, verifica-se que o modo de falha responsável por 63,8 % das ocorrências e pelos seis maiores valores de RPN, o desajuste, não possui no plano atual nenhuma tarefa correspondente. O plano cobre exaustivamente a integridade física dos componentes, mas não contempla a regulagem do equipamento, que é justamente onde as falhas se concentram. Essa é a lacuna central identificada pela aplicação do RCM, e ela explica por que o volume de paradas não apresentou tendência de redução ao longo do período analisado, conforme demonstrado na Seção 4.2.3.

Soma-se a isso o fato de que a inspeção sensitiva, predominante no plano, é tarefa sob condição, cuja eficácia depende da existência de intervalo P-F e, como demonstrado na Seção 4.5.1, esse intervalo não existe para o modo predominante, o que significa que a maior parte do esforço de manutenção preventiva está alocada em tarefas que não podem, por natureza, antecipar as falhas que efetivamente ocorrem.

A lacuna não se restringe ao plano de manutenção. A empresa pesquisada não dispõe de POP para o ajuste do equipamento, de modo que cada intervenção corretiva restabelece a regulagem segundo a experiência individual do executante, sem que a causa raiz do desajuste seja identificada e tratada. Configura-se, assim, um ciclo vicioso de falhas: o desajuste interrompe o ciclo de cintagem, o equipamento é reajustado e liberado, perde novamente a regulagem em curto prazo e volta a falhar pelo mesmo modo. Esse comportamento é coerente com a taxa de falhas decrescente identificada na Seção 4.3.3, segundo a qual a probabilidade de falha é mais elevada logo após a intervenção.

4.7.2 Proposta

Preservar o plano vigente e acrescentar a ele o que a análise demonstrou estar ausente: é esse o sentido da proposta apresentada no QUADRO 13. Acrescentar em vez de substituir justifica-se porque as inspeções existentes atendem aos modos de falha associados à integridade física dos componentes, como dano, agarramento e desgaste, que respondem por parcela menor, porém não desprezível, das ocorrências.

Quadro 13 - Plano de manutenção proposto

Periodicidade	Tarefa	Escopo	Origem
Diária	Verificação funcional de regulagem	Medição e registro dos parâmetros de ajuste do cabeçote, do acionamento, da lança, do arco guia, do acumulador e da unidade de alimentação, incluindo a abertura das abas de guia e o alinhamento da junção do arco e das roldanas, com correção quando fora de faixa	Nova
Semanal	Verificação da tensão aplicada	Aferição por amostragem da tensão da cinta em bobinas processadas, com registro do valor medido	Nova
Semanal	Verificação funcional do corte e da proteção térmica	Medição e registro da regulagem do conjunto de cravamento e corte e do curso da proteção térmica, com correção quando fora de faixa	Nova
Semanal	IM (1S)	Inspeção sensitiva conforme lista vigente	Mantida
Quinzenal	IM (2S) e verificação de lubrificação	Inspeção sensitiva conforme lista vigente, acrescida da verificação do estado de lubrificação dos mecanismos de acionamento	Ampliada
Mensal	IM (1M) e medição de desgaste	Inspeção sensitiva conforme lista vigente, acrescida da medição do desgaste das facas de corte	Ampliada
Mensal	Plano de lubrificação	Conforme plano vigente	Mantida
Trimestral	IM (3M)	Inspeção sensitiva conforme lista vigente	Mantida
Semestral	IM (6M)	Inspeção sensitiva conforme lista vigente	Mantida

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Às tarefas programadas somam-se duas ações que não possuem periodicidade, por serem

de implantação única, mas que a análise indica como as de maior potencial de retorno. A primeira é a padronização do procedimento de ajuste, com definição documentada dos valores de referência de cada parâmetro de regulagem e dos meios de aferição, de modo que o resultado da intervenção não dependa da experiência individual do executante. A segunda é a avaliação técnica da instrumentação do equipamento para monitoramento dos parâmetros de regulagem, que teria o efeito de criar o intervalo P-F hoje inexistente e, com isso, tornar viáveis tarefas preditivas para o modo predominante.

A justificativa para essas duas ações decorre diretamente do parâmetro de forma e, além disso, a taxa de falhas decrescente, associada a um modo de falha que é perda de regulagem, aponta para deficiência no próprio ato de ajustar, e não para degradação do componente ajustado.

4.8 Discussão dos Resultados

4.8.1 Confronto com o Comportamento Observado no Ativo em Estudo

A análise conduzida até aqui apoia-se integralmente no histórico da Cintadeira A, conforme justificado na Seção 3.2.2 e, como a Cintadeira B vem sendo acompanhada desde a sua entrada em operação, dispõe-se de um conjunto de ocorrências independente daquele que originou a análise, o que permite verificar se os modos de falha previstos correspondem aos efetivamente observados no ativo em estudo.

