

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

JOÃO PAULO CARLOS FRACALOSSI

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE
RODAS FERROVIÁRIAS DO FABRICANTE A E DO FABRICANTE B
EM VAGÕES DE MINÉRIO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

VITÓRIA - ES

2017

JOÃO PAULO CARLOS FRACALOSSI

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE
RODAS FERROVIÁRIAS DO FABRICANTE A E DO FABRICANTE B
EM VAGÕES DE MINÉRIO**

Monografia de conclusão de curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade, da Diretoria de Pesquisa e Pós-graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gerência de Manutenção.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues

VITÓRIA - ES

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para realizar mais essa conquista.

A universidade por ter dado a oportunidade de fazer parte do curso, aos meus colegas de sala, aos professores, o coordenador do curso Prof. Dr. Emerson Rigoni e o meu orientador Prof. Dr. Marcelo Rodrigues.

Gostaria de deixar registrado o meu agradecimento á minha esposa Poliana Tureta por ter me dado força e sempre me motivado para conclusão desse curso e não podia deixar de agradecer aos meus pais João Domingos Fracalossi e Célia Regina de Carlos Fracalossi por tudo que fizeram por mim.

Agradeço também ao meu colega de sala e profissão Rafael Gripp que me ajudou e me apoiou na conclusão desse curso e a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

RESUMO

FRACALOSSI, João Paulo Carlos, **ANÁLISE COMPARATIVA DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE RODAS FERROVIÁRIAS DO FABRICANTE A E DO FABRICANTE B VAGÕES DE MINÉRIO**. 2017. 60pg. Monografia da Especialização em Engenharia de Confiabilidade - Diretoria de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR 2017.

Diante do cenário em que as indústrias se encontram onde o foco na redução de custo se torna uma questão de sobrevivência no mercado. Esta pesquisa apresenta uma análise do custo do ciclo de vida entre dois tipos de fabricantes de rodas (Fabricante A e Fabricante B). No trabalho foi apresentada uma visão geral sobre rodas, LCC, distribuição de probabilidades para análise de vida média das rodas. Para análise da vida média das rodas foi utilizado a ferramenta de análise de degradação do software WEIBULL ++ e para análise do custo do ciclo de vida foi realizada uma análise simples comparando a relação entre o custo de aquisição da roda e vida média entre os dois tipos de fabricante. Outra avaliação do custo do ciclo de vida foi realizada utilizando os custos de aquisição e os custos entre os tempos de usinagens de cada tipo de roda. O fabricante A apresentou uma vida média superior de 38,89% em relação ao fabricante B.

Palavras-chave: Roda. LCC. Distribuição de probabilidade. Vida média. Degradação.

ABSTRACT

FRACALOSSI, João Paulo Carlos. **COMPARATIVE ANALYSIS OF THE COST OF THE LIFE CYCLE OF RAILWAY WHEELS FROM MANUFACTURER A AND MANUFACTURER B MINING WAGONS.** 2017. 60 pg. Trabalho de Conclusão de Curso de Monografia (Especialização em [Engenharia de Confiabilidade]) Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Faced with the scenario where the industries are where the focus on cost reduction becomes a matter of survival in the market. This research presents a life cycle cost analysis between two types of wheel manufacturers (Manufacturer A and Manufacturer B). In the paper we present an overview on wheels, LCC, distribution of probabilities for analysis of the average life of the wheels. For the analysis of the average life of the wheels, the WEIBULL ++ software degradation analysis tool was used and for the life cycle cost analysis a simple analysis was performed comparing the relation between the wheel purchase cost and average life between the two types of manufacturer. Another life cycle cost assessment was performed using the acquisition costs and costs between the machining times of each wheel type. Manufacturer A had an average life of over 38,89% over manufacturer B.

Keywords: Wheel. LCC. Probability distribution. Average life. Degradation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de uma roda ferroviária.....	10
Figura 2 – Estrada de Ferro Vitória Minas.....	13
Figura 3 – Vagão GDE	13
Figura 4 - Rodeiro	14
Figura 5 - Conjunto de Choque Tração	14
Figura 6 - Truque.....	15
Figura 7 - Sistema de freio	15
Figura 8 - Caixa ou superestrutura	16
Figura 9 – Fluxograma das Etapas de Pesquisas	19
Figura 10 – Rodeiro Ferroviário.....	20
Figura 11 – Gabarito Utilizado para Medida de Roda	23
Figura 12 – Roda Quebrada.....	23
Figura 13 – Roda com Calo.....	24
Figura 14 – Roda com Bandagem Baixa.....	24
Figura 15 – Roda com Descascament	25
Figura 16 – Roda Caldeada	25
Figura 17 – Roda com Sulco.....	25
Figura 18 – Roda com Cava.....	26
Figura 19 – Fluxograma do Processo de Fabricação de Roda Forjada	29
Figura 20 – Fluxograma do Processo de Fabricação de Roda Fundida	29
Figura 21 – Custos Durante o Ciclo de Vida de um Equipamento	33
Figura 22 – Distribuição de Vida mais Utilizados	36
Figura 23 – Dados Completos e Censurados.....	37
Figura 24 – Modelo de Degradação das Rodas Fundidas e Forjadas	51
Figura 25 – Teste de Aderência Roda Forjada.....	52
Figura 26 – Teste de Aderência Roda Fundida.....	52
Figura 27 – Calculo Vida Média Roda Forjada.....	57
Figura 28 – Calculo de Vida Média Roda Fundida	57
Figura 29 – Figura Esquemática do BOXPLOT.....	60

GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução do Preço do Minério	12
Gráfico 2 – Pareto Custos de Manutenção.....	16
Gráfico 3 – Pareto Custos de Materiais.....	17
Gráfico 4 – Consumo e Projeção de Rodas Novas	26
Gráfico 5 – Curva da Banheira	38
Gráfico 6 – Distribuição de WEIBULL.....	40
Gráfico 7 – Distribuição Exponencial.....	41
Gráfico 8 – Distribuição Lognormal	41
Gráfico 9 – Distribuição Normal.....	42
Gráfico 10 – Distribuição WEIBULL Mista	43
Gráfico 11 – Distribuição GAMA Generalizada	44
Gráfico 12 – Curva de Degradação	45
Gráfico 13 – Rodas Usinadas por Fabricante.....	49
Gráfico 14 – Rodas por Ano de Fabricação para Análise de Degradação	50
Gráfico 15 – Curva de Degradação para Roda Forjada	53
Gráfico 16 – Curva de Degradação para Roda Fundida	54
Gráfico 17 – Curva de Confiabilidade para Roda Forjada	54
Gráfico 18 – Curva de Confiabilidade para Roda Fundida	55
Gráfico 19 – <i>PDF</i> Roda Forjada	55
Gráfico 20 – <i>PDF</i> Roda Fundida	56
Gráfico 21 – Vida Média Roda Forjada e Fundida	58
Gráfico 22 – Limite Inferior Roda Forjada e Limite Superior Roda Fundida	58
Gráfico 23 – Boxplot do Tempo entre Usinagem da Roda Forjada e Fundida	61
Gráfico 24 – Custo Acumulado do Ciclo de Vida da Roda	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de Rodas Ferroviárias Conforme Aplicação	21
Tabela 2 – Classificação de Rodas Ferroviárias para Locomotivas e Vagões, Conforme Aplicação e Composição Química	21
Tabela 3 – Composição Química, em Peso, Roda Ferroviária por Classe	22
Tabela 4 – Passos para Elaboração da Análise do Custo do Ciclo de Vida.....	33
Tabela 5 – Comparação entre Vida Média, Preço de Compra e a Relação Custo x Benefício de 3 Fornecedores de Roda	34
Tabela 6 – Parâmetros para Análises das Empresas Fornecedoras de Rodas	35
Tabela 7 – Planilhas dos Tornos de Rodeiros.....	47
Tabela 8 – Dados Validados para Análise de Degradação	48
Tabela 9 – Valores Críticos Associados ao Grau de Confiança na Amostra	49
Tabela 10 – Parâmetros das Rodas Forjadas e Fundida	53
Tabela 11 – Vida em Anos das Rodas Forjadas e Fundidas.....	56
Tabela 12 – Comparação entre a Vida Média e Preço de Compra	59
Tabela 13 – Relação entre o Tempo de Usinagem e Quantidade de Usinagens.....	60
Tabela 14 – Tempo Médio entre Usinagens.....	61
Tabela 15 – Sub Total Atualizado para os Custos de uma Roda Forjada.....	62
Tabela 16 – Sub Total Atualizado para os Custos de uma Roda Fundida	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 TEMA	10
1.1.1 Delimitação do Tema	11
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	11
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4 JUSTIFICATIVA	18
1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA APLICADA	18
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 RODA FERROVIÁRIAS	20
2.1 APLICAÇÃO DE RODA NAS FERROVIAS	20
2.1.1 Manutenção	22
2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	27
2.3 DESGASTE	30
2.3.1 Falhas	31
3 LCC	32
3.1 VISÃO GERAL DO LCC	32
3.2 VANTAGENS DO LCC	34
3.3 ANÁLISE DO LCC	34
3.4 LDA (LIFE DATA ANALYSIS)	35
3.5 TIPOS DE FALHAS	38
3.6 TIPOS DE DISTRIBUIÇÕES	39
3.7 ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO	44
4 ANÁLISE DOS DADOS	47
4.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS	47
4.2 DEFINIÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA.....	48
4.3 ANÁLISE DE VIDA DOS DADOS	51
4.4 ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA	59
5 CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Com o mercado cada vez mais competitivo, o *LCC* “*Life Cycle Cost*” ou Custo do Ciclo de Vida tem muita importância nas análises dos componentes dentro de uma empresa, pois utilizado o LCC é possível fazer a aquisição do componente com o melhor custo benefício. Dentro do setor ferroviário um dos itens mais críticos em relação aos custos são as rodas ferroviária, conforme o gráfico 3 as rodas ferroviárias representam 37% dos custos de materiais.

Este trabalho trata de uma abordagem sobre o custo de ciclo de vida de roda ferroviária na EFVM figura 2. Atualmente são utilizados dois tipos de rodas nos vagões que transportam minério, (roda A e roda B).

1.1 TEMA

Freitas (2015) define as rodas como os “componentes responsáveis por transmitir o movimento ao vagão, além de suportar todo o seu peso e solicitações causadas pela frenagem e irregularidades da via”. São compostas basicamente por pista de rolamento (ou passeio da roda), friso, aro, disco e cubo (FREITAS, 2015), conforme apresentado na figura 1:

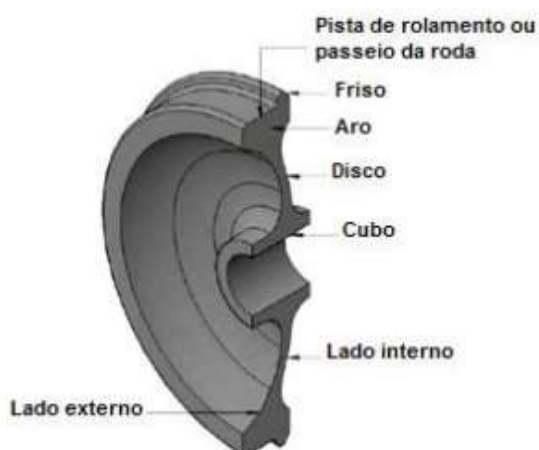


Figura 1: Desenho esquemático de uma roda ferroviária.

Fonte: adaptado de (FREITAS, 2015).

1.1.1 Delimitação do Tema

O trabalho será desenvolvido na oficina de vagões da EFVM Estrada de Ferro Vitória Minas figura 2. Será realizada uma análise da degradação dos dois diferentes tipos de roda (roda A e roda B) e avaliar qual tem o melhor custo do ciclo de vida.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

As empresas buscam de forma constante a redução de seus custos operacionais sem a perda da qualidade do produto final. Na realidade ferroviária, há vários ativos com elevado custo de aquisição e manutenção. Neste contexto, insere-se o rodeiro, o qual tem significativa relevância em torno de 38% conforme o gráfico 3, no custo final da manutenção. Portanto, faz-se necessário elaborar uma revisão acerca dos aspectos da atual forma de planejamento e práticas de manutenção dos rodeiros.

Entretanto, as rodas ferroviárias não representam apenas o maior item de custeio para manutenção, pois uma boa parcela da segurança operacional do transporte ferroviário depende diretamente delas.

No atual período que está o preço do minério de ferro (gráfico 1), é oportuno realizar estudo que determine a melhor estratégia de manutenção verificando não só custo de manutenção como os custos operacionais envolvidos nos principais componentes dos vagões. Separando e tratando os de maior relevância em relação ao custo e segurança.



Gráfico 1: Evolução do Preço do Minério

Fonte: Metal Bulletin: www.mbioi.com

O entendimento da estrutura de custos da ferrovia é essencial para planejar o desempenho operacional. A construção, renovação e manutenção dos ativos necessitam de um conhecimento detalhado dos custos envolvidos para estabelecer a tarifação adequada para o tráfego de cargas e passageiros (Profillidis, 2001).

Dentro deste contexto, verifica-se a importância do tipo de análise denominada “*Life Cycle Cost*” ou Custo do Ciclo de Vida, doravante chamado somente de LCC. O LCC constitui um somatório de estimativas de custo, desde a concepção até a baixa de uma atividade, por meio de um estudo analítico e de uma estimativa do total de custos envolvidos durante a vida de tal atividade. O objetivo de uma análise de LCC é escolher a melhor aproximação de uma série de alternativas para que o menor custo de longo prazo seja atingido.

Para Kardec e Nascif (2009), a manutenção de ativos deve e tem que ser entendida como uma função estratégica na obtenção de resultados da organização, com a função de suporte ao gerenciamento e à solução de problemas apresentados na produção, elevando a empresa em patamares competitivos de flexibilidade, qualidade, produtividade e competitividade. Assim a política de manutenção deve ser definida pela empresa segundo os seus objetivos organizacionais, apresentando-se como fator determinante do sucesso do planejamento da produção e, portanto, da produtividade do processo.

A EFVM Estrada de Ferro Vitória Minas figura 2, possui uma frota de 12.712 vagões de minério. Localizada na região sudeste, com 905 Km de extensão, onde

corta os estados do Espírito Santo e Minas Gérias, é responsável pelo transporte de aproximadamente 120.000.000 toneladas de minério de ferro por ano.



Figura 2: Estrada de Ferro Vitória Minas

Fonte: PDMF Vagões

Para cumprir o planejamento do volume transportado de minério é necessário manter a frota de vagões operacionais através dos planos de manutenção preventiva e garantindo a confiabilidade e disponibilidade física dos ativos

Os vagões utilizados para o transporte de minério são os GDEs figura 3.



Figura 3: Vagão GDE

Fonte: PDMF Vagões

Os vagões utilizados para o transporte de minério são os GDEs.

Os principais componentes do vagão GDE são:

Rodeiro: O rodeiro ferroviário é composto de duas rodas acopladas por um eixo e um par de rolamentos acoplados às extremidades do eixo, conforme ilustrado na Figura 4. O rodeiro tem a função de suportar a carga vertical, devido ao peso próprio do veículo e da carga transportada.

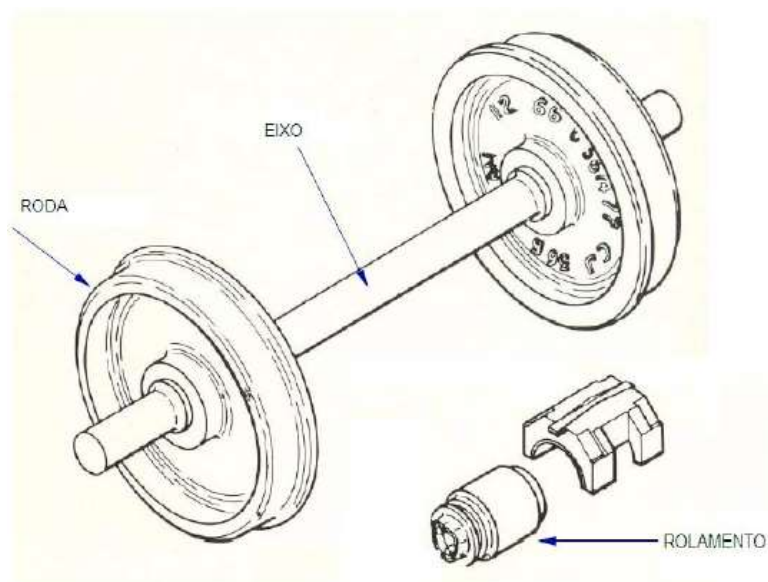


Figura 4: Rodeiro

Fonte: Rosa 2006

Conjunto de choque e tração: têm a função de amortecer os impactos e cargas do trem, impedindo que as altas cargas venham a causar danos na estrutura, principalmente nos estrados e mais especificamente nas longarinas centrais.

