



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DETERMINAÇÃO DE LIMITE PREDITIVO DE RODAS DE LOCOMOTIVAS GE  
EVOLUTION COM BASE NA ANÁLISE DA CURVA DE DEGRADAÇÃO DE  
LARGURA DE FRISO**

**LUCAS FABRÍCIO NEVES DE SOUSA**

**SÃO LUÍS**

**2023**

LUCAS FABRÍCIO NEVES DE SOUSA

**DETERMINAÇÃO DE LIMITE PREDITIVO DE RODAS DE LOCOMOTIVAS GE  
EVOLUTION COM BASE NA ANÁLISE DA CURVA DE DEGRADAÇÃO DE  
LARGURA DE FRISO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
coordenação do curso de Engenharia Mecânica  
como requisito para a obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Andrei Bavaresco  
Rezende

**SÃO LUÍS**

**2023**

LUCAS FABRÍCIO NEVES DE SOUSA

**DETERMINAÇÃO DE LIMITE PREDITIVO DE RODAS DE LOCOMOTIVAS GE  
EVOLUTION COM BASE NA ANÁLISE DA CURVA DE DEGRADAÇÃO DE  
LARGURA DE FRISO**

Trabalho aprovado. São Luís – MA, 14 de dezembro 2023

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Andrei Bavaresco Rezende – UFMA/Orientador

---

Prof. Dr. Elson César Moraes – UFMA/Engenharia Mecânica

---

Prof. Me. Bruno Leite Cruz – UFMA/Engenharia Mecânica

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Sousa, Lucas Fabrício Neves de.

Determinação de limite preditivo de rodas de locomotivas GE Evolution com base na análise da curva de degradação de largura de friso / Lucas Fabrício Neves de Sousa. - 2023.

28 p.

Orientador(a): Andrei Bavaresco Rezende.

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2023.

1. Confiabilidade. 2. Degradação. 3. Friso. 4. Locomotivas. 5. Rodas. I. Rezende, Andrei Bavaresco. II. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Na Bíblia Sagrada, Salmo 116, versículo 12, o salmista diz: “Como posso retribuir ao Senhor toda a sua bondade para comigo?”. Com esta mensagem, externo em primeiríssimo lugar a minha gratidão ao Deus verdadeiro, que vive e reina em minha vida, pelas conquistas alcançadas até aqui.

Agradeço aos meus pais, José Bonifácio da Silva Filho e Vânia Lúcia Neves, por todo empenho e dedicação prestados em prol do meu desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço a todos os meus familiares e amigos que estiveram constantemente apoiando e incentivando esta caminhada.

Por contribuir de maneira fundamental para o desenvolvimento do trabalho e pesquisa, agradeço a Leandro Rocha Lopes, que de maneira exímia desenvolve, não apenas estudos, mas também pessoas.

Agradeço ao meu orientador Andrei Bavaresco Rezende, por aceitar o desafio de orientação deste trabalho e a todos os professores da Engenharia Mecânica pelas contribuições fornecidas ao longo do curso.

## RESUMO

Em veículos ferroviários as rodas são componentes inescusáveis no transporte em larga escala de minério, grãos, pessoas e cargas gerais. Devido ao cenário de risco associado e a necessidade de alta confiabilidade, este item é considerado ativo crítico, que na EFC é monitorado diariamente através dos equipamentos *Waysides*. Ao longo do tempo de operação, as rodas, podem apresentar diversos defeitos, dentre eles, a degradação de largura de friso que resulta do contato deslizante dessa região da roda com a face e o canto do boleto do trilho. O desgaste torna-se acelerado se houver desalinhamento transversal do rodeiro ou excesso de *hunting*, que caracteriza-se pelo movimento oscilatório lateral que surge da instabilidade dinâmica do truque em função da perda da conicidade da roda. Portanto, a avaliação dos efeitos do defeito friso fino são fundamentais para a garantia da segurança da operação ferroviária e para o entendimento dos custos associados à manutenção dos rodeiros. Para reduzir o *Life Cycle Coste* (LCC) das rodas e dar maior previsibilidade de manutenção, este estudo propôs-se a estabelecer os intervalos preditivos (curva P-F) e *Life Data Analysis* (LDA) com base na degradação de amostras de rodas usinadas por motivo de largura de friso. Delimitou-se o estudo nas locomotivas da frota GE Evolution para a determinação da manutenção a partir da função degradação obtida por regressão linear ao calcular-se o *Time To Fail* (TTF) até o limite de 21 mm determinado como falha. Obteve-se a função de confiabilidade e estipulou-se o novo limite preditivo de manutenção.

**Palavras-chaves:** Confiabilidade; Rodas; Locomotivas; Friso; Degradação.

## ABSTRACT

In railway vehicles, wheels are essential components for the large-scale transportation of ore, grains, people, and general cargo. Due to the associated risk scenario and the need for high reliability, this item is considered a critical asset, which in EFC is monitored daily through Wayside equipment. Over the operating time, the wheels may present various defects, among them, the degradation of flange width resulting from the sliding contact of this region of the wheel with the face and corner of the rail head. Wear becomes accelerated if there is transverse misalignment of the wheelset or an excess of hunting, which is characterized by the lateral oscillatory movement that arises from the dynamic instability of the truck due to the loss of the wheel conicity. Therefore, the evaluation of the effects of the thin flange defect is fundamental to guarantee the safety of railway operation and to understand the costs associated with wheel maintenance. To reduce the Life Cycle Cost (LCC) of the wheels and provide greater maintenance predictability, this study proposed to establish predictive intervals (P-F curve) and Life Data Analysis (LDA) based on the degradation of samples of wheels machined due to flange width. The study was delimited in the locomotives of the GE Evolution fleet for the determination of maintenance from the degradation function obtained by linear regression when calculating the Time To Fail (TTF) up to the limit of 21 mm determined as a failure. The reliability function was obtained, and the new predictive maintenance limit was stipulated.

**Keywords:** Reliability; Wheels; Locomotives; Flange; Degradation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplo de dados e imagens obtidas do WPM. ....	16
Figura 2. Gráfico de linha ajustada da locomotiva GE Evolution 211. ....	18
Figura 3. Evolução da degradação de largura de friso das 37 rodas tomadas como amostras. ....	19
Figura 4. Gráfico do modelo atual de Curva P-F utilizado na manutenção das rodas. ....	20
Figura 5. Histograma que evidencia a distribuição dos dados. ....	21
Figura 6. Boxplot da largura do friso evidenciando os outliers. ....	22
Figura 7. Gráfico com a proposta de modelo de desempenho das rodas sobre o tempo, em ciclos, de funcionamento. ....	23
Figura 8. Gráfico de probabilidade Weibull de 3 Parâmetros para o IC de 95%. ....	25
Figura 9. Gráfico de Confiabilidade x Tempo (ciclos). ....	26