Entre abril e outubro de 2025 foram registradas 24 ocorrências de manutenção mecânica na Cintadeira B, cuja distribuição por modo de falha consta da TAB. 9, ao lado da participação prevista a partir do equipamento de referência.

Tabela 9 - Modos de falha observados na Cintadeira B e previstos pela análise

Modo de falha	**Ocorrências**	**Participação**	**Previsto**
Desajuste ou falha de ajuste	18	75,0 %	63,8 %
Desalinhamento de componente mecânico	2	8,3 %	2,1 %
Abalroamento	2	8,3 %	1,3 %
Agarramento de componente mecânico	1	4,2 %	5,6 %
Componente mecânico danificado	1	4,2 %	5,0 %
Total	**24**	**100 %**	

Fonte: Empresa pesquisada (2025)

Em seu aspecto central, o confronto é favorável à análise pois o desajuste responde por 75 % das ocorrências no ativo em estudo, contra 63,8 % previstos a partir do equipamento de referência, e mantém-se como modo predominante por margem ampla. Todos os cinco modos observados constam do histórico do equipamento de referência, e nenhum modo não previsto se manifestou. Quatro deles integram a matriz FMEA, e o quinto, o desalinhamento de componente mecânico, figura na matriz como causa provável dos modos de desajuste e de lançamento de

fita. As descrições registradas nas ocorrências de desajuste da Cintadeira B reproduzem, além disso, as manifestações caracterizadas na Seção 4.2.5, como falha do acumulador durante o lançamento da cinta, cinta não cortada, cinta lançada fora da posição prevista e cinta retida na calha. O confronto reforça, assim, tanto a equivalência entre os ativos quanto a pertinência de concentrar a proposta na estabilidade do ajuste.

Duas ressalvas, no entanto, são necessárias, e a primeira delas é o tamanho da amostra: 24 ocorrências em pouco menos de seis meses não permitem inferência estatística, e as participações relativas dos modos menos frequentes carecem de significância. A segunda é que o período corresponde ao início de operação do equipamento, fase em que desajustes decorrentes da montagem e do comissionamento tendem a ser mais frequentes, o que pode explicar a participação superior à prevista.

4.8.2 Impacto Esperado da Proposta

Como o plano proposto não foi implantado, seu efeito não pôde ser medido, razão pela qual se aplicou o procedimento de análise de sensibilidade descrito na Seção 3.6.3, que consiste em remover do histórico parcelas dos eventos atribuídos ao modo prioritário e recalcular os indicadores sobre o conjunto remanescente. A TAB. 10 apresenta os três cenários de redução considerados.

Tabela 10 - Cenários de impacto da redução dos eventos de desajuste

Cenário	**Eventos**	***MTBF* (h)**	**Variação**	**Horas evitadas**
Situação atual	621	162,3	n/a	n/a
Redução de 30 %	502	201,0	24 %	47,1
Redução de 50 %	423	238,7	47 %	78,4
Redução de 70 %	344	293,8	81 %	109,8

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os valores referem-se ao período completo de 11,6 anos, e uma redução de metade dos eventos de desajuste elevaria o tempo médio entre falhas de 162,3 h para 238,7 h, evitando 78,4 h de indisponibilidade, o equivalente a aproximadamente 6,8 h por ano. Essa análise se trata de projeção, pois ela indica a sensibilidade dos indicadores ao modo de falha prioritário, mas não incorpora o esforço adicional de execução das tarefas propostas nem eventuais efeitos indiretos. Sua função é dimensionar o potencial do que se propõe, e a verificação do ganho efetivo depende de implantação e acompanhamento posteriores.

4.8.3 Viabilidade da Periodicidade Proposta

Resta examinar se a periodicidade diária obtida na Seção 4.6.1 é factível, pois verificar todos os dias os parâmetros de regulagem de seis subsistemas representa esforço consideravelmente superior ao do plano vigente, cuja tarefa mais frequente é semanal e reúne oito operações.

Diante dessa constatação, três caminhos se apresentam. O primeiro é executar a verificação integral, o que exige avaliar a disponibilidade da equipe e o tempo de parada necessário, informações que não estavam ao alcance deste trabalho. O segundo é restringir o escopo diário aos subsistemas de maior número de prioridade de risco, mantendo os demais em periodicidade semanal, o que reduz o esforço e preserva a cobertura dos modos mais críticos. O terceiro é a instrumentação proposta na Seção 4.7.2, que ao criar intervalo P-F tornaria desnecessária a verificação manual em base diária, substituindo-a por monitoramento contínuo.