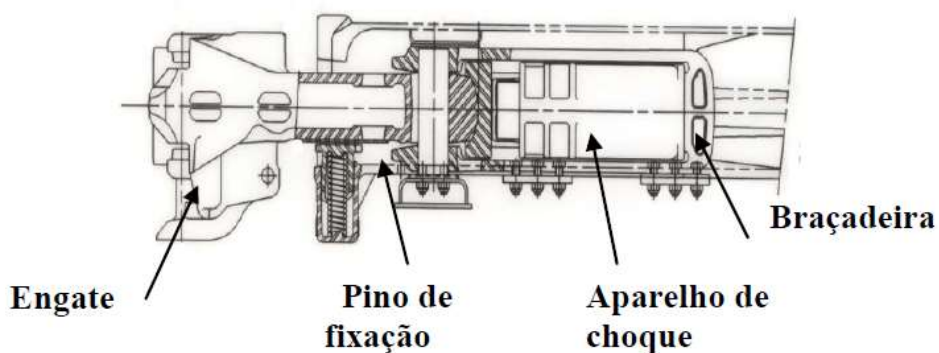


Figura 5: Conjunto de Choque Tração

Fonte: Revista Ferroviária 2010

Truque: Os truques são responsáveis pela transferência da carga imposta pelo veículo aos trilhos e, através dos rodeiros, pela movimentação dos vagões ao longo da linha.

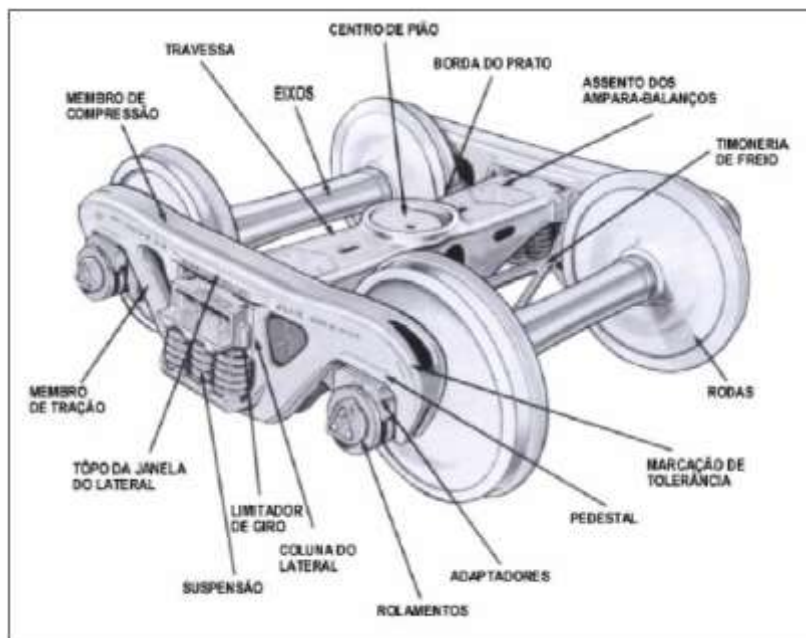


Figura 6: Truque

Fonte: Adegonor 2006

Freio: O sistema de freio como o próprio nome diz tem o objetivo de parar a composição quando necessário e em casos de emergências.

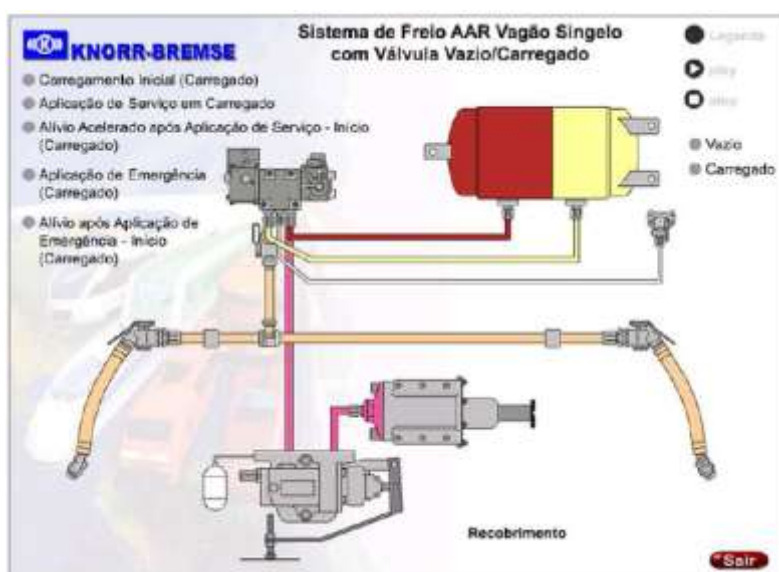


Figura 7: Sistema de Freio

Fonte: IME 2012

Caixa ou superestrutura: é responsável pelo acondicionamento da carga transportada e transferir os esforços às demais partes do vagão. Deve ter sua construção adaptada para o tipo de carregamento/descarga a ser utilizado.

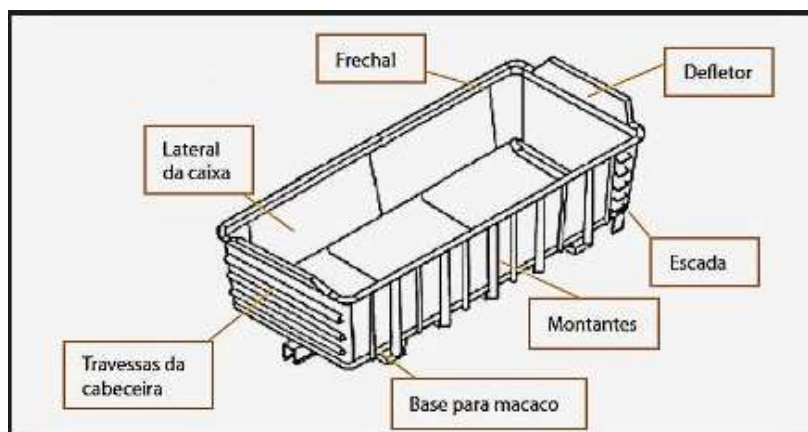


Figura 8: Caixa ou superestrutura

Fonte: Paulo Costa 2010

O maior desafio da manutenção de vagões é aumentar a confiabilidade e manter a disponibilidade física dos ativos reduzindo o custo de manutenção.

O custeio na manutenção de vagões gráfico 2 está dividido entre, materiais de manutenção, pessoal, serviço de manutenção e outros custos.

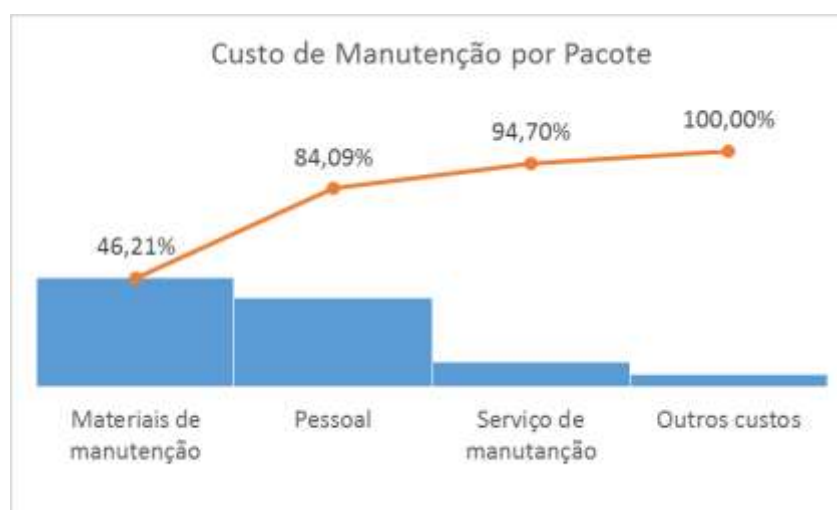


Gráfico 2: Pareto custo de manutenção

Fonte: PDMF vagões

Percebe no gráfico 3, que material é o pacote de maior impacto em relação ao custo na manutenção de vagões na EFVM representando 46,21% do custo total.

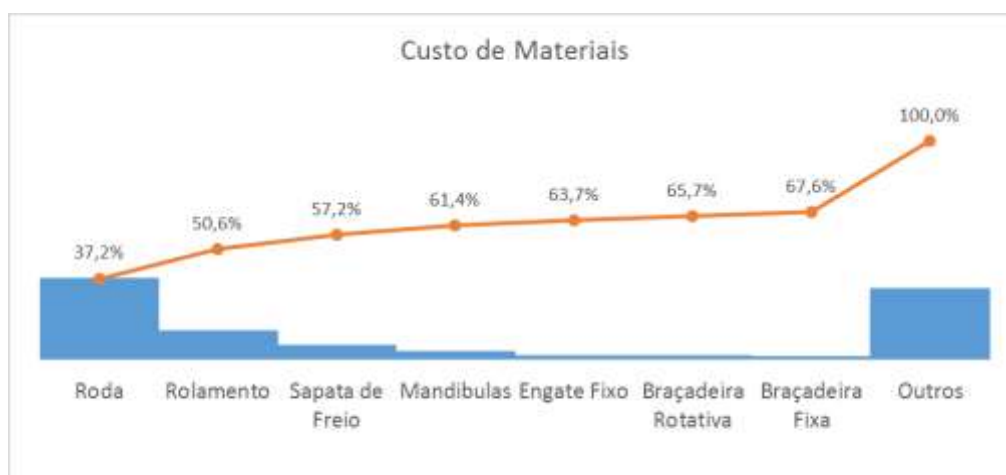


Gráfico 3: Pareto custo de materiais

Fonte: PDMF Vagões

Como o gráfico 3 ilustra, o componente roda representa 37,2% o custo de materiais na manutenção de vagões e 13,16% do custo total.

Como roda é o componente de estudo deste trabalho, qual fabricante tem o melhor custo benefício?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar análise econômica comparativa entre rodas ferroviárias fundidas e forjadas utilizadas em vagões de minério.

1.3.2 Objetivos Específicos

O trabalho tem os seguintes objetivos específicos para atender o objetivo geral.

- Levantar todos os dados e desgaste das rodas;
- Classificar os modelos de fabricante (A e B);
- Avaliar taxa de desgaste;
- Avaliar vida média;
- Projetar demandas futura;

- Aplicar a metodologia e ferramenta nos dois modelos de rodas, (A e B);
- Comparar os resultados obtidos.

1.4 JUSTIFICATIVA

Conforme mostrado no gráfico 3, a roda representa 37,2% dos custos de materiais de manutenção na oficina de vagões da EFVM.

Com a aquisição da roda com o melhor custo do ciclo de vida será possível reduzir os custos operacionais.

1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA APLICADA

A figura 9 mostra um fluxograma com as etapas do estudo.

Como descrito na introdução será realizado uma análise comparativa do custo do ciclo de vida entre a roda forjada e fundida.

O estudo será realizado nas rodas de vagões que transportam minério na EFVM.

Serão coletados dados dos tornos de rodeiros.

Os dados serão tratados e utilizados para análise no WEIBULL ++ usando a metodologia LDA e análise de degradação.

Por fim será realizada a conclusão.

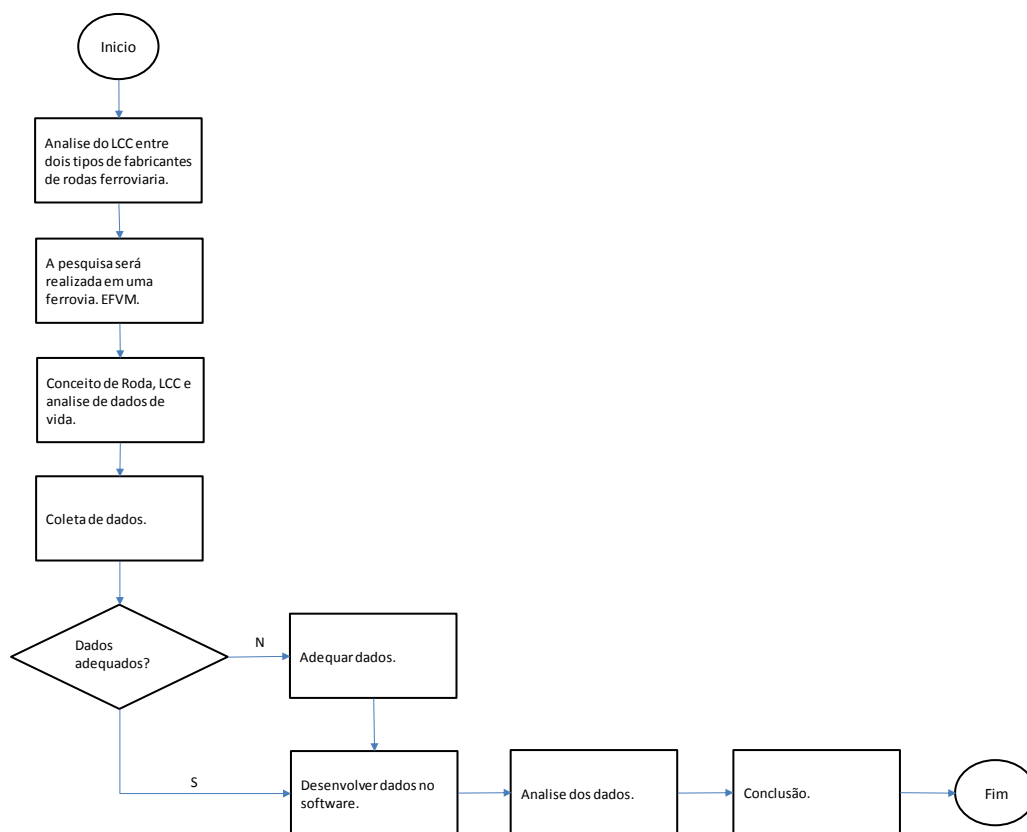


Figura 9: Fluxograma das etapas da pesquisa.

Fonte: Autor

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia será dividida em 5 capítulos.

O primeiro capítulo é uma introdução do tema abordado dos custos de manutenção de vagões.

O capítulo 2 irá apresentar conceitos técnicos de roda ferroviária.

O capítulo 3 apresentará o referencial teórico da engenharia de LCC e confiabilidade no tema do trabalho.

O capítulo 4 será a aplicação da metodologia.

O capítulo 5 será a conclusão do trabalho.

2 RODA FERROVIÁRIAS

Neste capítulo será abordado o conceito de roda ferroviária, os processos de fabricação existentes, sua composição química, tipo de defeitos, falhas e a previsão de consumo.

Sisdelli (2006), define roda ferroviária como um componente do rodeiro figura 9, fabricado em aço fundido ou forjado. As ferrovias de carga no Brasil utilizam os tipos de roda recomendados pela Associação de Ferrovias Americanas (AAR).

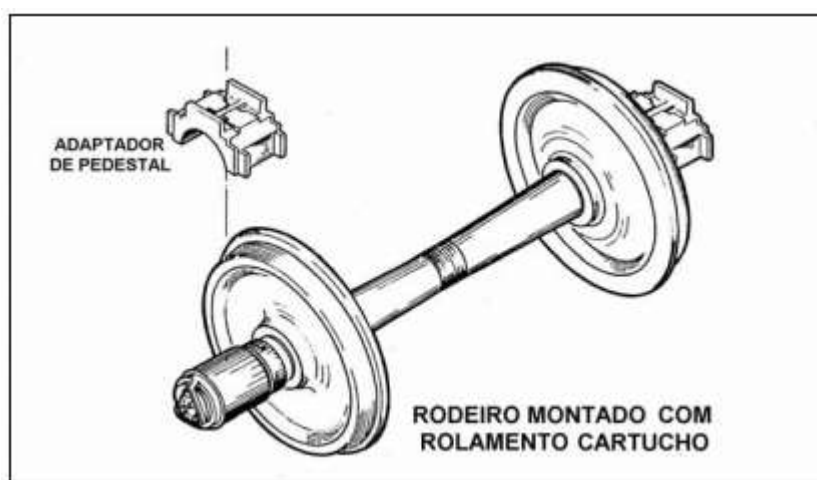


Figura 10: Rodeiro Ferroviário

Fonte: Armando Sisdelli 2006

O rodeiro ferroviário é composto por eixo, rolamento, adaptador e roda que é o componente de estudo desta monografia.