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros de medição e precisão do WPM.....	16
Tabela 2. Estatística descritiva para o número de amostras, desvio padrão e o valor mínimo.	21
Tabela 3. Estatística descritiva para o primeiro quartil, mediana, terceiro quartil e máximo valor. ....	22
Tabela 4. Confiabilidade x Tempo (ciclos).....	25

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AAR	Association of American Railroads
AMV	Aparelho de Mudança de Via
EFC	Estrada de Ferro Carajás
FDP	Função Densidade Probabilidade
FDT	Failure Detection Threshold
GE	General Electric
IHHA	International Heavy Haul Association
LCC	Life Cycle Cost
LDA	Life Data Analysis
TTF	Time to Fail
WPM	Wheel Profile Monitor

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 DESENVOLVIMENTO.....	13
2.1 Degradação em Rodas .....	14
2.1.1. Degradação de largura de friso.....	15
2.2 <i>Wheel Profile Monitor</i> (WPM) .....	15
2.3 Análise Exploratória dos Dados.....	17
3 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE .....	23
4 CONCLUSÃO.....	26
5 REFERÊNCIAS .....	28

## 1 INTRODUÇÃO

Para operações ferroviárias eficazes e seguras existem muitos componentes necessários. Os trilhos, dormentes e lastro devem ser capazes de suportar e distribuir as cargas exercidas pelos veículos ferroviários, e os sistemas de sinalização de via devem estar operacionais. Contudo, um dos componentes mais importantes utilizados na indústria ferroviária é a roda. Assim, para garantir que a segurança e a eficiência possam ser maximizadas nas ferrovias, o monitoramento, manutenção e substituição de rodas são primordiais contribuintes para a redução de acidentes que estão relacionados à circulação de rodéis com largura de friso próximas ou abaixo dos limites determinados como críticos (EBERSOLE, 2019).

A necessidade por maior capacidade de transporte de carga e maior fluxo nas ferrovias é crescente, e de modo semelhante é requerido um aumento na confiabilidade do sistema visando a redução dos custos (ASPLUND et al., 2016). Na Vale, em suas ferrovias, as rodas representam um dos maiores custos, junto com trilhos e consumo de combustível (ALMEIDA, 2017).

No sistema ferroviário, os defeitos em rodas influenciam diretamente na segurança de operação dos ativos rodantes e em seus custos de manutenção, possuindo classificações e definições diversificadas (SCANDIAN et al., 2020).

Na dinâmica do contato deslizante roda-trilho, durante trechos tangentes ou em curvas ao longo da ferrovia, o friso, aliado à conicidade da roda, representa o modo de orientação principal do rodéio na linha férrea. As condições necessárias para manter conservado o equilíbrio das forças no contato do friso da roda com o boleto do trilho, objetivando evitar o descarrilamento por escalada da roda, foram estabelecidas na análise de Nadal (IWNICKI, 2006).

A progressiva redução de largura do friso é dada devido ao desgaste que ocorre principalmente como resultado do atrito no contato deslizante dessa região com a face e o canto do boleto do trilho. A degradação pode tornar-se mais elevada se houver desalinhamento do sistema de suspensão do veículo, levando as rodas de apenas um lado do truque à um desgaste acentuado, ou até mesmo as rodas em cantos diagonalmente opostos. Se não houver monitoramento constante da taxa de degradação de largura de friso, maior será a probabilidade de acidentes e descarrilamentos, pois o perfil da roda não estará adequado ao perfil do trilho (IWNICKI, 2006). Segundo a *Association of American Railroads* (AAR, 2012) e a *International Heavy Haul Association* (IHHA) (HARRIS et al., 2001), a degradação do material

do friso pode ocasionar defeito de friso fino, que para locomotivas, segundo a NBR-5565, possui dimensão mínima de trabalho de 21 mm, devendo ser retirado o rodeiro de serviço (NBR 5565 - 2022).

Assim, são realizadas manutenções regulares nas rodas, até que seja necessária sua substituição. Uma das práticas de manutenção mais utilizadas para lidar com o desgaste de roda, sobretudo o desgaste de largura de friso, é o reperfilamento do rodeiro, dado através da usinagem, garantindo uma condição de uma roda nova que, segundo a AAR, apresenta espessura de friso de 32,1 mm (EBERSOLE, 2019).

Este artigo objetiva apresentar a análise dos padrões da taxa de degradação de largura de friso das rodas de locomotivas da frota GE Evolution - ES58ACi (WABTEC CORPORATION, 2023) para o monitoramento preditivo a partir dos limites críticos e projeção da vida útil restante das rodas com taxas excessivamente altas de desgaste. Propõe-se a determinação de limite preditivo de manutenção e o *Life Data Analysis* (LDA) para a redução do *Life Cycle Cost* (LCC) dos rodeiros. Como parte do estudo, o sistema automatizado de inspeção de rodeiros, *Waysides*, instalado na Estrada de Ferro Carajás (EFC) foi utilizado. Os dados coletados do *Wheel Profile Monitor* (WPM), equipamento que faz parte do sensoriamento de campo, permitiu a utilização de técnicas estatísticas, como a regressão linear para prever a taxa de desgaste da largura de friso das rodas e a avaliação da confiabilidade do cenário atual de manutenção utilizando como base a curva P-F, permitindo estipular limites de detecção de falhas para três níveis.

A justificativa deste trabalho dá-se pela necessidade da determinação de limites críticos, no cenário de rodas de locomotivas GE Evolution, com base na análise de confiabilidade dos dados de degradação.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi publicado como artigo no Simpósio de Engenharia Ferroviária (SEF), que ocorreu entre os dias 17 e 18 de maio de 2023 na cidade de Campinas, no estado de São Paulo, Brasil. DOI: 10.17648/sef-2023-165742.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

Uma das estratégias preditivas utilizada na EFC para monitoramento das mais de 64000 rodas que circulam diariamente são os equipamentos *Waysides*. Trata-se de equipamentos instalados ao lado da via, montados nos trilhos ou entre dormentes, cuja função principal é o monitoramento das condições de saúde de todo material rodante. Um destes equipamentos é o *Wheel Profile Monitor* (WPM). Equipamento que determina através de algoritmos de visão

computacional a condição das rodas quanto a parâmetros de largura de friso, altura de friso, cava, bitola do rodeiro e diâmetro da roda. Dentre estes, o parâmetro de largura de friso é um dos mais críticos devido a possibilidade de descarrilamento em regiões de AMV (Aparelho de Mudança de Via) quando atinge os valores mínimos de operação.

Desta maneira, para estabelecer a tomada de decisão associada à manutenção com base na análise de confiabilidade de dados de desgastes, foram coletados os registros das rodas das locomotivas GE Evolution com usinagem recente por motivo de largura de friso através do WPM (Wheel Profile Monitor).