A escolha entre esses caminhos depende de dados de custo e de capacidade de mão de obra que extrapolam o escopo desta análise, e constitui decisão a ser tomada pela gestão da manutenção. A contribuição do presente trabalho está em demonstrar que a periodicidade adequada é da ordem de vinte e quatro horas, e não de semanas ou meses como estabelece o plano atual, e que essa constatação decorre do comportamento observado das falhas, descrito pela distribuição de Weibull, e não de estimativa subjetiva.

4.8.4 Limitações

Além das ressalvas já registradas ao longo do capítulo, três limitações merecem destaque. A modelagem apoia-se em dados de equipamento de referência, e não do ativo em estudo, conforme discutido na Seção 3.2.2. O parâmetro de posição estimado é condicionado pela janela de consolidação adotada, conforme observado na Seção 4.3.2. Por fim, os índices de detecção, as causas prováveis registradas na matriz FMEA e a caracterização do desajuste decorrem de análise documental, das descrições registradas nas ocorrências e de observação, não tendo sido submetidos a validação formal junto à equipe de manutenção do equipamento.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

Este trabalho aplicou a metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade a uma cintadeira circunferencial de bobinas instalada na saída de uma linha de laminação de tiras a quente, com o objetivo de propor um plano de manutenção voltado ao aumento de sua confiabilidade e à redução de suas falhas operacionais. A pergunta que orientou a investigação indagava de que modo a metodologia poderia contribuir para esse resultado, e a resposta obtida mostrou-se distinta daquela que a intuição sugeriria.

O diagnóstico do desempenho revelou um equipamento cuja disponibilidade, de 99,72 %, aparenta ser satisfatória, mas que falha em média a cada 162 h de operação, ou aproximadamente uma vez por semana ao longo de mais de uma década, sem que se observe tendência de melhoria no período. O problema, portanto, não reside na duração das intervenções, que é reduzida, mas na sua frequência, o que é particularmente relevante em um ativo cuja indisponibilidade reduz a capacidade da linha a 60 %.

A modelagem dos tempos entre falhas pela distribuição de Weibull de três parâmetros produziu o resultado de maior consequência para o trabalho, quando o parâmetro de forma mostrou-se inferior à unidade em todos os subsistemas analisados, variando entre 0,617 e 0,862, o que caracteriza taxa de falhas decrescente e indica que a probabilidade de falha é mais elevada logo após o retorno do equipamento à operação. Somado ao fato de que o desajuste, perda de regulagem concentrada nos mecanismos que retêm, conduzem e tensionam a cinta, responde por 63,8 % das ocorrências, esse resultado aponta para falhas induzidas pela própria intervenção: o equipamento é reajustado, retorna à operação e perde a regulagem em prazo curto, sem que a causa do desajuste tenha sido eliminada.

Os seis modos de falha de maior número de prioridade de risco correspondem todos ao mesmo mecanismo, manifestando-se em subsistemas distintos, e nenhum deles apresenta indício prévio detectável, uma vez que o desajuste somente se evidencia quando o ciclo é interrompido. A ausência de intervalo P-F, somada ao parâmetro de forma inferior à unidade, exclui tanto as tarefas preditivas por inspeção quanto a substituição preventiva por tempo, situação para a qual a metodologia prevê a alteração de projeto ou de procedimento como caminho remanescente.

O confronto entre esse diagnóstico e o plano de manutenção vigente evidenciou a lacuna que sustenta a proposta: das 195 operações que compõem o plano, 193 são inspeções, das quais 150 explicitamente sensitivas, e nenhuma se destina à medição ou à correção de parâmetros de regulagem. O plano cobre de forma exaustiva a integridade física dos componentes, mas não contempla a regulagem do equipamento, que é justamente onde as falhas se concentram. Esse descompasso explica por que o esforço preventivo aplicado ao longo dos anos não se converteu em redução das paradas. Constatou-se, ainda, a inexistência de procedimento operacional padrão

para o ajuste do equipamento, o que, somado à ausência de tratamento da causa raiz do desajuste, mantém o equipamento em um ciclo vicioso de reajuste e falha.

A proposta elaborada preserva as inspeções existentes, que atendem aos modos associados à integridade dos componentes, e acrescenta a verificação funcional programada dos parâmetros de regulagem, cuja periodicidade, obtida a partir dos parâmetros de Weibull com critério de confiabilidade de 80 %, situa-se em torno de vinte e quatro horas para os seis subsistemas críticos. Somam-se à proposta a padronização do procedimento de ajuste e a avaliação da instrumentação capaz de antecipar a perda de regulagem, ações que atuam sobre a causa e não sobre o efeito.