2.1 APLICAÇÃO DE RODA NAS FERROVIAS

Com o aumento da carga transportada no setor ferroviário, vários estudos estão acontecendo para melhorar o desempenho dos componentes. A roda ferroviária por ser um dos itens de maior custo na manutenção nas ferrovias é um item muito estudado no setor.

Santos (1997) diz que a roda também serve como tambor de freio, ou seja, é utilizada para dissipar o calor gerado devido à variação da energia cinética e potencial do veículo durante a frenagem. A parte desse calor que entra na roda pode gerar diversos tipos de problemas tais como mudanças estruturais, redução da

resistência mecânica, modificação do padrão inicial das tensões residuais, fadiga, entre outros.

Conforme Freitas (2015) as rodas ferroviárias convencionais são fabricadas em aço alto e médio carbono, contendo na faixa de 0,45 – 0,80 % de Carbono, e são tratadas termicamente. Suas microestruturas são tipicamente perlita fina. A norma AAR (2014) estabelece os critérios de fabricação e práticas recomendadas para eixos e rodas. A norma classifica as rodas para aplicação em locomotivas e vagões de carga em 4 classes, conforme a Tabela 1.

Aplicação	Classe
Altas velocidades, condições severas de frenagem	L
Baixas velocidades, condições leves de frenagem e moderadas cargas	A
Altas velocidades, condições severas de frenagem e altas cargas	B
Baixas velocidades, condições leves de frenagem e altas cargas	C

Tabela 1: Classificação de rodas ferroviárias conforme aplicação.

Fonte: AAR (2014)

Na Tabela 2 pode-se verificar a classificação básica das rodas ferroviárias para vagões de carga, conforme a aplicação e a composição química.

Aplicação	% Carbono	Classe
Altas velocidades, condições severas de frenagem e altas cargas	0,57 – 0,67	B
Baixas velocidades, condições leves de frenagem e altas cargas	0,67 – 0,77	C
		D

Tabela 2: Classificação de rodas ferroviárias para locomotivas e vagões de carga, conforme aplicação e composição química (AAR, 2014).

Fonte: AAR (2014)

A norma AAR (2014) determina os requisitos de composição química de rodas ferroviárias de acordo com as diferentes classes, listados na Tabela 3.

Elemento	Classe L	Classe A	Classe B	Classe C
C [%]	Máx. 0,47	0,47-0,57	0,57-0,67	0,67-0,77
Mn [%]	0,60-0,90	0,60-0,90	0,60-0,90	0,60-0,90
P [%]	Máx. 0,03	Máx. 0,03	Máx. 0,03	Máx. 0,03
S [%]	0,005-0,040	0,005-0,040	0,005-0,040	0,005-0,040
Si [%]	0,15-1,00	0,15-1,00	0,15-1,00	0,15-1,00

Elementos Residuais				
Ni [%]	Máx. 0,25	Máx. 0,25	Máx. 0,25	Máx. 0,25
Cr [%]	Máx. 0,25	Máx. 0,25	Máx. 0,25	Máx. 0,25
Mo [%]	Máx. 0,10	Máx. 0,10	Máx. 0,10	Máx. 0,10
V [%]	Máx. 0,04	Máx. 0,04	Máx. 0,04	Máx. 0,04
Cu [%]	Máx. 0,35	Máx. 0,35	Máx. 0,35	Máx. 0,35
Al [%]	Máx. 0,06	Máx. 0,06	Máx. 0,06	Máx. 0,06
Ti [%]	Máx. 0,03	Máx. 0,03	Máx. 0,03	Máx. 0,03
Nb [%]	Máx. 0,05	Máx. 0,05	Máx. 0,05	Máx. 0,05

Tabela 3: Composição química, em peso, das rodas ferroviárias, por classe.

Fonte: AAR 2014

2.1.1 Manutenção

A manutenção de rodeiros na EFVM é realizada na Casa de Rodas que fica localizada na oficina de vagões.

Os serviços realizados nas rodas são:

- Inspeção (Detecção de defeitos e dimensional);
- Reperfilamento (Remoção de material para retiradas de defeitos do passeio e recomposição do friso);
- Deseixamento (Remoção da roda do eixo no final da vida útil da mesma)
- Usinagem do furo da roda;
- Eixamento (Instalação de roda nova no eixo).

As rodas quando novas possuem frisos largos de 36 mm e bandagem de aproximadamente 72 mm. À medida que as rodas vão sendo usinadas, as mesmas perdem a vida reduzindo a bandagem e recompondo o friso para 32 mm.

O limite de condenação da roda é: bandagem 19 mm e friso 21 mm.

A figura 11 mostra o gabarito utilizado para definir a quantidade de metal a ser retirado no reperfilamento e os perfis da roda antes (linha cheia) e depois (linha tracejada) do reperfilamento.

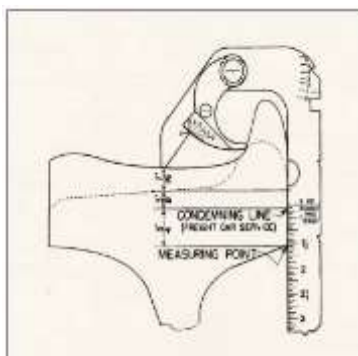


Figura 11: Gabarito utilizado para medir roda

Fonte: *Manual of Standards and Recommended Practices – Section G, 1997*

Toda vez que é executado usinagem de roda a mesma perde medida até ser sucateada e tendo que ser substituída por uma roda nova.

A seguir serão apresentados alguns motivos que as rodas são retiradas de circulação e devem ser usinadas.

Bandagem trincada ou quebrada. Pequenas quebras devidas ao escoamento de material da pista ao longo do perímetro da roda, na quina mais externa do ponto de passeio, não é considerado defeito.



Figura 12: Roda Quebrada

Fonte: *Manual Técnico de Vagões 2016*

Roda com calo na pista de rolamento de 50 mm de comprimento ou mais.



Figura 13: Roda com calo

Fonte: Manual Técnico de Vagões 2016

Roda com bandagem de $\frac{3}{4}$ " (19mm) ou menos para rodas de 30" e 33", medidos como mostra figura 14.

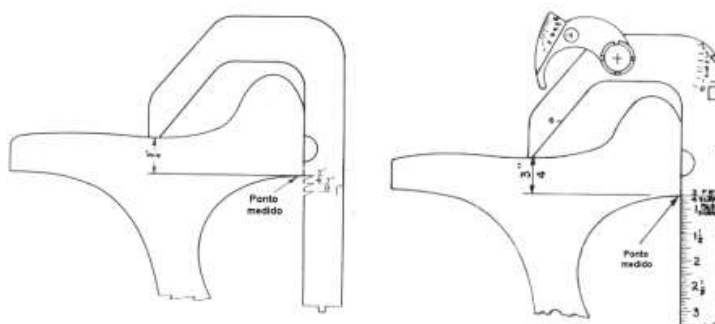


Figura 14: Roda com bandagem baixa

Fonte: Manual Técnico de Vagões 2016

Nos casos da figura 14, a roda é sucateada.

Rodas com descascamento de pista (Shelling), devem ser retiradas de serviço quando as fadigas se apresentarem com mais de $\frac{3}{4}$ " (19mm) de comprimento e de largura e estiverem mais ou menos distribuídas ao longo da periferia da roda ou sempre que alguma fadiga tenha mais que 1" (25,4mm) de comprimento e de largura, conforme figura 15.



Figura 15: Roda com descascamento

Fonte: Manual Técnico de Vagões 2016

Rodas com pista caldeada devem ser condenadas sempre que a pista estiver com sobreposição de material com altura maior que 1/8" (3,2mm).



Figura 16: Roda caldeada

Fonte: Manual Técnico de Vagões 2016

Rodas com sulco marcado na pista de rolamento com profundidade maior que 1/8" (3,2mm) ou mais, deverão ser removidas de serviço e verificadas quanto à condição de recuperação por usinagem, conforme figura 17.



Figura 17: Roda com sulco

Fonte: Manual Técnico de Vagões 2016

Rodas que apresentem cava maior que 4 mm conforme figura 18, devem ser removidas de serviço e enviadas para usinagem de recomposição da vida. As rodas com cava formam o conhecido friso falso que trava o movimento lateral dos truques, gerando no rodeiro a ocorrência de uma roda com friso fino e a outra com friso praticamente normal.



Figura 18: Roda com Cava

Fonte: Manual Técnico de Vagões 2016

Conforme descrito na figura 11, assim que a bandagem da roda atingir 19 mm a mesma é descartada e substituída por uma roda nova.

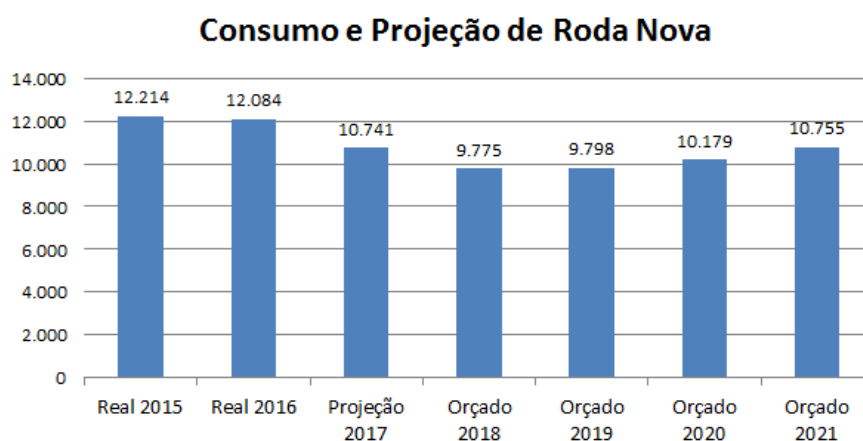


Gráfico 4: Consumo e projeção de rodas

Fonte: PCM Vagões

O gráfico 4, mostra a evolução da projeção de consumo de roda novas na ferrovia estudada neste artigo e faz parte dos objetivos específicos.

2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

No Brasil existem dois tipos básicos de rodas ferroviárias classificadas por processo de fabricação: rodas forjadas e rodas fundidas.

Neto (2006) comenta que as rodas fundidas ou forjadas em aço carbono são permitidas para utilização em reposição ou montagem de veículos ferroviários novos. Ambas são constituídas de aço, sendo a variação da composição do aço relativamente sem importância diante das grandes diferenças microestruturais. No entanto, os processos de fabricação de ambas são bastante distintos. Rodas forjadas em aço são aquecidas e conformadas a quente, enquanto rodas fundidas são feitas de metal fundido vazado em moldes.

O processo de fundição resumidamente ocorre da seguinte forma:

- Aço líquido (em torno de 1700 °C) é colocado em moldes de grafite que são usinados e têm exatamente o formato da roda acabada;
- Vazamento, que consiste basicamente na injeção de ar sob pressão controlada dentro do tanque de vazamento, o que faz o aço da panela ser direcionado para os moldes através de um tubo de cerâmica até preencher todo o vazio interno formado pelos moldes de grafite (OLIVEIRA, 2013). Após a solidificação do aço nos moldes é feito o corte dos massalotes;
- As rodas são temperadas em água e revenidas para alívio de tensões em fornos elétricos, a gás ou a óleo;
- A Usinagem das rodas fundidas ocorre no furo central, pois a alimentação do aço para o molde no momento da fundição é feita somente por esta área; também é feita usinagem da pista de rolamento para eliminação da camada martensítica formada após o tratamento térmico. O tratamento térmico é feito normalmente com os aços sendo austenitizados na temperatura próxima a 1000 °C.
- Todas as rodas devem ser inspecionadas, por ultra-som, partículas magnéticas, dureza e dimensionais.

O processo de forjamento resumidamente ocorre da seguinte forma:

- Fabricação e corte dos lingotes vindos da aciaria em bloco;
- Pesagem dos blocos;
- Enfornamento dos blocos para aquecimento até 1250° C;

- Após o aquecimento, os blocos são retirados um a um do forno e passam por um jateamento de água e alta pressão para remover a carepa formada no processo de aquecimento;
- Blocos são prensados em prensas que variam de 6.000 t a 12.000 t;
- Laminação, onde é formada a superfície de rolamento da roda juntamente com o friso, por meio de deslocamento de material do disco da roda para a pista;
- A última operação do forjamento é a prensagem final para conformar o disco da roda e puncionar o furo central;
- No final do forjamento a roda está em torno de 850 a 1000 °C;
- As rodas, após o forjamento, são colocadas em fossas refratárias cobertas, para um resfriamento lento e controlado;
- No tratamento térmico é feito a têmpera e o revenido;
- Em seguida é feito a usinagem total da roda e inspeções finais.

Após a etapa de forjamento ou de fundição, a norma AAR define que as rodas ferroviárias devem ser austenizadas e em seguida passar por um resfriamento diferencial na superfície de rolamento seguida de um revenido. A têmpera superficial gera tensões residuais compressivas que inibem a propagação de trincas e fadiga na direção radial, que no caso ocorram geralmente são catastróficas (COLPAERT, 2008).

Durante muito tempo, as rodas ferroviárias foram confeccionadas em aço carbono, porém nos últimos anos começaram a ser utilizados aços microligados (classe D AAR). Aços microligados são aqueles que possuem pequena adição de elementos de liga (menor que 0,1% em massa), essa pequena adição melhora consideravelmente a temperabilidade, as propriedades mecânicas e a resistência ao desgaste. (VILLAS BÔAS, 2010)

Chaves (2017), mostra fluxograma do processo de fabricação forjada e fundida conforme figuras 19 e 20.



Figura 19: Fluxograma do processo de fabricação de roda forjada

Fonte: MWL (2015)



Figura 20: Fluxograma do processo de fabricação de roda fundida.

Fonte: AMSTED (2015)

Os dois principais processos de fabricação de rodas ferroviárias são, forjada e fundida conforme apresentados nas figuras 19 e 20.

2.3 DESGASTE

O desgaste da roda ferroviária ocorre pelo contato roda trilho e pela perda de massa na bandagem devido a usinagem.

Bushan (2001) define desgaste como “o fenômeno de remoção de material da superfície devido à interação com a outra superfície do par”. Para a norma ASTM G40-13 (2013), desgaste é a alteração provocada em uma superfície sólida por perda ou deslocamento de material, devido ao movimento relativo entre esta superfície e uma ou mais substâncias. Não é uma propriedade do material, sim do sistema. As taxas de desgaste podem variar dependendo das condições de contato, por exemplo: material, velocidade de deslizamento, pressão de contato, forma, umidade, lubrificação, entre outros (STACHOWIAK, 2006).

Atualmente a EFVM operada pela Vale, é caracterizada por ser uma ferrovia muito sinuosa e de curvas fechadas. Segundo Dalmaso (2010), o menor raio de curva da EFVM é de 110,52 metros e está presente no trecho DrummondItabira. Neste mesmo trecho, o raio predominante é de 143,24 metros. Em outros trechos desta ferrovia, os raios mínimos existentes estão na faixa dos 200 metros, com os raios predominantes variando entre 200 e 350 metros. Para comparação, a Estrada de Ferro Carajás (EFC), também com operação da Vale, tem somente 27% de sua malha formada por curvas, com raio mínimo de 860 metros (PEREIRA, 2009).