Percebeu-se que, na disposição gráfica da evolução de degradação das rodas coletadas como amostras, a função degradação obtida por regressão linear foi a que demonstrou melhor ajuste para o conjunto de dados. A partir da função degradação obtida por regressão linear, calculou-se o *Time to Fail* (TTF) até o limite de 21 mm, estipulado como dimensão mínima de trabalho pela NBR-5565 (NBR 5565 - 2022). Em sequência, realizou-se o cálculo de confiabilidade,  $R(t)$ , a partir da curva de sobrevivência para traçar os limites críticos de manutenção das rodas. E determinou-se, através do gráfico *boxplot*, a partir da média, a proposta de modelo de limite preditivo para o monitoramento de rodas das locomotivas GE Evolution.

## 2.1 Degradação em Rodas

A degradação das rodas vigora com um dos problemas fundamentais enfrentados pela indústria ferroviária. Esse fenômeno é decorrente do resultado do atrito entre a roda e o trilho durante a operação dos ativos. Ademais, as rodas se desgastam em função das forças de contato e de deslizamento associadas ao movimento longitudinal e lateral do rodeiro. Por consequência, a degradação tende a ocorrer em dois locais distintos: no friso e na bandagem das rodas. A taxa de desgaste nessas regiões depende do projeto do veículo ferroviário, bem como do perfil de serviço da roda, do perfil da via, do estado das superfícies de contato e das propriedades dos materiais que compõem rodas e trilhos. À medida que, com o tempo de serviço do rodeiro, há uma elevação na degradação do perfil de roda, reduzindo a largura do friso e, consequentemente, mudando as características dinâmicas dos veículos. Este cenário pode levar ao aumento de cargas aplicadas e desgaste excessivo, podendo resultar em acidentes e descarrilamentos (EBERSOLE, 2019).

Substancialmente, o ciclo de vida de uma roda será regido pelo desgaste, sendo este estendido com a prática da manutenção por usinagem que confere características de condição

de novo por meio do reperfilamento do rodeiro. Mas esse processo pode afetar negativamente as características físicas e propriedades metalúrgicas da roda, tornando importante a prática de analisar e prever a degradação do perfil deste ativo. Isso permitirá uma melhor tomada de decisão na estratégia de manutenção (EBERSOLE, 2019).

### **2.1.1. Degradação de largura de friso**

Durante a operação de uma composição ferroviária, existe uma redução progressiva da largura do friso da roda. Essa redução é dada pelo contato deslizante roda-trilho. Mas, além disso, pode ocorrer em função do desalinhamento transversal do rodeiro (*tracking position*) ou do excesso de *hunting*, caracterizado pelo movimento oscilatório lateral, que surge da instabilidade dinâmica do truque (SCANDIAN et al., 2020).

De modo particular, o friso degradado pode resultar em fratura total desta região, ou promover o descarrilamento. Assim, o desgaste de friso é o considerado o defeito de roda mais frequente que resulta em acidentes, segundo dados da IHHA (HARRIS et al., 2001).

Portanto, é crucial que o comportamento e os padrões de degradação de largura de friso sejam monitorados e analisados para garantir que os limites de manutenção e segurança não sejam excedidos.

## **2.2 Wheel Profile Monitor (WPM)**

Para o levantamento de dados de largura de friso das rodas das locomotivas da frota GE Evolution, utilizou-se o sistema do equipamento WPM (Wheel Profile Monitor) que a Vale dispõe em sua ferrovia. Localizado no Km 16+880 da EFC, o WPM (Wheel Profile Monitor) é composto por sensores de roda, flashes e câmeras de alta precisão. Utiliza algoritmos de visão computacional para determinar os parâmetros de roda apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de medição e precisão do WPM.

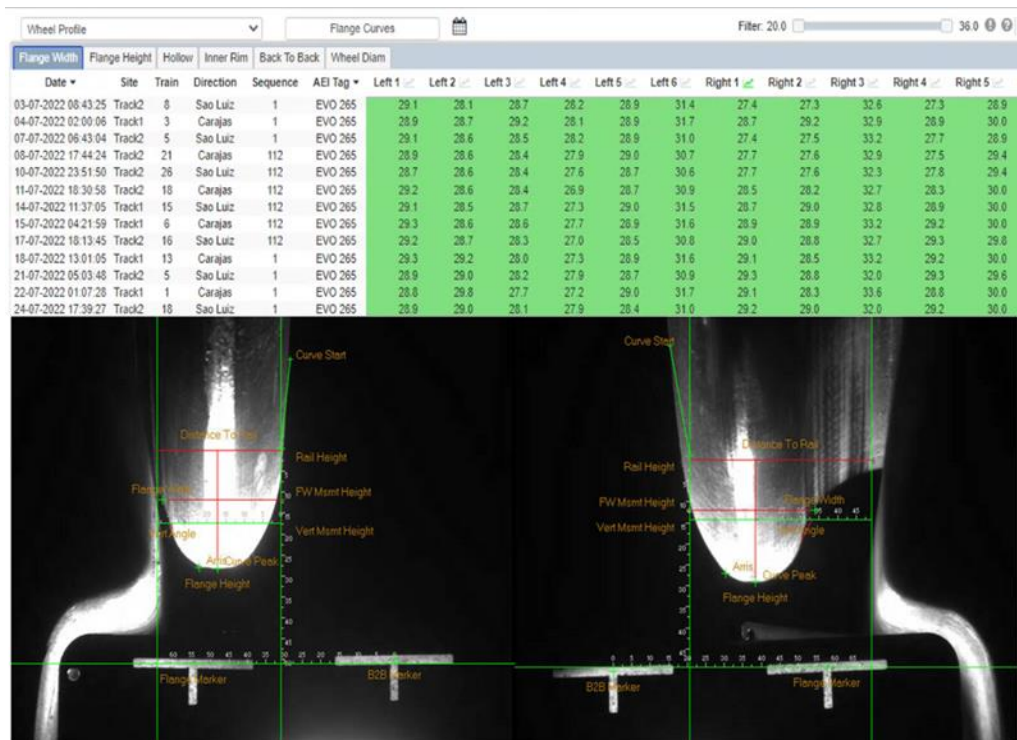
Parâmetros Medidos	Precisão
Cava ( <i>Hollow</i> )	$\pm 1,0 \text{ mm}$
Bandagem ( <i>Rim</i> )	$\pm 1,5 \text{ mm}$
Largura de Friso ( <i>Flange Width</i> )	$\pm 1,0 \text{ mm}$
Altura de Friso ( <i>Flange Height</i> )	$\pm 1,0 \text{ mm}$
Bitola do Rodeiro ( <i>Back-to-back</i> )	$\pm 2,0 \text{ mm}$
Diâmetro de roda ( <i>Wheel Diameter</i> )	$\pm 3,0 \text{ mm}$

Fonte: Autor, 2023

As condições de via permanente como o nivelamento, escamação do trilho e balanço de via, podem ocasionar oscilações ou perdas nas medições do WPM (Wheel Profile Monitor). Interferências climáticas geram, de igual modo, alterações nas medições quando há queima de componentes por descargas atmosféricas, embaçamento de câmeras e flashes, e acúmulo de minério de ferro nos equipamentos.