A pertinência do diagnóstico foi fundamentada pelo comportamento observado no próprio equipamento em estudo, mostrando que, das 24 ocorrências de manutenção mecânica registradas em seus primeiros meses de operação, 75 % correspondem a desajuste, e todos os modos observados constam do histórico do equipamento de referência, sem que nenhum modo não previsto se manifestasse. Essa correspondência confirma a equivalência entre os ativos, fundamentada na identidade de projeto e das condições de uso e de manutenção, e justifica a transposição da análise de um equipamento para o outro. A análise de sensibilidade conduzida sobre o histórico indica, por sua vez, que a redução de metade dos eventos de desajuste elevaria o tempo médio entre falhas de 162,3 h para 238,7 h.

Conclui-se, assim, que a contribuição da metodologia neste caso não consistiu em acrescentar inspeções ao plano existente, mas em demonstrar que o esforço preventivo estava direcionado a modos de falha que não são os predominantes, e que a estabilidade do ajuste, e não a integridade dos componentes, é o que determina o desempenho do equipamento. Os objetivos propostos foram alcançados, e o trabalho oferece à empresa um plano fundamentado no comportamento das falhas efetivamente registradas, em substituição a periodicidades herdadas de recomendações genéricas.

5.2 Recomendações

As limitações identificadas ao longo do trabalho e os resultados obtidos sugerem os seguintes desdobramentos:

a) implantar o plano proposto e acompanhar os indicadores por período mínimo de doze meses, de modo a verificar o ganho efetivo em comparação com a análise de sensibilidade apresentada na Seção 4.8.2;

b) reestimar os parâmetros da distribuição de Weibull com dados próprios da Cintadeira B assim que seu histórico atingir volume suficiente, dispensando o recurso ao equipamento de referência adotado na Seção 3.2.2;

c) investigar a causa-raiz do desajuste recorrente, com atenção ao procedimento de ajuste, à qualificação da execução e à eventual inadequação de componentes de fixação, uma vez que o parâmetro de forma inferior à unidade aponta para deficiência no próprio ato de intervir;

d) avaliar tecnicamente a instrumentação dos parâmetros de regulagem, cuja implantação criaria o intervalo P-F hoje inexistente e tornaria viáveis tarefas preditivas para o modo predominante;

e) padronizar a codificação dos dois ativos no sistema corporativo, o que permitiria consolidar o histórico de falhas da frota de cintadeiras e ampliar a base disponível para análises futuras;

f) aprimorar o preenchimento do campo de subsistema no registro de paradas, cuja lacuna alcançou 24,7 % das ocorrências no período analisado e restringiu a estratificação da análise;

g) estender a aplicação da metodologia aos demais equipamentos auxiliares da linha, aproveitando a estrutura de análise desenvolvida neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 716–723, 1974.

ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test of goodness of fit. **Journal of the American Statistical Association**, v. 49, n. 268, p. 765–769, 1954.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e mantenabilidade. Rio de Janeiro, 1994.

BRASILEIRO, A. M. M. **Como produzir textos acadêmicos e científicos**. 2. ed. São Paulo: Contexto, 2021.

DELIGNETTE-MULLER, M. L.; DUTANG, C. fitdistrplus: an R package for fitting distributions. **Journal of Statistical Software**, v. 64, n. 4, p. 1–34, 2015.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (org.). **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1993.

JURAN, J. M.; GODFREY, A. B. (ed.). **Juran's quality handbook**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção**: função estratégica. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Metodologia científica**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

MATTAR, F. N. **Pesquisa de marketing**: metodologia, planejamento, execução e análise. 7. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

MOUBRAY, J. **Manutenção centrada em confiabilidade**. Oxford: Aladon, 2000.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico**: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Versão 4.3.3. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 6 ago. 2026.

RIZZO, E. M. da S. **Processos de laminação dos aços**: uma introdução. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2007.

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **The Annals of Statistics**, v. 6, n. 2, p. 461–464, 1978.

SODRÉ, R. T. M. et al. Aplicação de engenharia de confiabilidade na redução de paradas por falha da máquina de marcar do laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 69., 2014, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABM, 2014.

SOUZA, A. L. de et al. Laminação de tiras a quente da Gerdau. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO: PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 42., 2012, Vitória. **Anais** [...]. Vitória: ABM, 2012.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

XENOS, H. G. d'P. **Gerenciando a manutenção produtiva**: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.

XENOS, H. G. d'P. **Gerenciando a manutenção produtiva**: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade. 2. ed. Nova Lima: Falconi, 2014.