As diferentes geometrias das ferrovias promovem diferentes condições de operação, assim como diferentes comportamentos quanto ao contato roda-trilho. Santos (2000) coloca rodas e trilhos entre os principais componentes mecânicos da ferrovia. Destaca o trilho como o “responsável pela sustentação dos trens e de todos seus componentes” e a roda como o item cuja função é “ser o elemento de apoio do peso dos veículos ferroviários”. Semprebone (2005) cita que no transporte ferroviário “o veículo é guiado sobre trilhos metálicos através de rodas também metálicas. O contato roda-trilho causa desgaste em ambos elementos, sendo que as tensões de contato, que ocorrem numa pequena área, são responsáveis pelo surgimento de muitos defeitos nos trilhos”. Bellodi (2010) explica que “As rodas de trens sofrem desgaste quando em contato com a via férrea, o que sistematicamente gera modificação do perfil na região de contato com o trilho”.

Sisdelli (2006) comenta que as rodas estão sujeitas a dois tipos de desgaste principais: desgaste abrasivo e desgaste por deslizamento, descritos abaixo.

O desgaste abrasivo tem origem em partículas externas ao sistema roda-trilhosapata, como fragmentos de minério e areia, entre outros, ou em partículas removidas do sistema oriundas de qualquer de seus membros e encruadas devido ao movimento relativo entre elas.

O desgaste por deslizamento ocorre segundo os mecanismos de deformação plástica, fadiga de contato, fadiga termomecânica, oxidação, micro-escorregamento e macro-escorregamento da roda sobre trilho. Estes mecanismos, em conjunto com a abrasão podem levar a roda e o trilho a uma condição de desgaste normal e homogêneo, com redução das dimensões do friso e do aro da roda e do boleto do trilho ou formar defeitos na pista e friso tais como escoamento, escamação (shelling), calos e lascagens (spalling).

2.3.1 Falhas

Entre os anos de 2008 a 2013, ocorreram pelo menos 40 falhas catastróficas em rodas ferroviárias de vagões com parada de trem em uma grande ferrovia no Brasil, gerando descarrilamentos e até tombamentos (FREITAS, 2015). O aumento gradativo de cargas transportadas também aumenta os riscos de acidentes com prejuízos financeiros, impactos ambientais e a comunidade.

Com o intuito de evitar falhas em rodas ferroviárias, uma vez que as ferrovias estão aumentando a carga dos vagões sem a mudança dos seus componentes, os projetos de rodas estão passando por evoluções significativas nos últimos anos, tanto no material quanto na sua forma geométrica. Dentre as mudanças de geometria talvez a mais significativa tenha ocorrido na área do disco da roda (ALVES, OLIVEIRA; 2012).

Neto (2006) comenta que a segurança de todos os trens que se movem sobre trilhos depende da integridade de cada roda da composição. Rodas defeituosas ou desgastadas ao limite estão mais sujeitas a causar descarrilamentos, resultando em severas perdas.

3 LCC

As empresas estão sempre buscando cada vez mais reduzir seus custos de manutenção, portanto é importante a avaliação do custo de ciclo de vida dos componentes.

Neste capítulo será abordado conceitos de custo do ciclo de vida e LDA.

3.1 VISÃO GERAL DO LCC

Um dos principais objetivos da Análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC - Life Cycle Cost) é realizar a avaliação econômica para manter um equipamento durante toda a sua vida útil, incluindo os custos de aquisição, instalação, operação, manutenção e descarte.

A análise LCC é fundamental para uma gestão de ativos sustentável e otimizada, sendo um dos requisitos principais da PAS 55, pois será utilizada para apoiar decisões, no momento da comparação de diferentes projetos e alternativas técnicas, definição de fornecedores e também auxiliar no planejamento de manutenção e na definição do tempo ótimo de substituição dos equipamentos, a fim de obter a melhor solução operacional sem comprometer a disponibilidade e produtividade, ajudando as empresas a alcançarem seus objetivos estratégicos.

Apesar de atualmente ser mais utilizada no setor privado, a Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) foi desenvolvido para dar suporte às compras de equipamento militar e usado pelo Departamento de Defesa dos EUA, em meados dos anos 60. Na década seguinte, essa abordagem começou a ser usada para comparar alternativas de projetos energéticos em edifícios (COLE E STERNER, 2000).

Nakagawa (2000) defende que as empresas devem alicerçar suas decisões estratégicas em informações que contemplem todo o ciclo de vida do produto. Para Gluch e Baumann (2004), a principal diferença entre os cálculos tradicionais de investimento e o ACCV reside na abordagem do último numa perspectiva expandida para esse ciclo de vida, considerando não apenas o investimento inicial, mas também todos os custos de operação e manutenção durante este período.

Sob uma abordagem seqüencial do ACCV, Marshall e Petersen (1995) definem dez passos para a realização da análise do custo do ciclo de vida e tomada de decisões em relação à escolha de alternativas, apresentados na Tabela 4.

Passos	Descrição
1	Identificar alternativas aceitáveis;
2	Estabelecer parâmetros comuns para as alternativas;
3	Estimar todos os custos referentes a cada alternativa e sua distribuição no tempo;
4	Descontar a valor presente os custos futuros estimados;
5	Calcular o ACCV de cada alternativa;
6	Identificar a alternativa com menor ACCV
7	Considerar benefícios e custos não quantificáveis;
8	Considerar as incertezas referentes a cada alternativa, em valores monetários;
9	Complementar a análise com indicadores de desempenho econômico para cada alternativa;
10	Selecionar a melhor alternativa

Tabela 4: Passos para elaboração da análise do custo do ciclo de vida

Fonte: adaptado de Marshall and Petersen (1995)

Pai (2012) cita que várias metodologias podem ser aplicadas para buscar essa alternativa ideal como os cálculos de degradação de componentes, cálculos de vida, análises de falha e manutenção centrada em confiabilidade.



Figura 21: Custos durante o ciclo de vida de um equipamento.

Fonte: (AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE, 2011)

A alternativa, mais focada no lado financeiro da análise é o Life Cycle Cost (LCC – do inglês, traduzido livremente para Custo do Ciclo de Vida), ilustrado na Figura 21.

A figura 21 apresenta os custos desde a pesquisa e desenvolvimento do equipamento até o seu descarte, e prevê aquela estratégia de desenvolvimento, operação, manutenção e descarte que custe menos ao longo de toda essa vida.

3.2 VANTAGENS DO LCC

O LCC ajuda a mudar visões antiquadas de problemas de operação industrial com ênfase em competitividade econômica e sempre pensando no menor custo em longo prazo o que não é uma resposta fácil de obter. Geralmente a engenharia, produção e o departamento financeiro tendem a debater e apenas olhar um único critério que melhore a sua própria área independente do que seja necessário para que ele melhore. Cabe ao gerente controlar essas áreas de forma a maximizar cada critério em busca do melhor para a companhia, e o LCC é uma ótima ferramenta para isso. (BARRINGER, 2003)

O custo de um componente ao longo de sua vida pode ser expresso por uma fórmula simples:

$$\text{LCC} = \text{Custo de Capital} + \text{Custos de Operação} + \text{Custos de Manutenção} + \text{Custos de Descarte} - \text{Valor residual}$$

Equação 1: Fórmula geral do custo de ciclo de vida do componentes

Fonte: Traduzido livremente de (AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE, 2001)

3.3 ANÁLISE DO LCC

Reis e Pontes (2011) analisaram três diferentes tipos de fabricantes de rodas. Para a análise inicial do LCC foi considerado a vida média em Km, o valor de aquisição de uma roda nova e avaliada a relação preço/vida média em Km conforme tabela 5.

Empresa	Vida média (km)	Preço de compra (€)	Relação Preço/Vida Média (€/km)
X	1108014	900	0,000812
Y	883591	720	0,000815
Z	829150	630	0,000760

Tabela 5: Comparação entre vida média, preço de compra e a relação custo x benefício de três fornecedores de rodas ferroviárias.

Fonte: Reis e Pontes 2011.

A tabela 5 mostra que a roda Z possui a menor vida média em Km, porém tem o melhor custo benefícios.

Reis e Pontes (2011) observaram que a análise inicial era frágil, pois só era considerado o custo de aquisição.

O estabelecimento de parâmetros é importante para realizar um boa análise o custo do ciclo de vida do componente.

A tabela 6 mostra alguns parâmetros que podem ser utilizados.

Parâmetro	Justificativa
Custo de aquisição	Representa o preço médio de compra das rodas de uma determinada empresa atualizadas a valor presente.
Quilometragem anual	Representa a quilometragem anual média percorrida por uma roda ferroviária empregada em um trem de carga. Esse valor independe da empresa analisada e foi pré-estabelecido em 115 mil quilômetros por ano
Frequência de re-usinagem	Expressa a quilometragem percorrida por um par de rodas de uma determinada empresa entre as re-usinagens para re-estruturação do perfil do friso e da mesa de rolamento. Após análise percebeu-se que esse valor difere para cada empresa justamente pela durabilidade de cada uma;
Custo de re-usinagem	É o valor médio gasto para re-usinagem de um par de rodas de uma determinada empresa. Esse custo é influenciado pela usinabilidade dos produtos e pela situação em que o mesmo se encontra quando é encaminhado para manutenção.
Custo de troca da roda	Representa o custo médio envolvido na operação de troca das rodas do eixo quando da necessidade de sucateamento da mesma e aquisição de outra.
Valor ao fim de vida	Representa o valor médio de uma roda sucateada quando da sua venda para sucateiros. Como esse valor depende do peso da roda no fim de vida e esse peso depende do desgaste que a roda sofreu ao longo do seu ciclo de vida, cada empresa teve um preço médio de venda levantados
Taxa de atualização	Taxa utilizada para atualizar tanto os valores médios encontrados no levantamento histórico como os custos estimados para o futuro. Fixado à 4% ao ano (taxa de juros da zona do euro, local do estudo)

Tabela 6: Parâmetros para a análise das empresas fornecedoras de rodas

Fonte: Reis e Pontes (2011).

3.4 LDA (*LIFE DATA ANALYSIS*)

Conforme comentado no capítulo anterior, para se fazer análise do custo do ciclo de vida, é necessário conhecer a vida do componentes.

A Análise de Dados de Vida utiliza metodologias estatísticas para construir modelos probabilísticos a partir de dados de vida. Os modelos são utilizados para realizar previsões precisas.

Mattos e Zotti (2010) definem que na Análise de Dados de Vida ou Análise dos Tempos de Falha, tudo é baseado em estimativas; o valor real da confiabilidade de um produto nunca será conhecido, somente se todos os produtos já tiverem falhado. Os modelos que fornecem a estimativa de taxa de falha do produto em função do tempo estimam a probabilidade de falha (sobreviver) do produto para uma dada idade, ou para um dado período de tempo. Os modelos são representações

matemáticas dos dados dadas por funções contínuas a qual permite interpolações e algumas extrapolações. Estes modelos probabilísticos são baseados em distribuições estatísticas. As mais utilizadas são denominadas de Distribuições de Vida, conforme a figura 22.

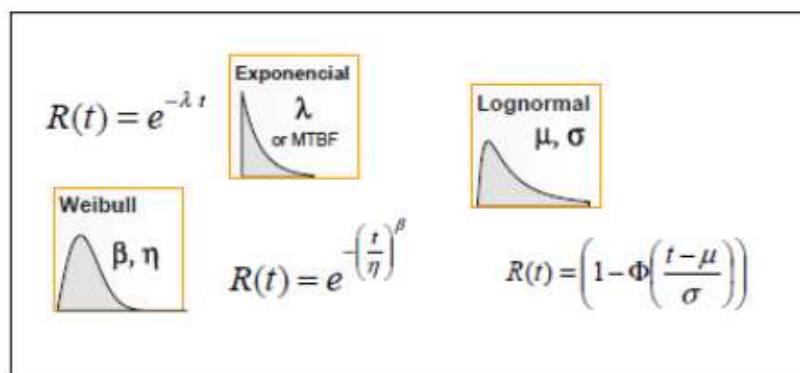


Figura 22: Distribuições de Vida Mais Utilizadas

Fonte: Mattos e Zotti (2010)

Todos os dados disponíveis devem ser considerados na análise de dados de vida. Isto inclui os casos particulares onde um item da amostra foi removido do teste antes que a falha tivesse ocorrido. Há ainda informações, nestes casos, e nunca deverá ser descartada. Para um item que foi removido do teste de confiabilidade antes que a falha ocorresse, ou um item que ainda continua em operação (itens que não falharam) denomina-se de itens suspensos ou observações censuradas à direita.

O tipo de dado afeta o processo de estimativa da Confiabilidade. É muito importante a correta classificação pelo tipo de dado. A maioria dos dados em Confiabilidade contêm censuras (informação incompleta). Os modelos e análises devem saber tratar esses dados! A figura 23, mostra os tipos de dados.

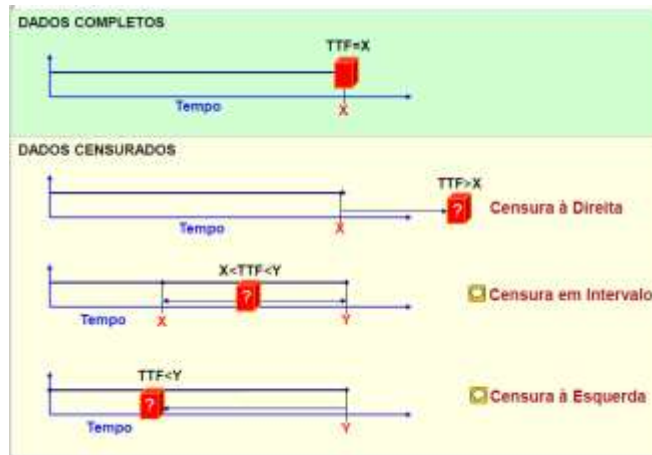


Figura 23: Dados completos e censurados.

Fonte: Reliasoft

Mattos e Zotti (2010) definem os tipos de dados da seguinte maneira.

Dados Completos – A maioria dos dados que não são dados de vida, bem como alguns dados de vida, são os que chamamos pelo termo dados completos. Dados completos significam que o valor de cada item da amostra é observado ou conhecido. Por exemplo, se testarmos 10 itens e todos falharam, portanto, neste caso teríamos as informações de quando o item falhou.

Dados Censurados à Direita – Neste caso os dados possuem itens que não falharam. Por exemplo, se testarmos dez itens, mas somente cinco falharam. Neste caso, nossos dados são compostos por cinco itens que falharam, ou seja, itens que conhecemos os tempos de falha e cinco itens que não falharam. Este é o comum tipo de dados censurados, frequentemente utilizado na análise dados de campo. Um erro comum é quando as suspensões ou itens que não falharam são desprezados.

Dados em Intervalos Censurados – Dados censurados em intervalos que contêm incertezas em relação ao tempo exato que a falha aconteceu. Em outras palavras, as únicas informações que temos são que o item falhou em um dado intervalo de tempo. Por exemplo, se executarmos um teste com cinco itens e realizarmos inspeções a cada cem horas, nós saberemos se o item falhou ou não entre as inspeções. Se o item falhou entre as inspeções nós não saberemos o exato momento em que a falha ocorreu, mas nós sabemos que ela ocorreu dentro do intervalo de inspeção. Isto também é chamado por inspeção de dados por vários autores.

Dados Censurados à Esquerda – O terceiro tipo de censura é similar à censura em intervalos e é denominado dado censurado à esquerda. Nos dados

censurados à esquerda, o tempo da falha é somente conhecido após certo tempo. Por exemplo, sabemos que a falha ocorreu em algum tempo antes de 100 horas, mas não sabemos exatamente quando. Em outras palavras, a falha pode ter acontecido entre zero e cem horas.

3.5 TIPOS DE FALHAS

De acordo com a definição da OREDA (*Offshore Reliability Data*), a falha de um sistema técnico ocorre quando há a interrupção ou a degradação da habilidade de um item desempenhar suas funções requeridas (OREDA, 2002).

Para o ABS (American Bureau of Shipping), falha é o estado ou condição no qual um componente deixa de satisfazer alguns aspectos de projeto desejados (ABS, 2004). Já, segundo a norma SAE JA1011, falha é a forma pela qual uma função é perdida ou comprometida (SAE, 1999). A NASA estabelece falha como o cessar de uma função ou desempenho adequado (NASA, 2000).