A Figura 1 ilustra um exemplo das medições de largura de friso, para cada roda de uma locomotiva, realizadas a partir do modelo de visão computacional do WPM (Wheel Profile Monitor), bem como a definição dos parâmetros da roda a partir das imagens obtidas.

Figura 1. Exemplo de dados e imagens obtidas do WPM.



Fonte: Autor, 2023



### 2.3 Análise Exploratória dos Dados

Na Vale, a frota de locomotivas ES58ACi da série GE Evolution, possui 98 máquinas. A partir do sistema WPM (Wheel Profile Monitor) foram coletados os dados dos registros de passagens das locomotivas no *Waysides* entre o mês de janeiro de 2022 até janeiro de 2023 na EFC. Buscou-se identificar as rodas com usinagem recente por motivo de diminuição na largura de friso. Com isso, um total de 44 rodas encontraram-se dentro deste critério, em que para cada intervenção de reperfilamento retornaram para a EFC em condições de novas.

Observou-se que a função de degradação das rodas das locomotivas GE Evolution seguem uma regressão linear (Equação 1). Esse tipo de comportamento foi identificado como recorrente no primeiro e quarto rodeiro (R1 e R4), sendo justificado por desalinhamento do sistema de suspensão das máquinas, causando deslocamento transversal do rodeiro, conforme indica a literatura (SCANDIAN et al., 2020).

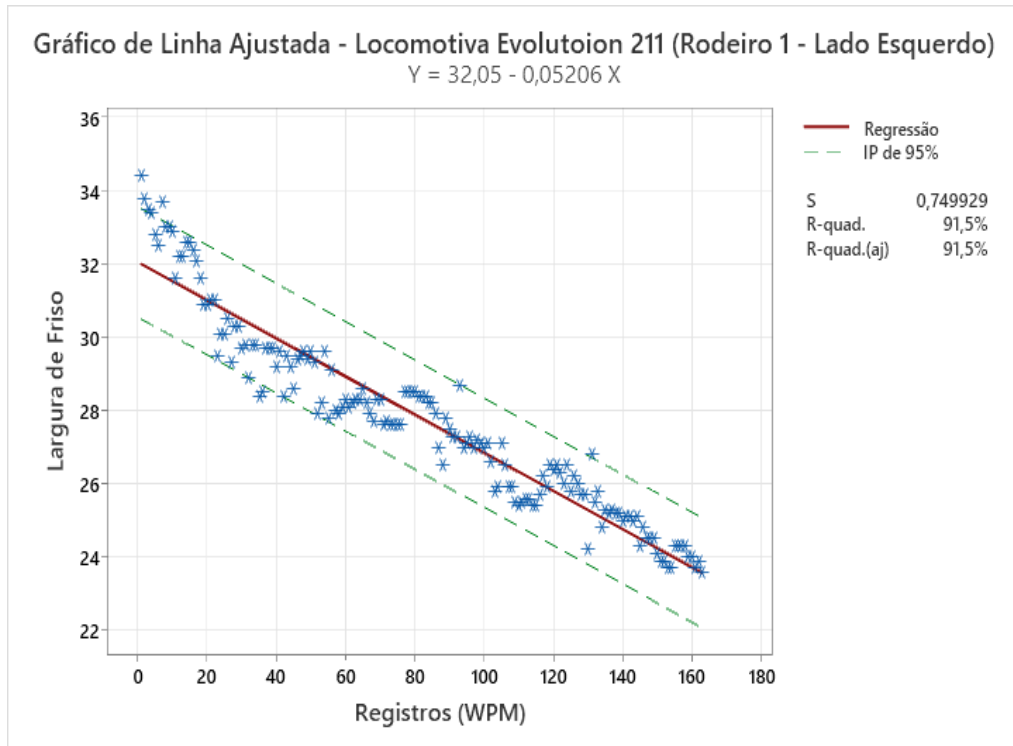
$$y = b - ax \quad (1)$$

Sendo:

- $y$ : projeção do valor mínimo de largura de friso;
- $b$ : condição inicial da largura de friso;
- $a$ : taxa de desgaste de largura de friso;
- $x$ : número de registros do WPM.

A partir dos dados coletados, traçou-se a função de regressão linear para cada uma das rodas, obtendo-se o comportamento de degradação e o ajuste para cada reta. Para gerar maior qualidade ao estudo, utilizou-se rodas com valor de ajuste de  $R\text{-quadrado} \geq 80\%$ , totalizando 37. A Figura 2 exemplifica a função de regressão linear traçada para a degradação de largura de friso, com base em cada registro do WPM (Wheel Profile Monitor), para a roda esquerda do primeiro rodeiro da locomotiva GE Evolution 211, com o intervalo de predição de 95%.

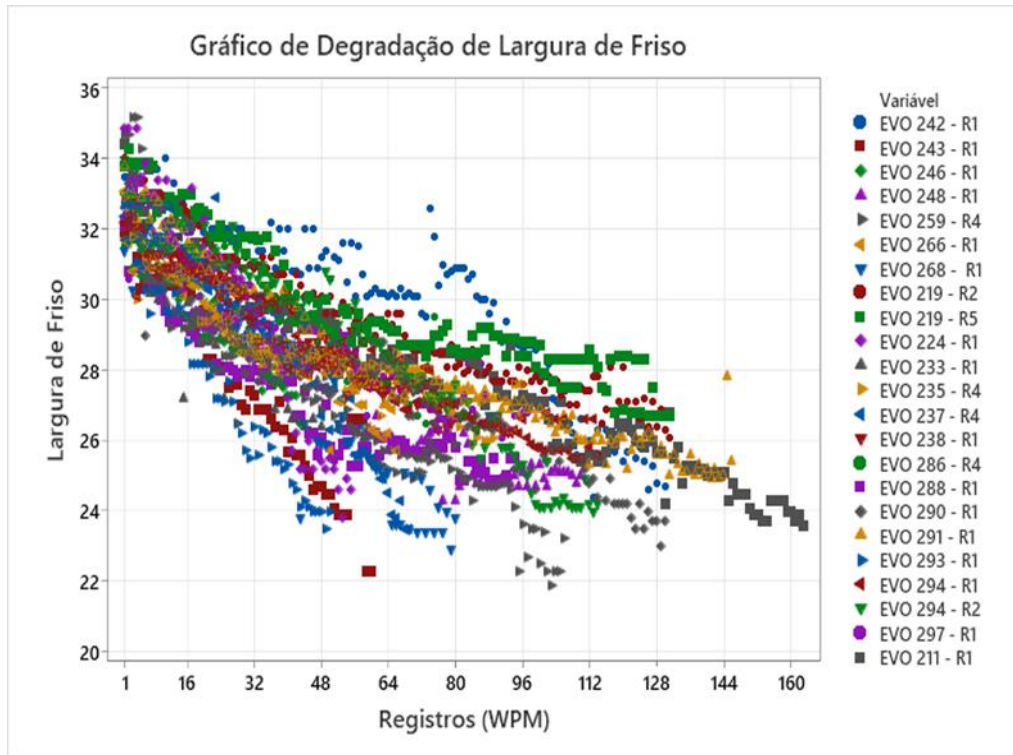
Figura 2. Gráfico de linha ajustada da locomotiva GE Evolution 211.