Apêndices

APÊNDICE A – ROTINA COMPUTACIONAL PARA O AJUSTE DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Reproduz-se a seguir a rotina desenvolvida em linguagem R para a estimação dos parâmetros da distribuição de Weibull, conforme o procedimento descrito na Seção 3.6.2. A rotina emprega o pacote `fitdistrplus` e executa o ajuste para a amostra completa e para cada subsistema com número suficiente de eventos, além de comparar a aderência entre distribuições candidatas e gerar os papéis de probabilidade. Sua inclusão tem por finalidade permitir a reprodução dos resultados apresentados na Seção 4.3.

```
# ======================================================================
#  Ajuste da distribuicao de Weibull aos tempos entre falhas
#  TCC -- RCM aplicada a uma cintadeira circunferencial de bobinas
#
#  Entrada : dados/tbf-consolidado-8h.csv
#  Saidas  : analise/saida/parametros-weibull.csv
#            analise/saida/aderencia-distribuicoes.csv
#            analise/saida/papel-probabilidade-global.pdf
#            analise/saida/papel-probabilidade-subsistemas.pdf
#
#  Executar a partir da RAIZ do projeto:
#      Rscript analise/ajuste-weibull.R
# ======================================================================

# ---------- 1. Pacotes ------------------------------------------------
pacotes <- c("fitdistrplus")
faltando <- pacotes[!(pacotes %in% installed.packages()[, "Package"])]
if (length(faltando)) {
  install.packages(faltando, repos = "https://cloud.r-project.org")
}
suppressPackageStartupMessages(library(fitdistrplus))

dir.create("analise/saida", showWarnings = FALSE, recursive = TRUE)

# ---------- 2. Weibull de tres parametros -----------------------------
# O fitdistrplus nao traz a forma de 3 parametros; ela e definida aqui
# como uma Weibull deslocada pelo parametro de posicao (gama).
dweibull3 <- function(x, shape, scale, thres) {
  dweibull(x - thres, shape, scale)
}
pweibull3 <- function(q, shape, scale, thres) {
```

```
  pweibull(q - thres, shape, scale)
}
qweibull3 <- function(p, shape, scale, thres) {
  qweibull(p, shape, scale) + thres
}

# ---------- 3. Funcao de ajuste ----------------------------------------
ajustar <- function(t, rotulo) {
  t <- t[is.finite(t) & t > 0]
  n <- length(t)
  if (n < 30) {
    message(sprintf("  [%s] ignorado: apenas %d eventos", rotulo, n))
    return(NULL)
  }

  # --- Weibull de 2 parametros, por maxima verossimilhanca
  f2 <- fitdist(t, "weibull", method = "mle")
  b2 <- unname(f2$estimate["shape"])
  e2 <- unname(f2$estimate["scale"])

  # --- Weibull de 3 parametros
  # O parametro de posicao e limitado a 99 % do menor tempo observado:
  # sem esse limite a verossimilhanca cresce sem limite quando gama
  # tende ao minimo da amostra, e a estimativa nao converge.
  g_max <- 0.99 * min(t)
  f3 <- tryCatch(
    fitdist(t, "weibull3", method = "mle",
            start = list(shape = b2, scale = e2, thres = g_max / 2),
            lower = c(1e-3, 1e-3, 0),
            upper = c(Inf, Inf, g_max)),
    error = function(e) NULL
  )

  if (!is.null(f3)) {
    b3 <- unname(f3$estimate["shape"])
    e3 <- unname(f3$estimate["scale"])
    g3 <- unname(f3$estimate["thres"])
  } else {
    b3 <- NA; e3 <- NA; g3 <- NA
    message(sprintf("  [%s] Weibull 3P nao convergiu", rotulo))
  }
```

```
  # --- MTTF pela distribuicao ajustada (Eq. 2.9 do TCC)
  mttf2 <- e2 * gamma(1 + 1 / b2)
  mttf3 <- if (!is.na(b3)) g3 + e3 * gamma(1 + 1 / b3) else NA

  # --- Aderencia: calculada separadamente para cada forma ajustada,
  # para que a estatistica corresponda aos parametros reportados.
  gof2 <- gofstat(f2)
  gof3 <- if (!is.null(f3)) gofstat(f3) else NULL

  data.frame(
    subsistema   = rotulo,
    n            = n,
    beta_2p      = round(b2, 4),