Finalmente, a norma ABNT NBR 5462 define falha como o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida (ABNT, 1994). Desta forma, se pode observar que todos os conceitos são semelhantes e centram-se, principalmente, no não cumprimento de uma determinada função para qual foi o sistema técnico foi projeto.

Taxa de falha é a chance de falhar na próxima e menor unidade de tempo, dado que o item funcionou até então (Reliasoft).

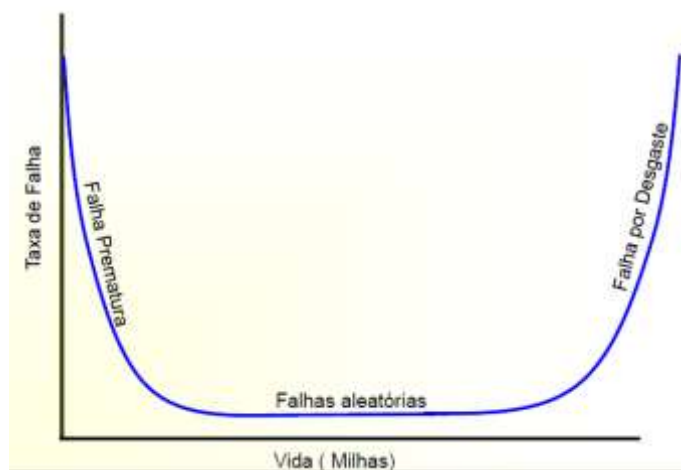


Gráfico 5: Curva da banheira

Fonte: Reliasoft

Conforme apresentado no gráfico 5, taxas de falha podem ser crescentes, decrescentes, constantes, em forma de “banheira” ou nenhum destes acima citados.

Taxa de falha crescente (desgaste, velhice).

Taxa de falha decrescente (mortalidade infantil).

“Curva da banheira” (mortalidade infantil seguida de desgaste).

3.6 TIPOS DE DISTRIBUIÇÕES

A distribuição estatística é descrita pela *pdf* (ou função densidade de probabilidade). Utilizando a definição da *pdf* como todas as outras funções mais comumente utilizadas na análise de confiabilidade, que permitem a análise de dados de vida, tais como, função confiabilidade, função taxa de falha, função vida média e função vida mediana. Todas estas podem ser determinadas diretamente a partir das definições da *pdf*, ou $f(t)$.

Existem diferentes distribuições, tais como normal, exponencial etc. e cada uma delas tem o $f(t)$ pré-definido. Estas distribuições foram formuladas por estatísticos, matemáticos e engenheiros para modelar matematicamente ou representar certo comportamento. Por exemplo, a distribuição Weibull foi formulada por Walloddi Weibull. Muitas das distribuições que tendem a melhor representar os dados de vida são comumente chamadas de distribuições de vida.

A seguir serão apresentadas algumas distribuições de probabilidade (Reliasot).

Distribuição Weibull é uma proposta geral para análise de Confiabilidade. É uma distribuição flexível e, por esta razão, amplamente utilizada. O comportamento da taxa de falha na Weibull pode ser crescente, decrescente ou constante. Sua *pdf* pode ter diferentes formatos, e conseqüentemente se aproximar de outras distribuições.

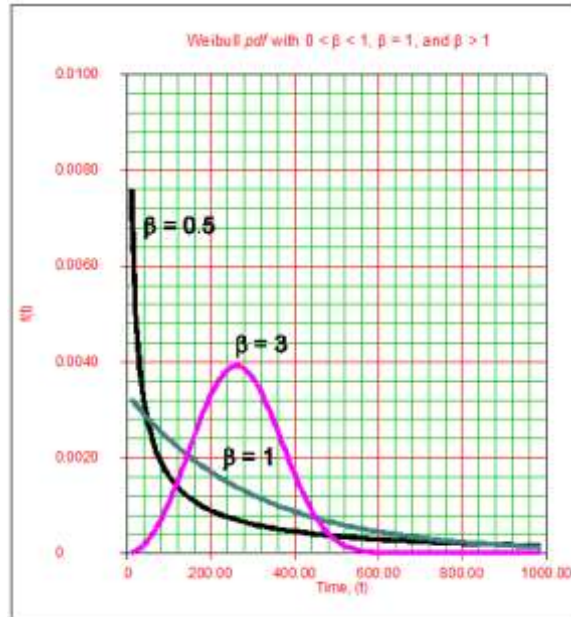


Gráfico 6: Distribuição de Weibull

Fonte: Reliasot

A distribuição de Weibull, gráfico 6, pode ser biparamétrica ou triparamétrica. Na maioria dos casos, a distribuição Weibull é definida como:

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

A distribuição Exponencial, gráfico 7, é uma das distribuições mais simples e mais utilizadas (e frequentemente utilizada de forma indevida por causa da sua simplicidade).

A *pdf* distribuição Exponencial é matematicamente definida como:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

onde:

t é a variável aleatória e representa o tempo.

A letra grega λ (lambda) representa o parâmetro da distribuição.

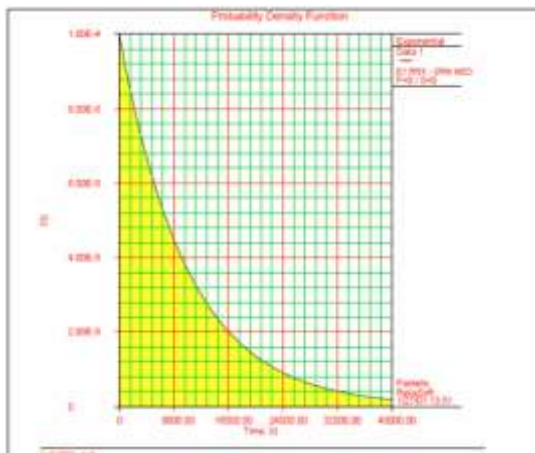


Gráfico 7: Distribuição Exponencial

Fonte: Reliasot

A distribuição lognormal, gráfico 8, é comumente utilizada na análise de confiabilidade em ciclos até a falha por fadiga, resistências de materiais, e no projeto probabilístico com cargas variáveis. Quando o logaritmo natural dos tempos até a falha é normalmente distribuído, então se diz que os dados seguem uma distribuição lognormal.

$$f(T) = \frac{1}{T\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T'-\mu'}{\sigma'}\right)^2}$$

Enquanto a distribuição normal é simétrica, que veremos na sequência, a distribuição lognormal é assimétrica e deslocada para a esquerda, permitindo uma melhor adequação para a modelagem de dados de vida.

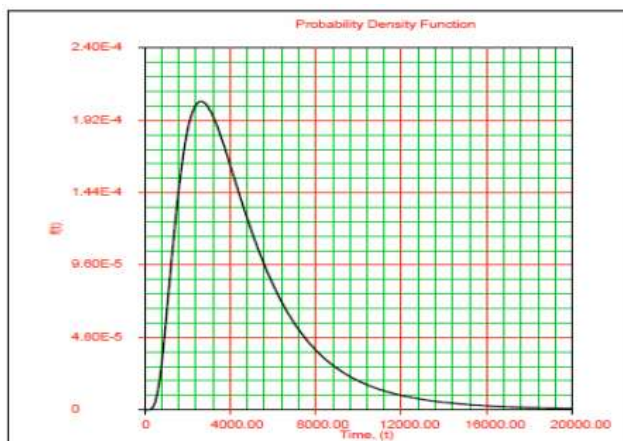


Gráfico 8: Distribuição Lognormal

Fonte: Reliasot

A distribuição normal, gráfico 9, é comumente utilizada na análise de confiabilidade, de tempos até a falha de componentes eletrônicos e mecânicos, equipamentos ou sistemas. A *pdf* da distribuição normal é dada por:

$$f(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

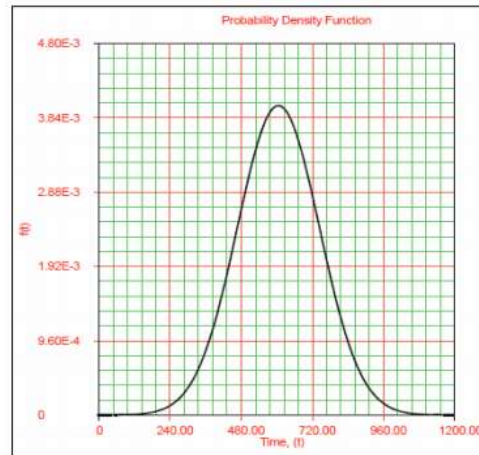


Gráfico 9: Distribuição normal

Fonte: Reliasot

Normalmente é utilizada para componentes ou sistemas que apresentam múltiplos modos de falha. A distribuição Weibull mista, gráfico 10, é aplicada para representar populações mistas com múltiplos modos de falha. Ela mostra a imagem global da vida do produto, misturando diferentes distribuições de Weibull para diferentes estágios da vida do produto, com *pdf* dada por:

$$f(T) = p_1 \cdot f_1(T) + p_2 \cdot f_2(T) + \dots + p_s \cdot f_s(T),$$

$$f(T) = \sum_{i=1}^s p_i \frac{\beta_i}{\eta_i} \left(\frac{T}{\eta_i}\right)^{\beta_i-1} e^{-\left(\frac{T}{\eta_i}\right)^{\beta_i}}$$

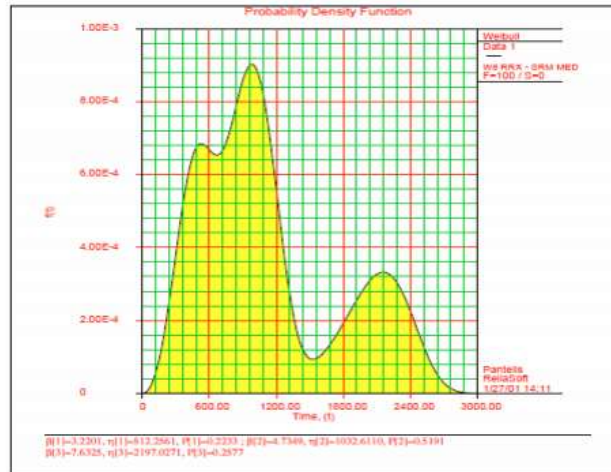


Gráfico 10: Distribuição Weibull Mista

Fonte: Reliasot

A distribuição Gama Generalizada, gráfico 11, não é tão utilizada como as outras distribuições de vida já apresentadas e possui a capacidade de imitar outras distribuições, tais como a Weibull ou a lognormal, dependendo dos parâmetros de sua distribuição. A distribuição gama generalizada possui três parâmetros e sua *pdf* é dada por:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{|\lambda|}{\sigma \cdot t} \cdot \frac{1}{\Gamma\left(\frac{1}{\lambda^2}\right)} \cdot e^{\left[\frac{\lambda \cdot \ln(t) - \mu + \ln\left(\frac{1}{\lambda^2}\right) - e^{\lambda \cdot \frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}}}{\lambda^2} \right]} \\ \frac{1}{t \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)^2} k & \text{if } \lambda = 0 \end{cases}$$

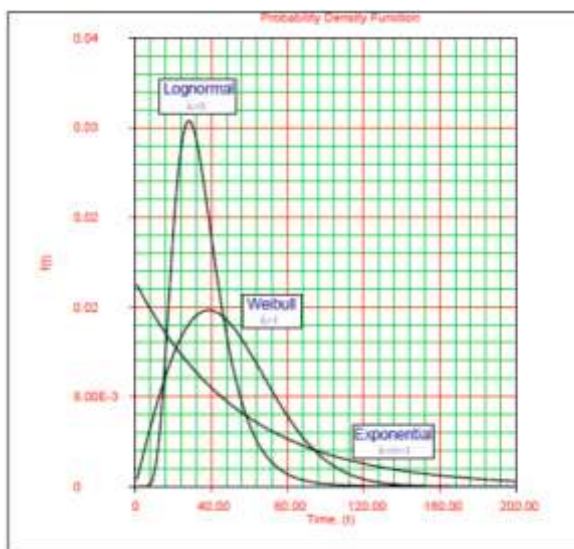


Gráfico 11: Distribuição Gama Generalizada

Fonte: Reliasot

3.7 ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO

A análise de degradação envolve a medição de dados de desempenho que podem estar diretamente relacionados à falha presumida do produto em questão. Muitos mecanismos de falha podem estar diretamente ligados à degradação de parte do produto e a análise de degradação permite ao analista extrapolar para um tempo de falha assumido com base nas medidas de degradação ao longo do tempo.

Oliveira (2011) comenta que nos testes de degradação, a variável observada não é o tempo de falha, mas uma medida de degradação de alguma característica de qualidade do produto de interesse, tomada ao longo do tempo. Esta medida deve estar diretamente relacionada à falha. Além disso, a própria definição da falha deve estar associada à algum nível crítico pré-especificado (limiar de falha ou “*failure threshold*”) da medida de degradação. A principal vantagem da utilização de dados de degradação sobre os dados de tempos de falha (oriundos de testes de vida) é que a análise pode ser feita de maneira satisfatória, ainda que nenhuma falha tenha ocorrido, isto é, mesmo que nenhum dos perfis das unidades sob observação tenha atingido o limiar considerado “falha” durante o período de estudo.

Na literatura duas abordagens básicas para modelagem e análise de dados de degradação podem ser encontradas. A primeira assume que a degradação é um processo aleatório no tempo. Dentro dessa linha, Doksum (1991) utilizou um

processo de Wiener para analisar dados de degradação. Tang e Chang (1995) modelaram dados oriundos de ensaios de degradação acelerados não destrutivos como uma coleção de processos estocásticos. Whitmore e Schenkelberg (1997) modelaram o processo de degradação como um processo de difusão de Wiener.

A Análise de Degradação aplica-se aos casos em que as medidas de degradação ao longo do tempo podem ser obtidas para cada amostra. Uma vez que estes tempos de falha extrapolados são obtidos, é apenas uma questão de analisar os tempos de falha extrapolados da mesma maneira que os dados convencionais de tempo para falhar. Tal como acontece com a análise convencional de dados de vida, a quantidade de certeza nos resultados está diretamente relacionada ao número de amostras testadas. O gráfico 12, combina as etapas da análise, mostrando a extrapolação das medidas de degradação para um tempo de falha e a posterior análise de distribuição desses tempos de falha.

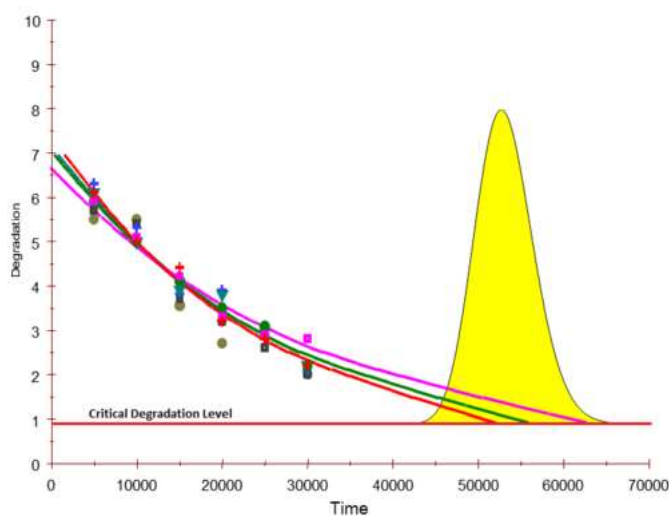


Gráfico 12: Curva de degradação

Fonte: Reliawiki

Os dados de perdas de medidas das rodas, serão analisadas no software Weibull ++ utilizando a análise de degradação.

Os modelos de degradação no software Weibull ++ são:

- Linear: $y = a \cdot x + b$
- Exponencial: $y = b \cdot e^{a \cdot x}$
- Potência: $y = b \cdot x^a$

- Logarítmico: $y = a \cdot \ln(x) + b$
- Gompertz: $y = a \cdot b^{c^x}$
- Lloyd-Lipow: $y = a - \frac{b}{x}$

Para análise dos dados no capítulo 4 será apresentado qual modelo de degradação dos diferentes tipos de rodas, fabricante A e fabricante B..

4 ANÁLISE DOS DADOS

Neste capítulo, será apresentado o custo do ciclo de vida das rodas fundidas e forjadas. Para o cálculo de vida, será utilizado a análise de degradação do software WEIBULL ++. A análise do custo do ciclo de vida será realizada conforme a tabela 4 e 5 do capítulo 3.