Fonte: Autor, 2023

A Figura 3 apresenta a evolução da degradação para todas as rodas tomadas como amostras para o presente estudo. Cada roda apresenta um desgaste de friso distinto, sendo alguns mais acelerados, resultando em poucos registros, e outros com menor degradação, originando um maior número de registros de passagens no WPM (Wheel Profile Monitor).

Figura 3. Evolução da degradação de largura de friso das 37 rodas tomadas como amostras.



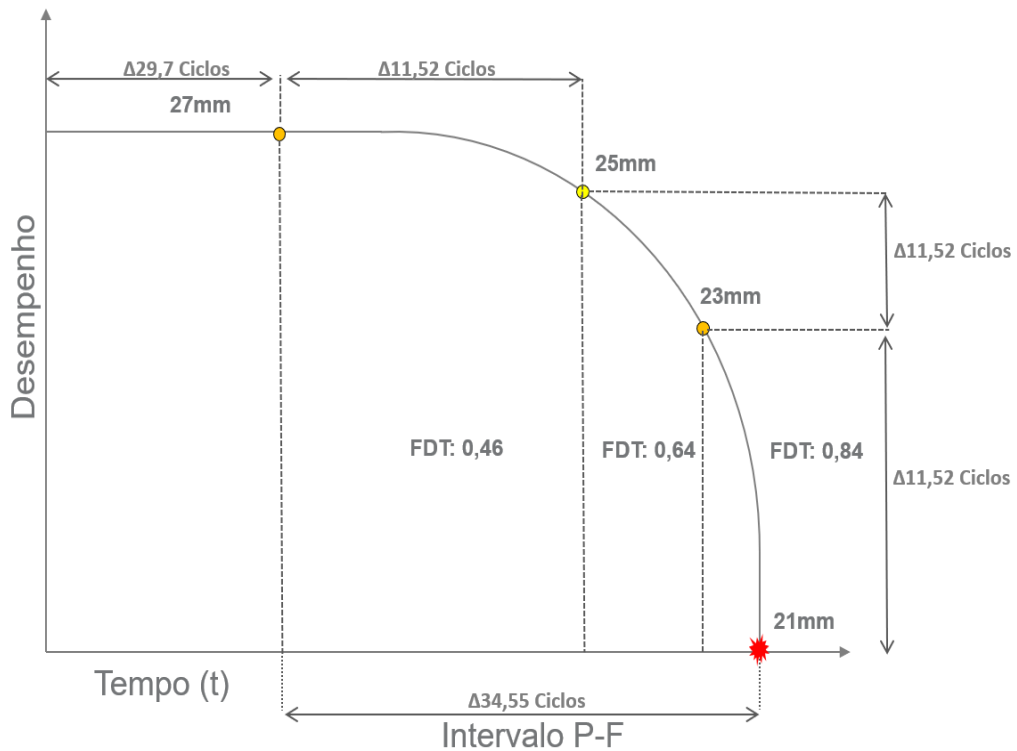
Fonte: Autor, 2023

Cada roda possui uma equação característica, e para a determinação da função de degradação global utilizou-se a média dos parâmetros  $a$  e  $b$  de cada função de regressão individual. A função global é descrita pela Equação 2.

$$y = 32,15605 - 0,08683x \quad (2)$$

A partir da função de regressão global, fez-se a extrapolação das medições de degradação para o nível de falha funcional definido para  $y = 21 \text{ mm}$ . Os valores de  $x$  calculados foram utilizados como pontos de registros até a falha na análise de dados de vida subsequente. Calculou-se a projeção dos limites preditivos utilizados no modelo atual de monitoramento para todo o conjunto, partindo da falha funcional de  $y = 21 \text{ mm}$ , e para os pontos de falhas potenciais com valores de  $y = 23 \text{ mm}$ ,  $y = 25 \text{ mm}$  e  $y = 27 \text{ mm}$ , determinados na *Curva P-F* da Figura 4. Os pontos de falhas potenciais para o modelo atual foram definidos com base no conhecimento adquirido por meio da experiência prática dos responsáveis técnicos da manutenção dos rodoiros, não existindo um estudo de engenharia como balizador a partir da análise dos dados.

Figura 4. Gráfico do modelo atual de Curva P-F utilizado na manutenção das rodas.



Fonte: Autor, 2023

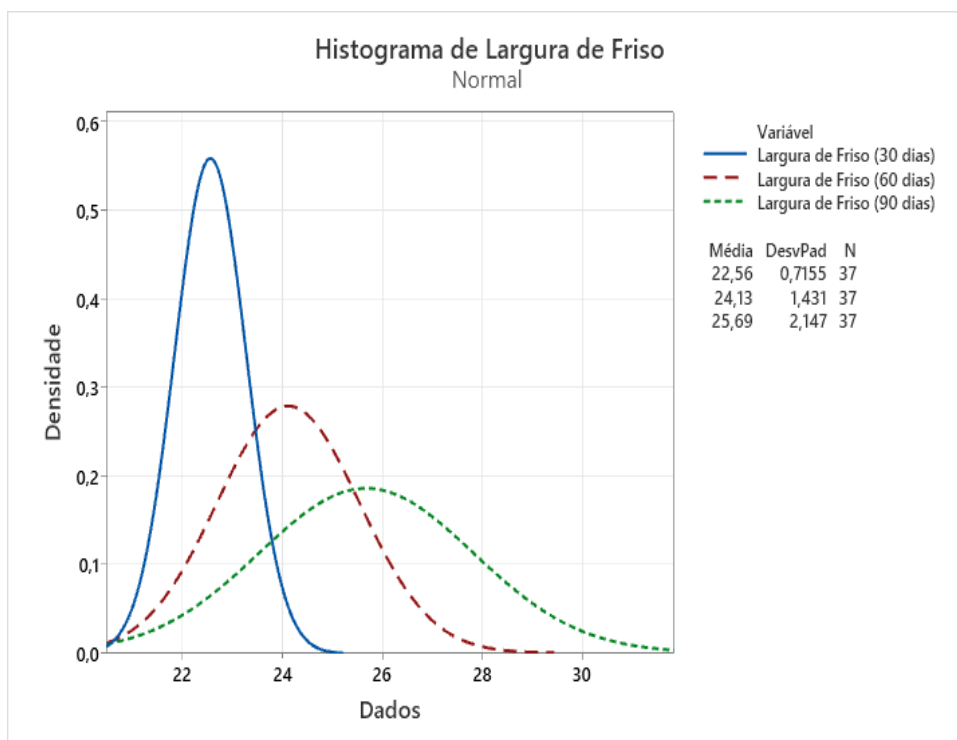
Cada ciclo é determinado por dois registros no WPM, configurando a passagem de ida e volta da locomotiva. Desta forma, considerando-se o início, a partir do primeiro registro, do monitoramento de uma roda recém usinada, em condições de nova com aproximadamente 32 mm de largura de friso, calculou-se os ciclos subsequentes até cada ponto de falha estabelecido no modelo atual de monitoramento para a manutenção. Ressalta-se que as primeiras medições dos registros no WPM para as rodas em condições de novas podem sofrer alterações devido às influências de condições de via e interferências climáticas.