    eta_2p       = round(e2, 2),
    mttf_2p      = round(mttf2, 1),
    beta_3p      = round(b3, 4),
    eta_3p       = round(e3, 2),
    gama_3p      = round(g3, 3),
    mttf_3p      = round(mttf3, 1),
    AD_2p        = round(gof2$ad, 4),
    AD_3p        = if (!is.null(gof3)) round(gof3$ad, 4) else NA,
    KS_3p        = if (!is.null(gof3)) round(gof3$ks, 4) else NA,
    AIC_3p       = if (!is.null(f3)) round(f3$aic, 1) else NA,
    stringsAsFactors = FALSE
  )
}

# ---------- 4. Leitura dos dados ----------------------------------------
dados <- read.csv("dados/tbf-consolidado-8h.csv",
                  stringsAsFactors = FALSE, encoding = "UTF-8")
cat(sprintf("Eventos carregados: %d\n\n", nrow(dados)))

# ---------- 5. Ajuste global --------------------------------------------
cat("== Ajuste global ==\n")
res <- ajustar(dados$tbf_h, "GLOBAL")

# ---------- 6. Ajuste por subsistema ------------------------------------
cat("\n== Ajuste por subsistema ==\n")
sub <- dados[dados$sistema != "NAO INFORMADO", ]
for (s in names(sort(table(sub$sistema), decreasing = TRUE))) {
```

```
  r <- ajustar(sub$tbf_h[sub$sistema == s], s)
  if (!is.null(r)) res <- rbind(res, r)
}

write.csv(res, "analise/saida/parametros-weibull.csv",
          row.names = FALSE, fileEncoding = "UTF-8")
cat("\n")
print(res[, c("subsistema", "n", "beta_3p", "eta_3p", "gama_3p",
              "mttf_3p", "AD_3p", "KS_3p")], row.names = FALSE)

# ---------- 7. Comparacao entre distribuicoes candidatas ---------------
# Justifica a escolha da Weibull frente a outros modelos, conforme
# a Secao 2.13.1.3 do TCC.
cat("\n== Comparacao entre distribuicoes (amostra global) ==\n")
t <- dados$tbf_h[dados$tbf_h > 0]
g_max <- 0.99 * min(t)
b0 <- unname(fitdist(t, "weibull", method = "mle")$estimate["shape"])
e0 <- unname(fitdist(t, "weibull", method = "mle")$estimate["scale"])

cands <- list(
  `Weibull 2P`   = fitdist(t, "weibull", method = "mle"),
  `Weibull 3P`   = fitdist(t, "weibull3", method = "mle",
                           start = list(shape = b0, scale = e0,
                                        thres = g_max / 2),
                           lower = c(1e-3, 1e-3, 0),
                           upper = c(Inf, Inf, g_max)),
  `Lognormal 2P` = fitdist(t, "lnorm", method = "mle"),
  `Gama 2P`      = fitdist(t, "gamma", method = "mle",
                           start = list(shape = 1, rate = 1 / mean(t))),
  `Exponencial`  = fitdist(t, "exp", method = "mle")
)
comp <- do.call(rbind, lapply(names(cands), function(nm) {
  g <- gofstat(cands[[nm]])
  data.frame(distribuicao = nm,
             AD  = round(g$ad, 4),
             KS  = round(g$ks, 4),
             AIC = round(cands[[nm]]$aic, 1),
             BIC = round(cands[[nm]]$bic, 1))
}))
comp <- comp[order(comp$AD), ]
write.csv(comp, "analise/saida/aderencia-distribuicoes.csv",
```

```
          row.names = FALSE, fileEncoding = "UTF-8")
print(comp, row.names = FALSE)

# ---------- 8. Papel de probabilidade ----------------------------------
pdf("analise/saida/papel-probabilidade-global.pdf",
    width = 7, height = 6)
ppcomp(cands[["Weibull 2P"]], main = "", xlab = "Tempo entre falhas (h)",
       ylab = "Probabilidade acumulada empirica")
cdfcomp(cands[["Weibull 2P"]], main = "", xlogscale = TRUE,
        xlab = "Tempo entre falhas (h)", ylab = "F(t)")
dev.off()

pdf("analise/saida/papel-probabilidade-subsistemas.pdf",
    width = 9, height = 7)
par(mfrow = c(2, 2))
principais <- head(names(sort(table(sub$sistema), decreasing = TRUE)), 4)
for (s in principais) {
  ts <- sub$tbf_h[sub$sistema == s]
  fs <- fitdist(ts, "weibull", method = "mle")
  ppcomp(fs, main = substr(s, 1, 34),
         xlab = "Empirico", ylab = "Teorico")
}
dev.off()

cat("\nArquivos gravados em analise/saida/\n")
```