4.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS

Os dados necessários na construção do modelo de distribuição de probabilidade e cálculo da vida das rodas foram obtidos da seguinte fonte:

- 1). Coletor de dados dos tornos de rodeiros da casa de rodas.

Todas usinagens de rodeiros nos tornos são coletadas informações sobre os mesmos. Esses dados coletados são extraídos para uma planilha conforme tabela 7.

Data da Usinagem	Ano da Usinagem	Número do Rodeiro	Fabricante	Data de Fabricação	Ano de Fabricação	Friso A	Bandagem A	Friso B	Bandagem B
nov/14	2014	00026B1	B	mai/13	2013	29	57	29	60
jan/15	2015	00026B1	B	mai/13	2013	32	50	31	49
mar/15	2015	00026B1	B	mai/13	2013	29	45	26	45
abr/16	2016	00028B7	B	out/14	2014	30	66	32	68
jul/17	2017	00028B7	B	out/14	2014	23	60	25	60
nov/13	2013	00122B8	A	ago/11	2011	29	64	27	64
nov/14	2014	00122B8	A	ago/11	2011	27	48	27	48
fev/15	2015	00237B4	A	dez/11	2011	24	62	27	62
jan/17	2017	00237B4	A	dez/11	2011	24	48	26	45

Tabela 7: Planilha dos tornos de rodeiros

Fonte: Coletor de dados Casa de rodas

Para validação dos dados foi verificado se as seguintes informações eram iguais:

- 1). Número do eixo.
- 2). Fabricante da roda.
- 3). Data de fabricação da roda.

Validado o dado foi utilizado como premissa que toda roda nova entra em operação com 72 mm de bandagem.

A tabela 8 mostra como os dados foram inseridos na análise de degradação do WEIBULL ++.

Validação	Tempo (Anos)	Bandagem (mm)
00026B1fabricanteB2013	0	72
00026B1fabricanteB2013	1,54	59
00026B1fabricanteB2013	1,70	49,5
00026B1fabricanteB2013	3,05	45
00028B7fabricanteB2014	0	72
00028B7fabricanteB2014	1,57	63
00028B7fabricanteB2014	2,83	51

Tabela 8: Dados validados para análise de degradação

Fonte: Autor

A coluna validação da tabela 8, foi concatenado o número do eixo, o fabricante da roda e o ano de fabricação da roda.

A coluna tempo, o valor 0 (Zero) é a primeira medida de bandagem da roda, neste caso 72 mm (Roda nova).

O segundo valor 1,53 anos é a primeira usinagem da roda e o valor da bandagem 59 mm.

Neste exemplo a roda perdeu 13 mm de bandagem.

4.2 DEFINIÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA

A coleta de dados pode ser precedida do cálculo do tamanho mínimo da amostra necessária para estimar a média ou a proporção. Neste caso deve-se especificar o nível de confiança desejado e o erro aceitável.

A fórmula para definição do tamanho da amostra é dada por:

$$n \geq \frac{N z_c^2 s^2}{\varepsilon^2 (N - 1) + z_c^2 s^2} \cdot$$

, onde

N = tamanho da população; s^2 = estimador para a variância populacional, calculado a partir de uma amostra piloto; z_c = valor crítico correspondente ao nível de confiança desejado; E erro máximo admitido para a estimativa da média.

Os valores de confiança mais utilizados e os valores de Z correspondentes podem ser encontrados na tabela 9.

Grau de confiança	α	Valor crítico $Z_{\alpha/2}$
90%	0,10	1,645
95%	0,05	1,96
99%	0,01	2,575

Tabela 9: Valores críticos associados ao grau de confiança na amostra.

Fonte: cienciasecognicao 2011

O valor crítico utilizado para se calcular o tamanho da amostra desse estudo foi de 95% de confiança.

Para calcular o tamanho da amostra foi estimado a quantidade de rodas fundidas e forjadas existem na frota de vagões, analisando a produção dos tornos de rodeiros por fabricante conforme o gráfico 13.

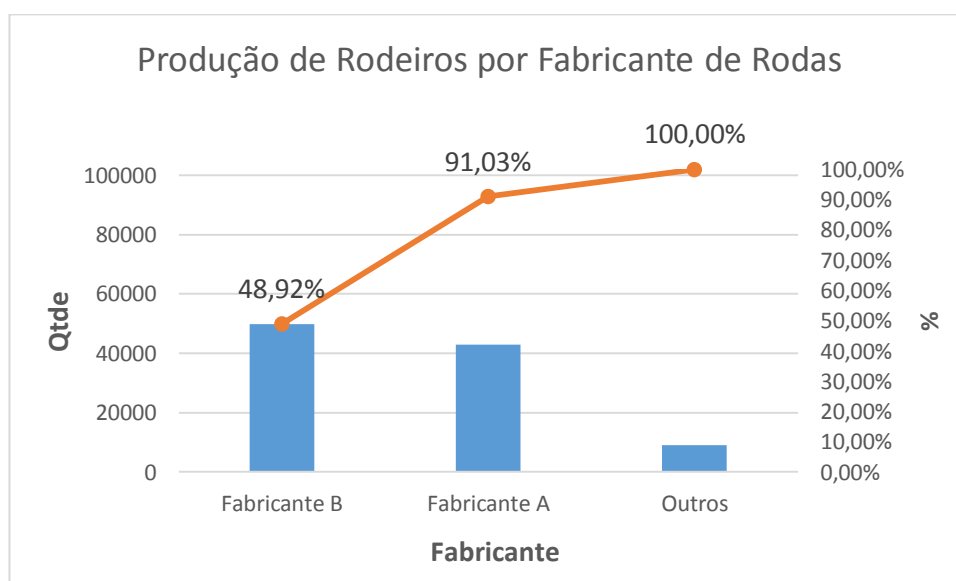


Gráfico 13: Rodas usadas por fabricante

Fonte: Autor

A partir dos dados do gráfico 13, foi extrapolado os valores para a frota de rodas nos vagões.

Tamanho da frota de rodas = 12.712 vagões * 8 rodas = 101.696 rodas.

Portanto a quantidade de rodas na frota de vagões por fabricante considerada para determinação do tamanho da amostra foi a seguinte:

Roda fabricante B: $101.696 \text{ rodas} \times 48,92\% = 49.745$

Roda fabricante A: $101.697 \text{ rodas} \times 42,11\% = 42.820$

A margem de erro utilizada foi de 5%.

A variância foi calculada a partir de uma amostra piloto onde a roda fabricante A é de 11,30 e a roda fabricante B é de 11,13.

Aplicando a fórmula para determinar o tamanho da amostra, se tem os seguintes valores para cada tipo de roda.

Roda fabricante B ≥ 382 .

Roda fabricante A ≥ 382 .

Para análise dos dados de degradação foram utilizados 400 dados de rodas fundidas e 400 dados de rodas forjadas. Os dados foram gerados conforme critérios selecionados e após a validação e com ano de fabricação entre os anos de 2004 á 2014 conforme gráfico 14.

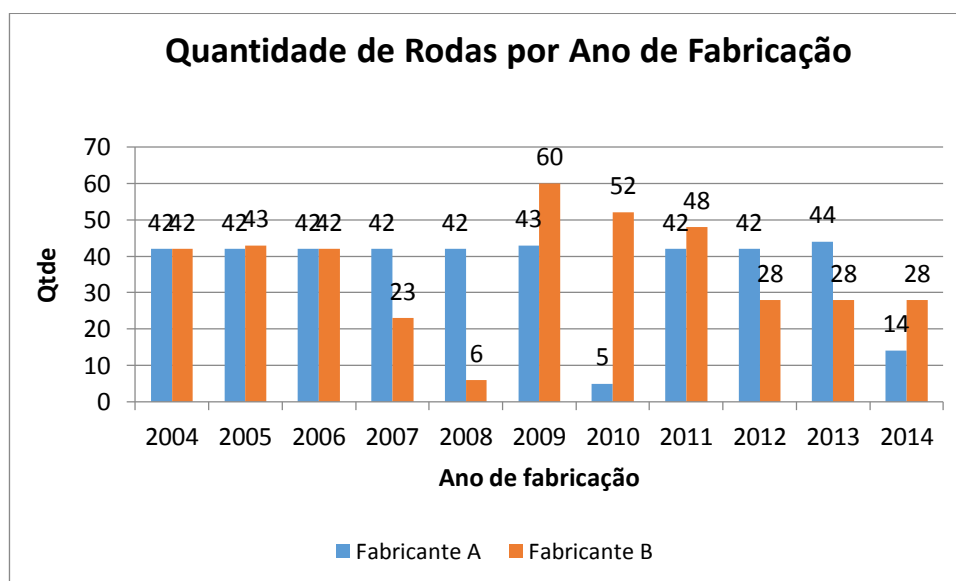


Gráfico 14: Rodas por ano de fabricação para análise de degradação

Fonte: Planilha dos tornos

Após os dados tratados e validados, os mesmos foram inseridos no software WEIBULL ++ para análise.

4.3 ANÁLISE DE VIDA DOS DADOS

Os dados validados e tratados foram inseridos no módulo de análise de degradação do WEIBULL ++.

O melhor modelo de degradação tanto para roda do fabricante A como para o fabricante B é linear conforme figura 24.

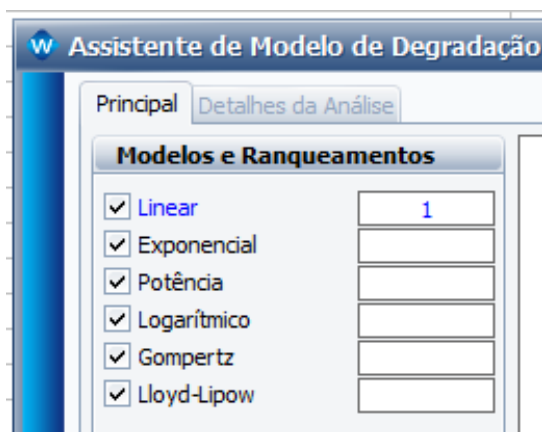


Figura 24: Modelo de degradação das rodas fabricantes A e B..

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

Utilizando o teste de aderência foi verificado que o melhor modelo para as rodas do fabricante A é a WEIBULL 3 parâmetros, para roda do fabricante B é GAMA G, como a WEIBULL 3 parâmetros foi o segundo melhor modelo ranqueado também foi utilizado para as rodas fundidas pois a mesma se adequa a todos os outros modelos de distribuição e dessa forma será possível comparar os parâmetros.

As figuras 25 e 26 mostram o teste de aderência para as rodas dos fabricantes A e B.

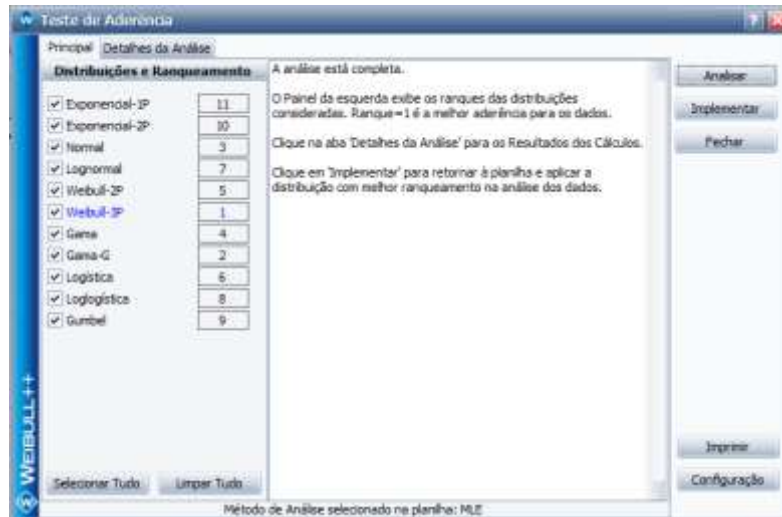


Figura 25: Teste de aderência para roda fabricante A

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

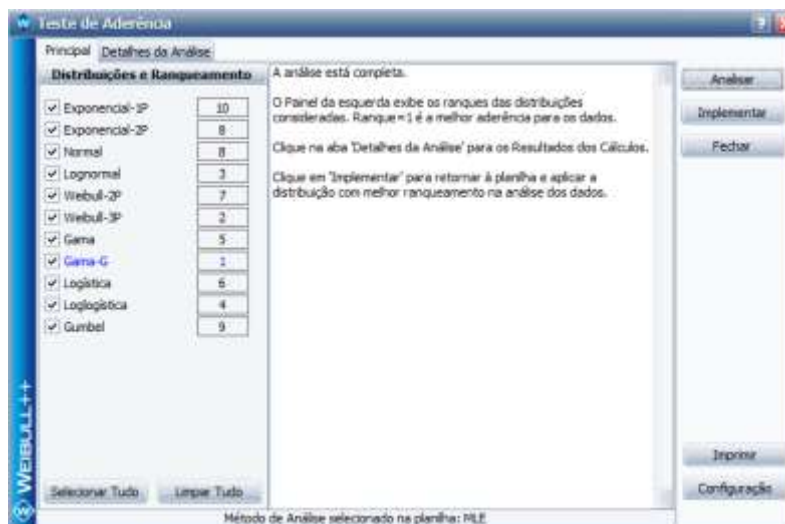


Figura 26: Teste de aderência para roda fabricante B

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

Os parâmetros da WEIBULL são o β (Beta), η (Eta) e γ (Gama).

Análise de cada um dos parâmetros:

1). β (Beta) é o parâmetro de forma ou inclinação, ou seja influência na curva da *pdf*, ($\beta < 1$, significa taxa de falha decrescente ou seja morte prematura, $\beta = 1$ taxa de falha constante e $\beta > 1$ taxa de falha crescente ou seja morte por desgaste ou velhice)

2). η (Eta) é o parâmetro de escala da distribuição Weibull, e tem as mesmas unidades de T , como horas, milhas ciclos, atuações, etc. O η significa que até 63,2% dos dados falham até o seu valor calculado.

3). γ (Gama), é o parâmetro de localização da distribuição Weibull e tem a mesma unidade de T . O γ (Gama) positivo significa que até o valor calculado a confiabilidade é de 100%.

A tabela 10 mostra os valores dos parâmetros das rodas dos fabricantes A e B.

Parâmetros	Fabricante A	Fabricante B
Beta	2,80	1,61
Eta (Ano)	10,25	6,59
Gama (Ano)	3,42	3,60

Tabela 10: Parâmetros das rodas fabricantes A e B.

Fonte: Autor (WEIBULL)

A partir dos parâmetros das distribuições de WEIBULL é possível gerar as curvas de degradação, confiabilidade, a *pdf* e a vida de cada tipo de roda.

A degradação crítica das rodas ferroviária é quando a bandagem chega a 19mm, ou seja, quando a roda chega com essa medida a mesma é sucateada.

Os gráficos 15 e 16 mostram as curvas de degradação das rodas dos fabricantes A e B. A partir dessas curvas é possível projetar a demanda de roda futuras.

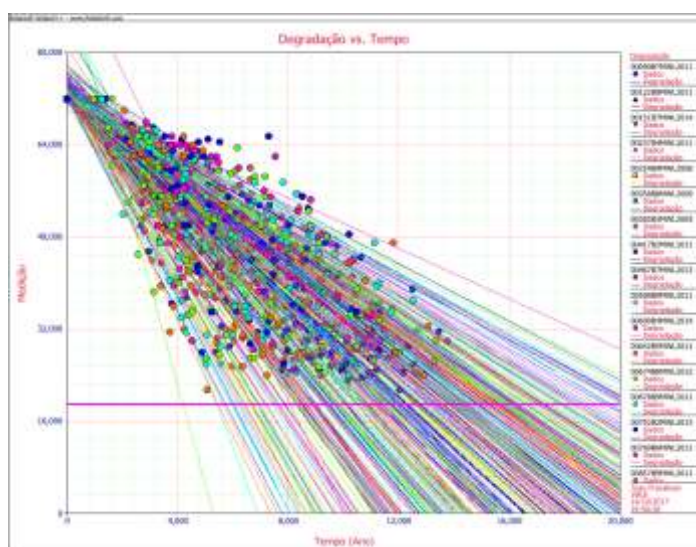


Gráfico 15: Curva de degradação da roda fabricante A.