Determinou-se o parâmetro *Failure Detection Threshold* (FDT) através da relação entre as falhas potenciais e a funcional (Equação 3), resultando em um número entre 0 e 1 que indica a porcentagem da vida útil de um item que deve transcorrer antes que uma falha próxima possa ser detectada (MOUBRAY, 1997).

$$FDT = P/F \quad (3)$$

Posteriormente, a partir dos intervalos P-F de detecção de 30, 60 e 90 dias obtidos, calculou-se a projeção dos pontos de falha potencial para o conjunto das amostras. A representação gráfica com base nas estatísticas descritivas foi plotada, a partir do software Minitab. O histograma presente na Figura 5 evidencia os picos e ajuste da dispersão da distribuição dos dados, assim como a presença de *outliers* (LOPES e ARRUDA, 2021).

Figura 5. Histograma que evidencia a distribuição dos dados.



Fonte: Autor, 2023

As Tabelas 2 e 3 apresentam a descrição detalhada para maior entendimento do histograma apresentado na Figura 5.

Tabela 2. Estatística descritiva para o número de amostras, desvio padrão e o valor mínimo.

Variável	N	Média	Desvio Padrão	Mínimo
Largura de Friso (30 dias)	37	22,563	0,716	21,848
Largura de Friso (60 dias)	37	24,126	1,431	22,696
Largura de Friso (90 dias)	37	25,689	2,147	23,543

Fonte: Autor, 2023

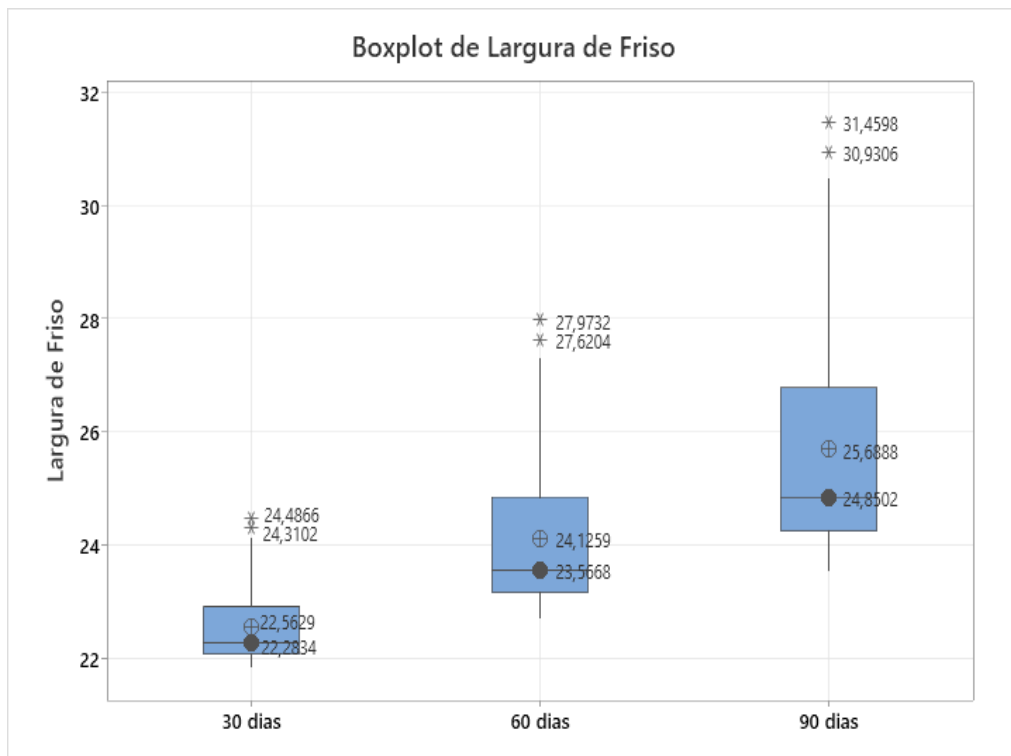
Tabela 3. Estatística descritiva para o primeiro quartil, mediana, terceiro quartil e máximo valor.

Variável	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Largura de Friso (30 dias)	22,084	22,283	22,928	24,487
Largura de Friso (60 dias)	23,167	23,567	24,856	27,973
Largura de Friso (90 dias)	24,251	24,850	26,783	31,460

Fonte: Autor, 2023

O gráfico *boxplot* presente na Figura 6 também evidencia a presença de outliers entre os dados e foi o direcionador da definição do limite preditivo de detecção de falhas para três níveis de criticidade através dos resultados médios obtidos para 30, 60 e 90 dias. Considerou-se relevante a utilização dos outliers por serem parte da descrição do comportamento do processo. A EFC possui um acompanhamento sistemático das condições das rodas utilizando os *Waysides*, por meio de uma supervisão de monitoramento 24h que atua nas identificações dos desvios operacionais e degradações aceleradas.

Figura 6. Boxplot da largura do friso evidenciando os outliers.