Anexos

ANEXO A – REGISTROS DE PARADA EXTRAÍDOS DO SISTEMA DE CONTROLE

Reproduz-se a seguir amostra dos registros de manutenção não programada da Cintadeira A, extraídos do sistema de controle de paradas da empresa pesquisada e utilizados como base para a análise conduzida no Capítulo 4. A amostra corresponde aos trinta primeiros registros do período analisado e tem por finalidade documentar a estrutura e o conteúdo do dado; o conjunto completo reúne 1.342 ocorrências entre dezembro de 2013 e julho de 2025 e permanece arquivado junto ao autor.

Todos os registros reproduzidos pertencem à classificação TMNP, que identifica as paradas por manutenção não programada, motivo pelo qual a coluna correspondente foi suprimida. Foram igualmente suprimidos os campos de observação em texto livre e de identificação do usuário responsável pelo registro, por não serem pertinentes à análise e por conterem informações de identificação pessoal. As denominações de sistemas e componentes foram abreviadas para caber no espaço do quadro, preservando-se o significado original.

Quadro 14 - Amostra dos registros de parada da Cintadeira A

Data	Início	Fim	Tempo	Sistema	Componente	Motivo
07/12/2013	23:35	23:48	00:13	Carro de transporte do cabeçote	Cilindro pneum. do braço do cabeçote	Desajuste ou falha de ajuste
07/12/2013	23:51	23:58	00:07	Carro de transporte do cabeçote	Cilindro pneum. do braço do cabeçote	Desajuste ou falha de ajuste
08/12/2013	00:01	00:10	00:09	Carro de transporte do cabeçote	Cilindro pneum. do braço do cabeçote	Desajuste ou falha de ajuste
08/12/2013	00:22	00:29	00:07	Carro de transporte do cabeçote	Cilindro pneum. do braço do cabeçote	Desajuste ou falha de ajuste
08/12/2013	00:32	00:39	00:07	Carro de transporte do cabeçote	Cilindro pneum. do braço do cabeçote	Desajuste ou falha de ajuste
20/12/2013	03:57	04:15	00:18	Não informado	Não informado	Desajuste ou falha de ajuste
15/01/2014	21:30	21:35	00:05	Arco guia da cinta	Arco guia da cinta	Bobina aberta
11/02/2014	01:20	01:29	00:09	Arco guia da cinta	Aba guia da cinta	Agarramento de cauda de material
11/02/2014	06:06	06:11	00:05	Arco guia da cinta	Arco guia da cinta	Agarramento de cauda de material
26/02/2014	02:32	02:50	00:18	Cabeçote de cintagem	Motor de alimentação de fita	Lançamento de fita fora da guia
26/02/2014	03:40	04:01	00:21	Cabeçote de cintagem	Motor de alimentação de fita	Lançamento de fita fora da guia
01/03/2014	01:02	01:13	00:11	Cabeçote de cintagem	Gramp prendedor cinta	Arrebentamento de fita
01/03/2014	02:25	02:41	00:16	Cabeçote de cintagem	Gramp prendedor cinta	Arrebentamento de fita
01/03/2014	02:50	03:00	00:10	Cabeçote de cintagem	Motor de alimentação de fita	Lançamento de fita fora da guia
01/03/2014	03:30	03:39	00:09	Cabeçote de cintagem	Motor de alimentação de fita	Lançamento de fita fora da guia

continua

Quadro 14 (continuação)

Data	Início	Fim	Tempo	Sistema	Componente	Motivo
01/03/2014	03:58	04:08	00:10	Cabeçote de cintagem	Motor de alimentação de fita	Lançamento de fita fora da guia
01/03/2014	11:32	11:44	00:12	Arco guia da cinta	Aba guia da cinta	Agarramento de componente mecânico
03/03/2014	14:11	14:26	00:15	Acumulador de cinta	Roldana tripla superior	Componente mecânico danificado
03/03/2014	17:08	17:28	00:20	Cabeçote de cintagem	Motor de alimentação de fita	Atuaçao da proteção
03/03/2014	17:28	17:38	00:10	Acumulador de cinta	Estrutura fixação roldanas	Atuaçao da proteção
03/03/2014	18:58	19:03	00:05	Cabeçote de cintagem	Motor de alimentação de fita	Atuaçao da proteção
08/03/2014	00:51	01:02	00:11	Arco guia da cinta	Aba guia da cinta	Lançamento de fita fora da guia
08/03/2014	01:22	01:30	00:08	Arco guia da cinta	Aba guia da cinta	Lançamento de fita fora da guia
08/03/2014	06:56	07:04	00:08	Arco guia da cinta	Aba guia da cinta	Lançamento de fita fora da guia
12/03/2014	02:52	03:01	00:09	Arco guia da cinta	Arco guia da cinta	Arrebentamento de fita
12/03/2014	03:04	03:18	00:14	Arco guia da cinta	Arco guia da cinta	Arrebentamento de fita
12/03/2014	08:56	09:07	00:11	Arco guia da cinta	Sensor de posição do cabeçote	Arrebentamento de fita
12/03/2014	09:16	09:33	00:17	Dispositivo parada de cinta	Transdutor de pressão	Arrebentamento de fita
12/03/2014	13:09	13:18	00:09	Arco guia da cinta	Arco guia da cinta	Desajuste ou falha de ajuste
15/03/2014	22:33	22:45	00:12	Arco guia da cinta	Solenoide de fechamento da guia	Lançamento de fita fora da guia