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

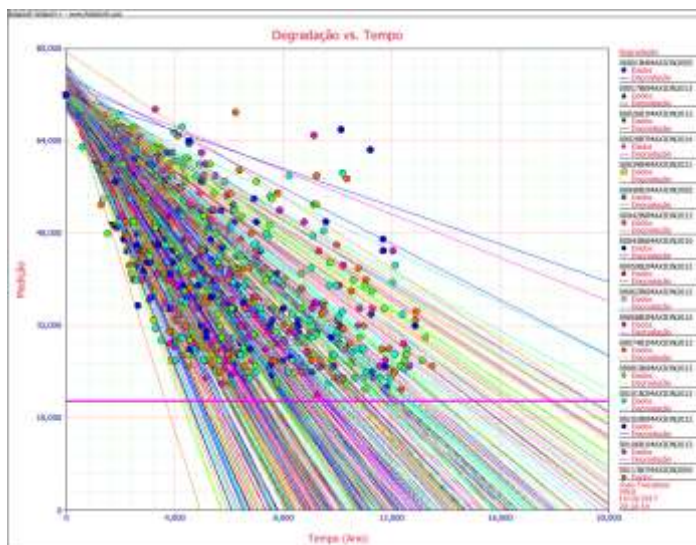


Gráfico 16: Curva de degradação da roda fabricante B

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

Os gráficos 17 e 18 mostram as curvas de confiabilidade das rodas. É possível observar que a curva da roda forjada começa a partir de 3,42 anos e da roda fundida a partir de 3,60 anos que são os valores de γ (Gama), ou seja a confiabilidade até os valores citados antes é de 100%.

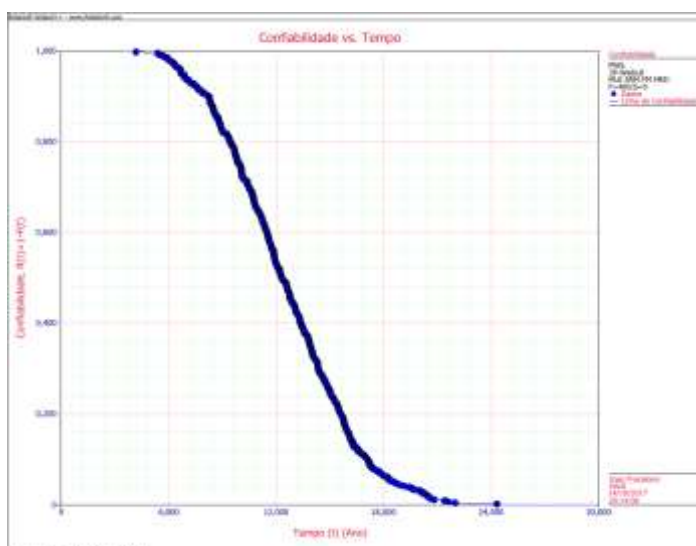


Gráfico 17: Curva de confiabilidade da roda fabricante A.

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

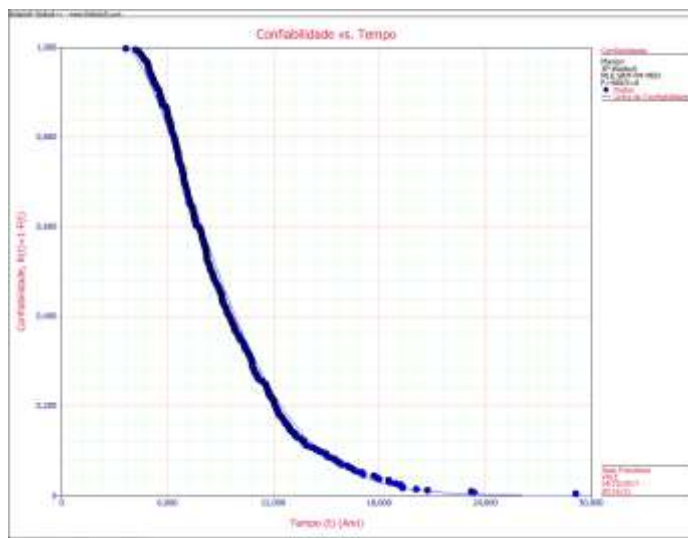


Gráfico 18: Curva de confiabilidade da roda fabricante B.

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

Os gráficos 19 e 20 mostram a *pdf* que a partir delas é possível calcular a vida de cada fabricante de roda. Assim como na curva de confiabilidade as curvas da *pdf* iniciam-se a partir de 3,42 anos para roda forjada e de 3,60 anos para roda fundida que são os valores de γ (Gama), ou seja as falhas iniciam a partir desses valores.

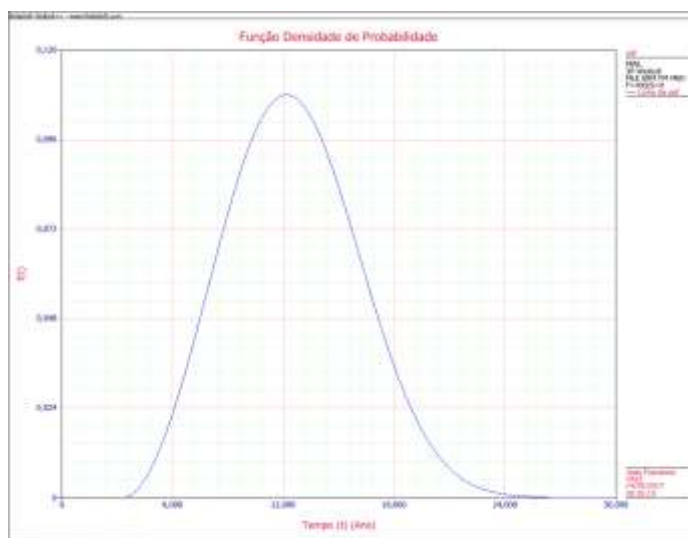


Gráfico 19: *pdf* roda fabricante A.

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

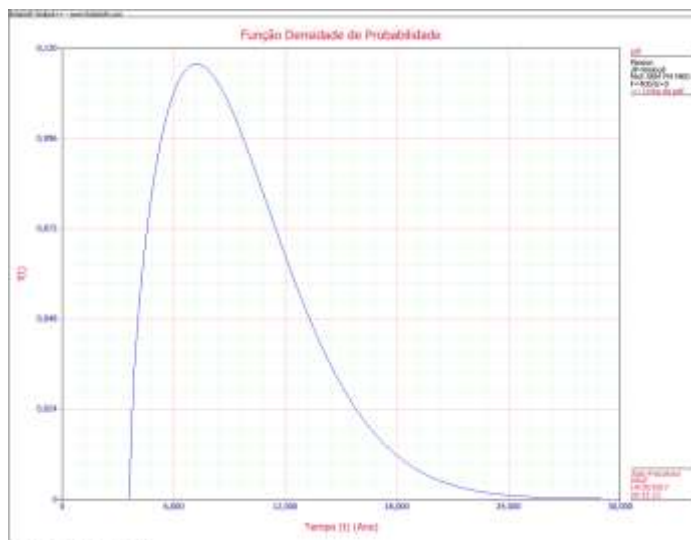


Gráfico 20: pdf roda fabricante B.

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

Utilizando a calculadora (QCP) no WEIBULL ++ verifica-se que a vida média para cada fabricante de roda para um nível de confiança de 95%, conforme tabela 9.

As figuras 22 e 23 mostram a calculadora (QCP) do WEIBULL ++ que gera a vida média.

Vida Média	Fabricante A	Fabricante B
Limite Superior	12,92	9,91
Vida Média	12,55	9,50
Limite Inferior	12,18	9,12

Tabela 11: Vida em anos das rodas fabricantes A e B

Fonte: Autor (WEIBULL)

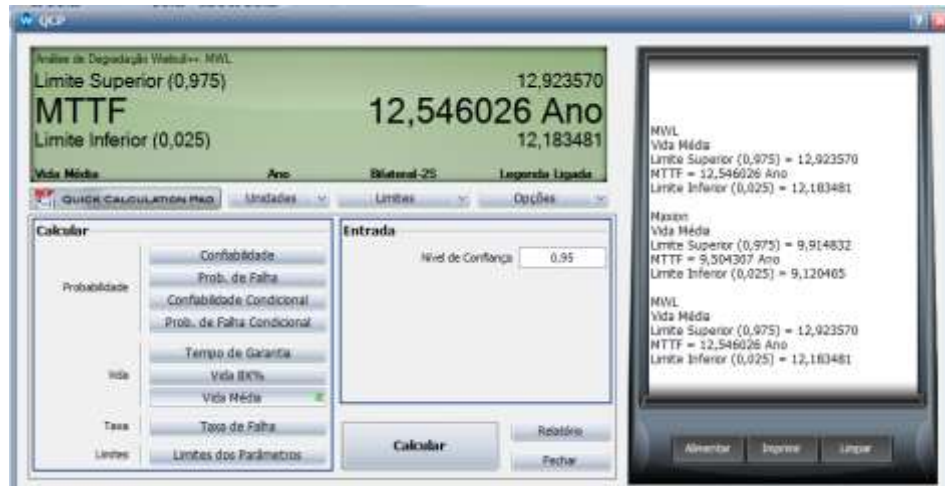


Figura 27: Cálculo da vida média roda fabricante A.

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

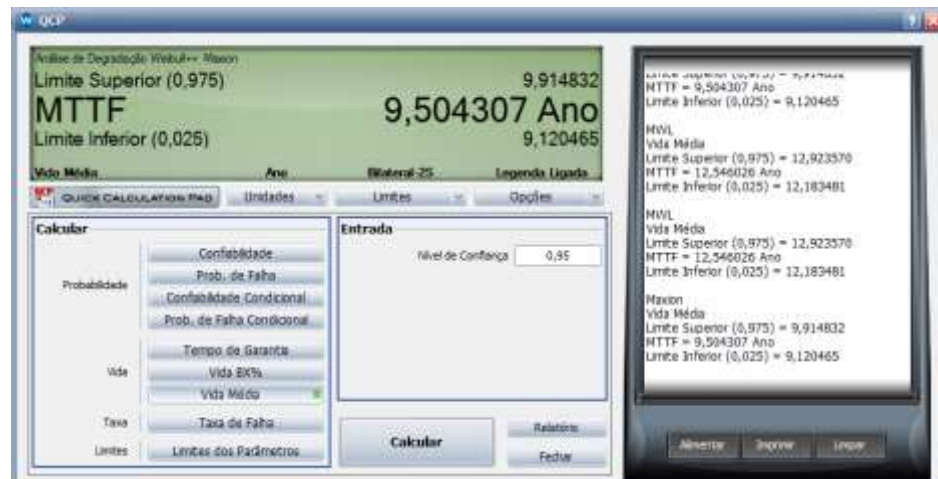


Figura 28: Cálculo da vida média roda fabricante B.

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

Os gráficos 21 e 22 mostram a diferença entre a vida média da roda do fabricante A em relação a vida média roda do fabricante B e a diferença entre o limite inferior da roda do fabricante A em relação ao limite superior da roda do fabricante B respectivamente.

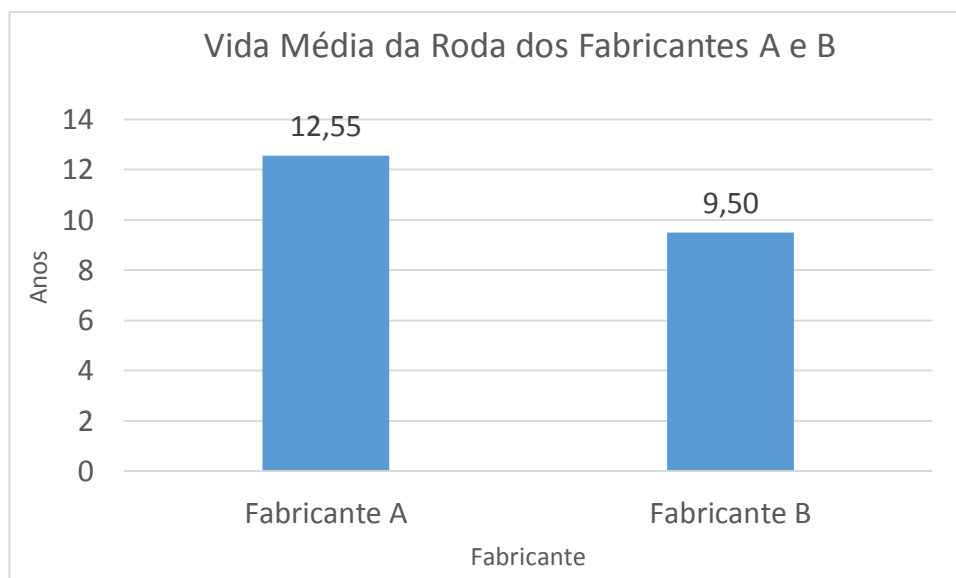


Gráfico 21: Vida média da roda dos fabricantes A e B.

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

Para um nível de confiança de 95% a roda do fabricante A tem uma vida média 32,11% maior em relação a vida média da roda do fabricante B.

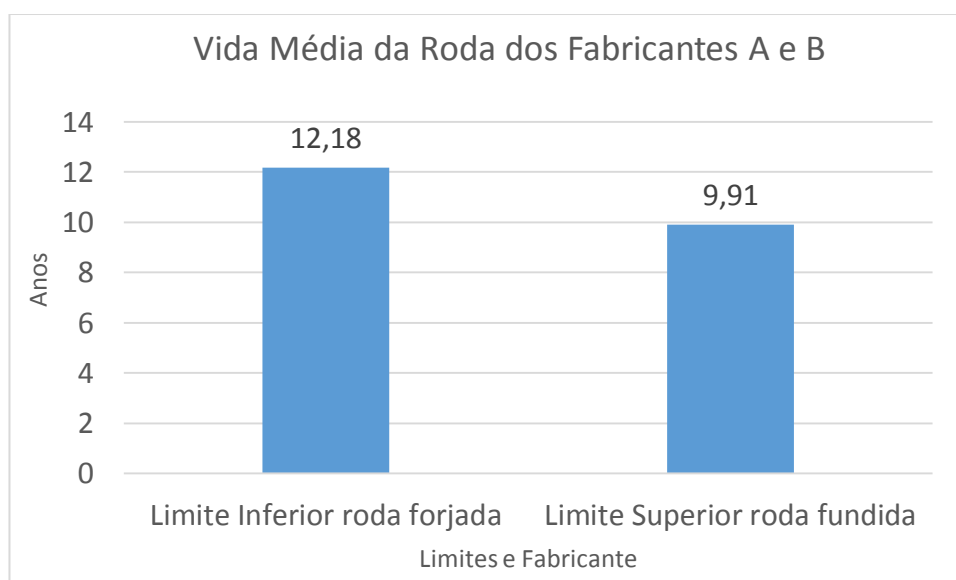


Gráfico 22: Limite inferior da roda do fabricante A e limite superior da roda do fabricante B.

Fonte: Autor (WEIBULL ++)

Para um nível de confiança de 95% a roda do fabricante A tem uma vida média com limite inferior 22,91% maior em relação a vida média da roda do fabricante B com limite inferior.

4.4 ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA

Conhecida a vida média de cada fabricante de roda é possível fazer uma análise simples do custo do ciclo de vida a partir do custo de aquisição de cada fabricante de roda e fazendo uma relação entre o custo de aquisição e a vida média.

Fabricante	Vida Média (Anos)	Preço de Compra	Relação Preço/Vida Média (R\$/Anos)
Fabricante A	12,55	R\$ 3.000,00	R\$ 239,04
Fabricante B	9,50	R\$ 2.498,17	R\$ 262,97

Tabela 12: Comparação entre a vida média, preço de compra

Fonte: Autor

É possível observar na tabela 12, que apesar da roda do fabricante B ter um menor custo de aquisição, tem um custo benefício inferior em relação a roda forjada.

Uma análise mais detalhada do custo de ciclo de vida entre os fabricantes de roda é utilizando os parâmetros da tabela 6, que são:

- 1). Custo de aquisição;
- 2). Vida média em anos;
- 3). Frequência de usinagem;
- 4). Custo de usinagem/re-usinagem;
- 5). Custo de substituição;
- 6). Revenda como sucata.