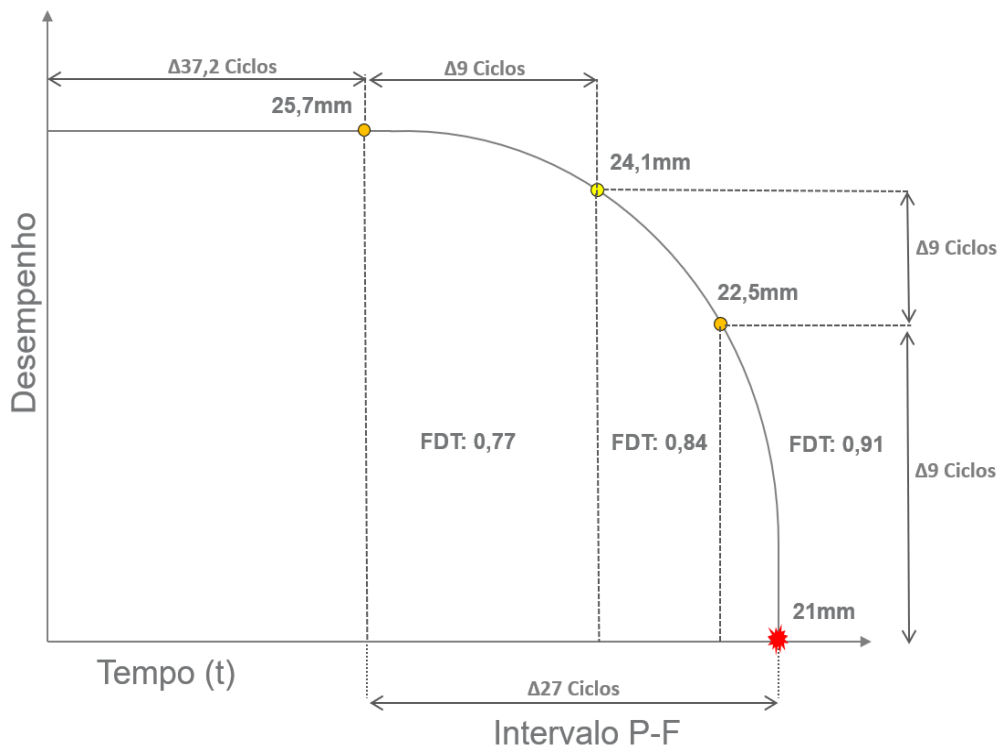
Fonte: Autor, 2023

Portanto, a proposta de modelo dos limites preditivos de monitoramento, para rodas de locomotivas GE Evolution, determinados com base na média estão presentes na *Curva P-F* exibida na Figura 7. Configurando como pontos de falha potencial até a falha funcional de 21 mm, as seguintes criticidades:

1.  $C2 = 25,7 \text{ mm}$ ;
2.  $C1 = 24,1 \text{ mm}$ ;
3.  $C0 = 22,5 \text{ mm}$ ;

Em sequência, calcularam-se os novos valores do FDT para a identificação da porcentagem de vida útil das rodas na nova proposta de predição dos limites médios de falhas potenciais.

Figura 7. Gráfico com a proposta de modelo de desempenho das rodas sobre o tempo, em ciclos, de funcionamento.



Fonte: Autor, 2023

### 3 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A partir da equação de regressão da degradação individual de cada roda foi possível realizar uma extrapolação até o limite entendido como falha funcional (21 mm) e a determinação dos TTF's para o desenvolvimento da curva de sobrevivência.

A análise de dados de vida das amostras de rodas foi realizada através do *software Orion*. Por ser uma análise de degradação, utilizou-se como modelo paramétrico o Weibull a 3 parâmetros. Para a avaliação do modelo, utilizou-se da função de verossimilhança como estimação paramétrica dos valores e adotou-se o intervalo de confiança bilateral de 95%.

Os valores dos parâmetros foram  $\beta = 3,39629215, \eta = 82,04624385$  e  $\gamma = 0,41285764$ .

A Função Densidade Probabilidade (FDP) é dada pela (Equação 4) (LOPES e ARRUDA, 2021):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (4)$$

Em que,

$$f(t) \geq 0, t \geq 0 \text{ ou } \gamma, \beta > 0, \eta > 0, -\infty < \gamma < +\infty$$

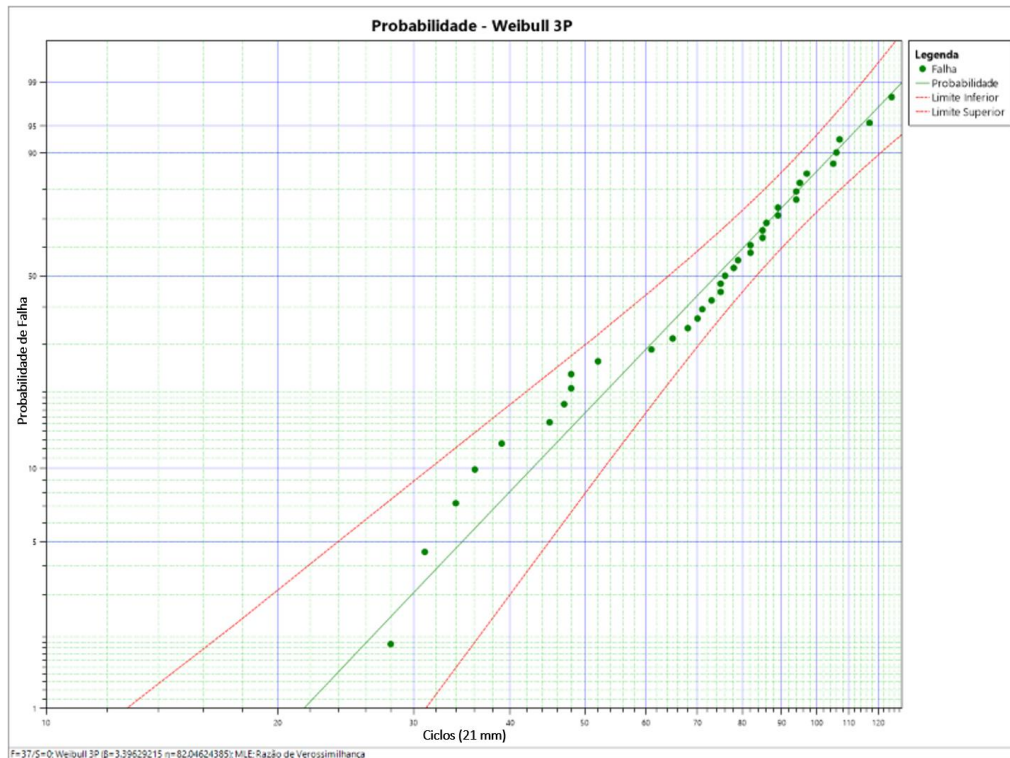
Sendo:

- $\beta$ : o parâmetro de forma conhecido também como inclinação da distribuição Weibull:
  - Determina a forma da curva e as características das falhas do sistema.
- $\eta$ : o parâmetro de escala:
  - É o valor no tempo pelo qual 63,2% de todas as falhas terão ocorrido. Nesse sentido,  $\eta$  é apenas um ponto na escala de tempo, proporcionando alguma medida padrão da distribuição dos tempos ao fracasso.
- $\gamma$ : o parâmetro de posição:
  - É algum valor do tempo pelo qual na distribuição completa de tempos a falha é deslocada, ou seja, intervalo de tempo em que o equipamento não apresenta falhas.

O comportamento retrata uma taxa de falha crescente com desvio padrão menor que a média, caracterizando um comportamento por envelhecimento (Figura 8). Isso ocorre devido à realização da análise a partir dos dados de degradação.



Figura 8. Gráfico de probabilidade Weibull de 3 Parâmetros para o IC de 95%.



Autor, 2023

Conforme a Tabela 4, para um  $R(t)$  igual a 90%, tem-se 31,47 ciclos considerando o intervalo de confiança inferior. Isso equivale a 26,69 mm de largura de friso, considerando a média dos desgastes.