Fonte: Empresa pesquisada (2025)

ANEXO B – PLANO DE MANUTENÇÃO VIGENTE

Apresenta-se a seguir amostra das listas de tarefas de inspeção mecânica que compõem o plano de manutenção preventiva vigente da Cintadeira B, analisadas na Seção 4.7.1. São reproduzidas as oito primeiras operações de cada uma das cinco listas, totalizando quarenta das 195 operações do plano. A amostra permite verificar a natureza das tarefas praticadas, predominantemente de inspeção sensitiva de componentes individuais, característica que fundamenta a proposta apresentada na Seção 4.7.2.

Quadro 15 - Amostra das operações do plano de manutenção vigente

Periodicidade	Nº	Descrição da operação
Semanal	10	Inspeção| Cabeçote de Cintagem - Ítem 1
Semanal	20	Inspeção | Conjunto de Mandíbulas
Semanal	30	Inspeção | Roda de Tração
Semanal	40	Verificação e Análise do Alisador de Fita
Semanal	50	Verificação e Análise do Alisador de Fita
Semanal	60	Inspeção Sensitiva do Motor Pneumático e Transmissão
Semanal	70	Inspeção| Aba Guia - Cabeçote Cintagem Ítem 61
Semanal	80	Inspeção| Aba Guia do Cabeçote Cintagem - Ítem 63
Quinzenal	10	Inspeção| Aba de Guia 400 L-1 Lança Direita Item20
Quinzenal	20	Inspeção| Aba de Guia 400 L-2 Lança Direita Item21
Quinzenal	30	Inspeção| Bloco Desliz. Trilho Lança Direita Item5
Quinzenal	40	Inspeção| Cilindro Pneumatico Lança Direita Item3
Quinzenal	50	Inspeção| Estrutura Lança Movel Direita
Quinzenal	60	Inspeção| Mola de Tensão Lança Direita Item18
Quinzenal	70	Inspeção| Placa Travamento Baioneta Lança Item12
Quinzenal	80	Inspeção| Suporte Deslizament Baioneta Lança Item9
Mensal	10	Inspeção Sensitival Valv Dir 5/3 Aci Cil Trava Cinta S26/S27
Mensal	20	Inspeção Sensitival Conj. Manifold Aci Cil Trava Cinta Item9
Mensal	30	Inspeção Sensitival Valv Dire. 5/2 Acio. Trava Cil S28
Mensal	40	Inspeção Sensitival Valv Regulador fluxo Av Cil Trava Cinta
Mensal	50	Inspeção Sensitival Valv Regulador fluxo Ret Cil Trava Cinta
Mensal	60	Inspeção Sensitival Valv Regulador Pressão Cil Trava Item 16
Mensal	70	Inspeção SensitivalValv Seg 4/3 Alimentação Auxiliar
Mensal	80	Inspeção SensitivalValv Seg 4/3 Alimentação Cabeçote

continua

Quadro 15 (continuação)

Periodicidade	Nº	Descrição da operação
Trimestral	10	Inspeção Sensitiva Bloco Rolamento Cinta Vazia Item 40
Trimestral	20	Inspeção Sensitiva | Estrutura do Acumulador Cinta Item 44
Trimestral	30	Inspeção Sensitival Bloco de Rolamento Cinta Vazia 1 Item 41
Trimestral	40	Inspeção SensitivalEstrutura Dispenser de Cinta Nº1
Trimestral	50	Inspeção SensitivalBloco de Rolamento Cinta Vazia 2 Item 41
Trimestral	60	Inspeção SensitivalEstrutura Dispenser de Cinta Nº2
Trimestral	70	Inspeção Sensitival Aba Guia 150 Longa Arco CintagemItem 10
Trimestral	80	Inspeção Sensitival Aba Guia 175 longo Arco CintagemItem 63
Semestral	10	Inspeção Sensitival Guia do Acumulador Cinta Item 39
Semestral	20	Inspeção Sensitival Roldana Acumulador Cinta Cintadeir Item 16
Semestral	30	Inspeção Sensitival Rolo Guia Roldana Acumulado Cinta Item23
Semestral	40	Inspeção Sensitival Sup. Montagem Roldana Acumulador Item35
Semestral	50	Inspeção Sensitival Suporte Placa Montagem Acumulador Item30
Semestral	60	Inspeção Sensitival Suporte Roldana Acumulador Cinta Item 15
Semestral	70	Inspeção Sensitival Trilho LM Acumulador Cinta Item 7
Semestral	80	Inspeção Sensitival Unidade Soldagem Cinta da Cintadeira B

Fonte: Empresa pesquisada (2025)