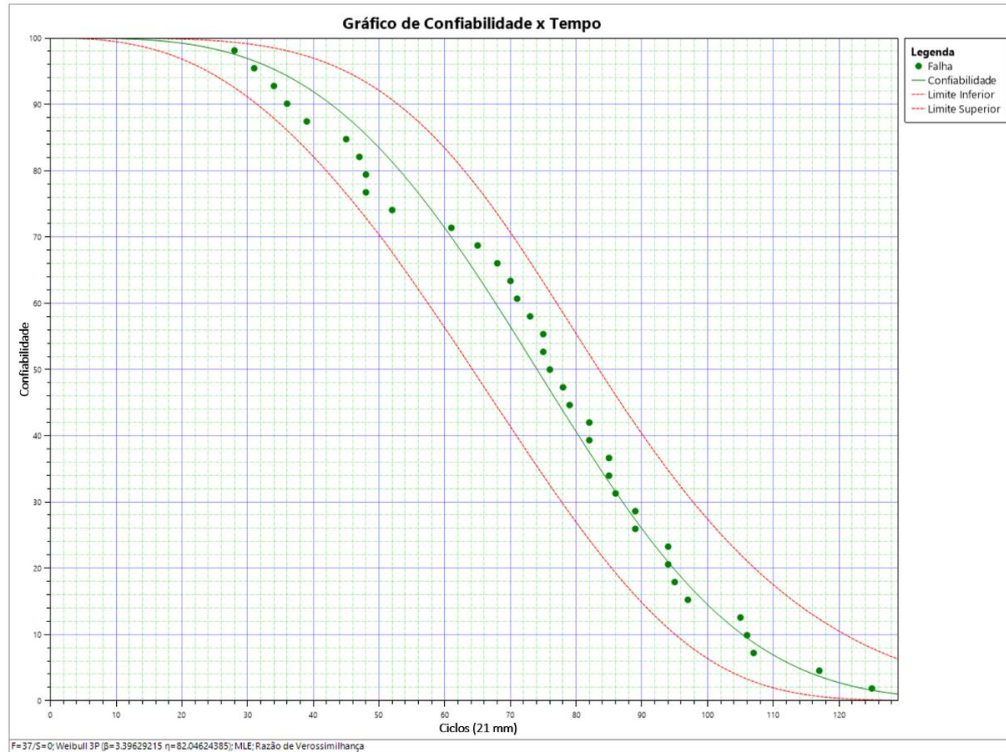
Tabela 4. Confiabilidade x Tempo (ciclos).

Confiabilidade (%)	Tempo LI	Tempo (ciclos)	Tempo LS
99.9	05,25	11,15	18,58
99	12,72	21,59	31,08
95	23,90	34,63	44,93
90	31,47	42,71	52,89
80	41,97	53,17	62,96
70	50,27	60,98	70,47
50	64,23	74,07	83,47
25	81,45	90,74	102,15
15	89,82	99,48	113,16
1	114,51	129,04	155,43

Fonte: Autor, 2023

Os dados do comportamento da confiabilidade no tempo descritos na Tabela 4 são representados através do gráfico que consta na Figura 9.

Figura 9. Gráfico de Confiabilidade x Tempo (ciclos).



Fonte: Autor, 2023

## 4 CONCLUSÃO

O monitoramento das condições de largura de friso, ao longo das operações ferroviárias, é fundamental para o desenvolvimento de um limite preditivo de manutenção de rodas, baseando-se no conhecimento do comportamento individual de degradação a partir da função de regressão linear para cada uma.

Para a realização do estudo, utilizou-se os dados disponíveis de passagens no sistema informatizado do WPM para as locomotivas da frota GE Evolution. Coletou-se os registros das rodas com usinagem recente por motivo de redução da largura de friso e em cada intervenção considerou-se a usinagem perfeita (o ativo retornando em condição de novo), totalizando um conjunto de dados de 44 rodas. Percebeu-se que a função degradação para cada roda é descrita por uma regressão linear. Para cada uma traçou-se a função de regressão linear e o ajuste para cada reta, e baseando-se no valor de  $R - quad. \geq 80\%$ , apenas 37 rodas foram utilizadas no

estudo. Determinou-se a função de degradação global, utilizando-se a média dos parâmetros  $a$  e  $b$  de cada função de regressão individual.

Para a determinação do tempo até a falha (TTF), utilizou-se a equação de cada roda e extrapolou-se ao valor limite da falha considerada funcional. Ao determinar-se os TTF's, calculou-se a confiabilidade para os dados disponíveis. É importante salientar que existem outras características que podem ser levadas em consideração caso deseje-se maior precisão nos resultados obtidos, como a análise do comportamento dinâmico do truque. Contudo, tal complexidade exige avaliação por simulações computacionais e não foram o foco deste trabalho. Para a finalidade do estudo, os dados analisados corresponderam aos resultados esperados para o comportamento de função regressão linear e para o ajuste do conjunto.

Concluiu-se que é fundamental que o desgaste da roda seja monitorado para a garantia da segurança e estabelecimento dos limites considerados críticos para o rodeiro, predizendo a porcentagem da vida útil antes que uma falha funcional possa ser materializada. Por fim, entende-se que o limite preditivo de manutenção proposto é eficaz para a identificação do início da falha potencial da roda em função da sua degradação, gerando mais dois alertas potenciais até que chegue à falha funcional de  $21\text{ mm}$  determinada para as locomotivas.

Estudos estão sendo realizados utilizando-se de aprendizagem de máquina para acompanhamento individualizado de degradação de cada roda, porém, ainda em estágio inicial de modelagem.

## 5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Leandro Prates Ferreira de. **Estudo do desgaste por deslizamento de pares metálicos empregados no contato roda-trilho**. 2017. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

ASPLUND, Matthias *et al* **A study of railway wheel profile parameters used as indicators of an increased risk of wheel defects**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, v. 230, n. 2, p. 323-334, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5565: Rodeiro ferroviário – Classificação, montagem e manutenção**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

EBERSOLE, Kyle. **Analysis of wheel wear and forecasting of wheel life for transit rail operation**. 2019. A thesis submitted to the Faculty of the University of Delaware in partial fulfillment of the requirements for degree of Master of Civil Engineering.

HARRIS, W. J. *et al* **Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface issues**. Virginia Beach, International Heavy Haul Association Publ, 2001.

IWNICKI, Simon. Handbook of railway vehicle dynamics. CRC press, 2006.

LOPES, Leandro Rocha; ARRUDA, Guilherme Bandeira de. **Implantação de manutenção preditiva para aumento de confiabilidade de equipamentos hotbox/hotwheel**. 2021. Congresso ABRISCO, 2021.

MANUAL OF STANDARDS AND RECOMMENDED PRACTICES: SECTION G, PART II – Wheel and Axle Manual. **Association of American Railroads**. Washington, 2012.

MOUBRAY, John. **Reliability-Centered Maintenance**. Industrial Press, Inc., New York City, NY, 1997.

SCANDIAN, Cherlio *et al* **Caderno Técnico: Defeitos em Rodas Ferroviárias**. 2020. Cátedra de Pesquisa Roda-Trilho: Projeto Defeitos em Rodas Ferroviárias – Universidade Federal do Espírito Santo.

WABTEC CORPORATION. **ES58ACi Locomotive: Delivering maximum haulage and unit-replacement ratio for heavy-haul freight. 2023**.  
<https://www.wabteccorp.com/locomotive/heavy-haul-locomotives/es58aci-locomotive>.

Acesso em: 23 mar. 2023.