O custo de aquisição e a vida média serão utilizados os valores da tabela 9.

A frequência de usinagem foi estimada da seguinte forma:

Por meio dos dados da tabela 7, foi verificado a quantidade de usinagens realizada por rodeiros e o tempo da última usinagem. A partir desses dados foi realizada a relação entre o tempo da última usinagem e a quantidade de usinagens conforme o exemplo a tabela 13.

Fabricante	Quantidade de usinagens	Tempo da última usinagem (Anos)	Relação entre tempo da última usinagem e quantidade de usinagens
00085B7fabricante A2011	3	5,74	1,91
00090B7fabricante A2011	4	5,26	1,32
00151B7fabricante A2014	3	3,44	1,15
00004B8fabricante B2012	3	3,77	1,26
00033B7fabricante B2013	3	3,80	1,90
00041B0fabricante B2013	3	3,89	1,95

Tabela 13: Relação entre o tempo da última usinagem e quantidade de usinagens

Fonte: Autor

Para calcular a média entre usinagens dos diferentes tipos de fabricantes de rodas foi plotado um *BOX PLOT* para excluir os *outliers* e a partir daí utilizar o valor da média.

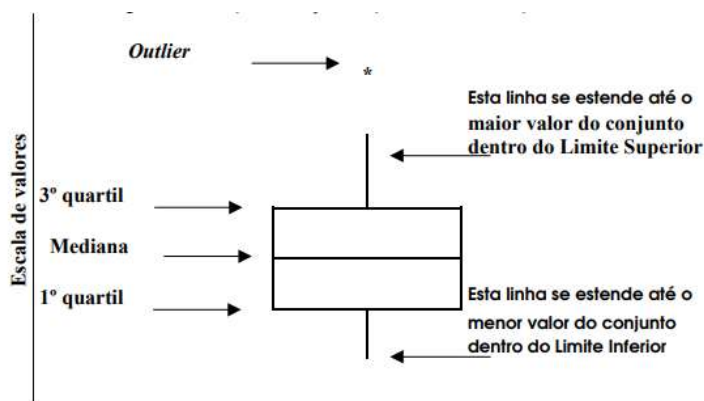


Figura 29: Figura esquemática do boxplot

Fonte: Reis (2002)

O gráfico 23 mostra o boxplot dos diferentes tipos de fabricantes de rodas com os outliers.

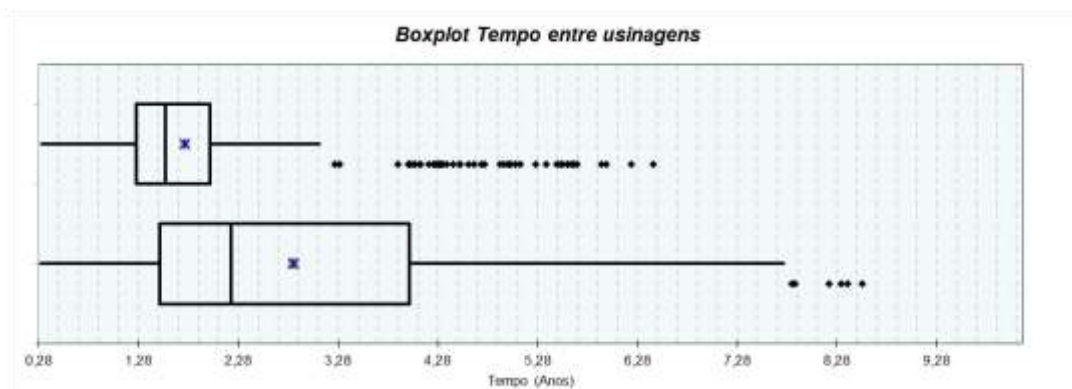


Gráfico 23: Boxplot do tempo entre usinagens da roda dos fabricantes A e B

Fonte: Planilha dos tornos

Após exclusão dos outliers a média entre usinagens das rodas forjadas e fundidas são respectivamente:

Roda fabricante A = 2,80 anos

Roda fabricante B = 1,60 anos

Variável	Número de Dados	Média
Fabricante A com outliers	7466	2,83
Fabricante B com outliers	9543	1,75
Fabricante A sem outliers	7423	2,80
Fabricante B sem outliers	9022	1,60

Tabela 14: Tempo médio entre usinagens

Fonte: Planilha dos tornos

O custo de usinagem, o custo de substituição e o custo de revenda são os mesmos para os diferentes tipos de rodas, pois os materiais utilizados e o tempo de usinagem tanto para roda dos fabricantes A e B são iguais e os valores de revenda também são iguais, portanto para a avaliação do custo do ciclo de vida entre os diferentes tipos de rodas tem como premissa o mesmo valor do custo de usinagem, custo de substituição e valor de revenda.

As tabelas 15 e 16 mostram os custos de uma roda no período de 10 anos.

Foi considerado um custo de usinagem de R\$ 100,00 e um reajuste anual de

5%

Anos	Custo de aquisição	Custo de usinagem	Subtotal	Subtotal acumulado
0	R\$ 3.000,00		R\$ 3.000,00	R\$ 3.000,00
1			R\$ -	R\$ 3.000,00
2		R\$ 100,00	R\$ 110,25	R\$ 3.110,25
3			R\$ -	R\$ 3.110,25
4			R\$ -	R\$ 3.110,25
5		R\$ 100,00	R\$ 127,63	R\$ 3.237,88
6			R\$ -	R\$ 3.237,88
7			R\$ -	R\$ 3.237,88
8		R\$ 100,00	R\$ 147,75	R\$ 3.385,62
9			R\$ -	R\$ 3.385,62
10			R\$ -	R\$ 3.385,62
Custo total			R\$ 3.385,62	

Tabela 15: Subtotal atualizado para os custos de uma roda do fabricante A

Fonte: Autor

Anos	Custo de aquisição	Custo de usinagem	Subtotal	Subtotal acumulado
0	R\$ 2.498,17		R\$ 2.498,17	R\$ 2.498,17
1		R\$ 100,00	R\$ 105,00	R\$ 2.603,17
2			R\$ -	R\$ 2.603,17
3		R\$ 100,00	R\$ 115,76	R\$ 2.718,93
4			R\$ -	R\$ 2.718,93
5		R\$ 100,00	R\$ 127,63	R\$ 2.846,56
6			R\$ -	R\$ 2.846,56
7		R\$ 100,00	R\$ 140,71	R\$ 2.987,27
8			R\$ -	R\$ 2.987,27
9	R\$ 3.875,48		R\$ 6.012,14	R\$ 8.999,41
10		R\$ 100,00	R\$ 162,89	R\$ 9.162,30
Custo total			R\$ 9.162,30	

Tabela 16: Subtotal atualizado para os custos de uma roda do fabricante B

Fonte: Autor

Em um período de 10 anos o custo acumulado da roda do fabricante A é de R\$ 3.383,62 e os custos da roda do fabricante B é de R\$ 9.162,34.

O gráfico 24 mostra o momento em que a roda do fabricante A fica mais viável que a roda do fabricante B.

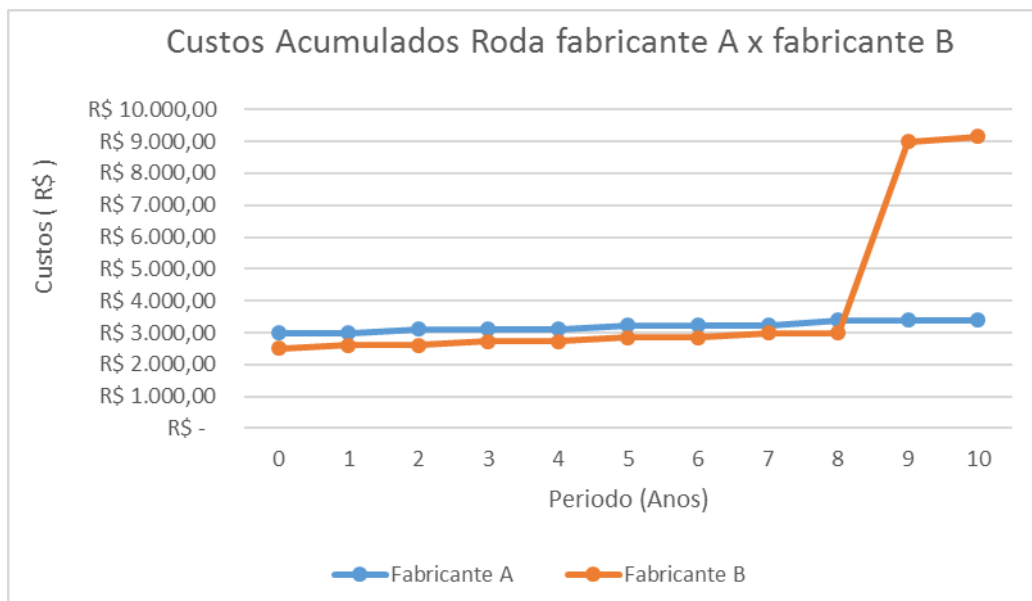


Gráfico 24: Custo acumulado do ciclo de vida da roda

Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado mostrou uma visão geral do que é uma roda ferroviária, informando sua composição química, os processos de fabricação e os tipos de defeitos.

Foi realizada análise de degradação no software WEIBULL ++ para avaliar a vida média de dois tipos de fabricante de rodas e avaliação do custo do ciclo de vida.

Na avaliação simplificada entre os tipos de rodas verificou-se que a roda do fabricante A tem um melhor custo benefício em relação à roda do fabricante B de 9,16%, conforme a tabela 12 no capítulo 4.

Em uma avaliação um pouco mais detalhada a roda do fabricante A também tem um melhor custo benefício em relação à roda do fabricante B de 70,78%% em um período de 10 anos, conforme tabelas 15, 16 e gráfico 24 do capítulo 4.

Quanto aos objetivos gerais os gráficos 21 e 22 do capítulo 4 mostram que a roda do fabricante A tem uma vida média maior em relação à roda do fabricante B de 32,11%.

É possível através da análise de degradação projetar demanda futuras sendo mais assertivos nos orçamentos.

Em relação à taxa de desgaste considerando que toda roda nova entra em operação com 72 mm de bandagem e são sucateadas com 19 mm de bandagem.

Taxa de desgaste roda fabricante A = $(72 \text{ mm} - 19 \text{ mm}) / \text{vida média } 12,55 = 4,22 \text{ mm/ano}$.

Taxa de desgaste roda fabricante B = $(72 \text{ mm} - 19 \text{ mm}) / \text{vida média } 9,50 = 5,58 \text{ mm/ano}$.

A roda do fabricante A tem uma taxa de desgaste média menor em 24,37% em relação à roda do fabricante B.

As principais dificuldades para realização do trabalho foram a coleta da base de dados e os custos de manutenção de uma roda.

Considerando as dificuldades encontradas no trabalho existe oportunidade de fazer um estudo mais detalhado em relação aos custos de manutenção da roda e aprofundar mais no custo do ciclo de vida.

Para esta monografia foi realizada a comparação apenas entre rodas dos fabricantes A e B. Para trabalhos futuros serão avaliados também se a roda é

microligada, se foi utilizado com calço de borracha. São alguns fatores que existem suspeitas que a vida da roda se prolongue.

REFERÊNCIAS

AAR – ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD. M-107/M-208: Manual of Standards and Recommended Practices Wheels and Axles – Section G. Washington, 2014.

ALMEIDA, Leandro Prates Ferreira, **Estudo do Desgaste por Deslizamento de Pares Metálicos Empregados no Contato Roda Trilho**. 132p. Dissertação – Engenharia Mecânica, UFES – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2016.

BARRINGER, H. Paul. **A Life Cycle Cost Summary**. Perth, Austrália: Maintenance Engineering Society of Australia, 2003.

BELLODI, Guilherme Colletes. **Otimização do Intervalo entre Reperfilamento das Rodas dos Vagões da Estrada de Ferro Carajás**. Belo Horizonte – MG, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2010.

BUSHAN, Bharat, **Modern Tribology Handbook**. Volume one: principles of tribology. Department of Mechanical Engineering, Ohio State University. Columbus, Ohio – 2001.

COLE, R. J.; STERNER, E. Reconciling theory and practice of life-cycle costing, Building Research & Information. London, v. 28, p. 368-375, 2000.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderurgicos Comuns**. Revisão Técnica André Luis V. da Costa e Silva. 4ª edição. São Paulo. Edgard Blucher, 2008. 639p.

CHAVES, Ana Paula Gonçalves, **Rodas Ferroviárias: Análise, Microestrutura e Proposta de Melhoria**. 113p. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, São Paulo 2017.

DALMASO, Alanderson. **Análise de Vida em Motores de Tração Corrente Continua das Locomotivas na EFVM**. 70p. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Elétrica, Novo Milênio, Vila Velha 2010.

DOKSUM, K. A. (1991). **Degradation Rate Models for Failure Time and Survival data**.

DOMICIANO, Carlos Luiz, **Estudo Comparativo da Política de Manutenção para Rodeiros de Locomotivas**. 97p. Graduação em Engenharia de Produção, UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2014.

FERREIRA, Julio Cesar, **Análise de Degradação para Amostras sob Diferentes Condições de Uso: um Estudo de Caso em Rodas de Trens Ferroviários**. 33p. Dissertação de Mestrado, Engenharia de Produção, UFMG – Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

FREITAS, Isaias Moreira, **Análise de Propriedades e Metalografia de Rodas Ferroviárias Microligadas**. 109p. Dissertação – Engenharia Metalúrgica, IFES – Instituto Federal do Espírito Santo. Vitória, 2015.

GLUCH, P.; BAUMANN, H. **The life cycle (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making**. Building and Environment, S.I., v. 39, p. 571-580, 2004.

GOOGLE. Iron Ore Índices, 2017. Disponível em: <<http://www.mbironoreindex.com/>>. Acesso em: 21 set. 2017, 20:50.

GUIMARÃES, Inácio Andrusk, **Estatística**, 151p, 2017.

JUNIOR GONÇALVES, Jairo José Modesto, RIBEIRO, Marcos Valério, FRANCO Bruno Chaves, **Custo de Manutenção de Ativos Numa Óptica Operacional e Estratégica no Ambiente Industrial**. 14p. Artigo

Manual Técnico de Vagões. 237p. 2017

MARSHALL, H. E.; PETERSEN, S. R. **Life-Cycle Costing** in: MCGRAW-HILL, INC. Mechanical estimating guidebook for building Construction. 6 ed. S.I., 1995. Capítulo 27. p. 407-417.

MATOS, Paulo Zaleski, ZOTTI, Daiane Mara, **Análise de Confiabilidade Aplicada a Indústria para Estimções de Falhas e Provisionamento de Custos**. 59p. Trabalho de Conclusão de Curso, Estatística, UTFPR – Universidade Técnica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

NAKAGAWA, M. **Gestão estratégica de custos: conceitos, sistemas e implementação**. São Paulo: Atlas, 2000.

Neto, Adegemor Lima, **O Desgaste de Roda e o Processo de Reperfilamento**. 62p. Especialização em Transporte Ferroviário de Carga, IME – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006.

OLIVEIRA, Alisson, **Plano Diretor de Manutenção Ferroviária 2017-2023 Vagões**. 56p. Documento Técnico.

OLIVEIRA BRAGA, Rivert Paulo, **Uma Abordagem Bayesiana para Modelos de Degradação: a Obtenção da Distribuição Preditiva a Posteriori dos Tempos de Falha de Unidades Amostrais Futuras e sob Teste**. 146p. Pós Graduação em Engenharia de Produção, UFMG – Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

PAI DAL MIO, Leonardo Rafael, **Estudo do Ciclo de Vida de um Motor A Diesel de Locomotivas**. 136p. Especialização em Engenharia de Confiabilidade Aplicada a Manutenção, UTFPR – Universidade Técnica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

Profillidis, V.A. (2001). **The Mechanical Behaviour of the Railway Sleeper**, Rail International, 1, 25-33. Selig, E. T., Waters, J. M., (1994) Track geotechnology and substructures Management. Thomas Telford Services Ltd., Londres, 79.

REIS VIANA, Mateus Henrique, PONTES JAGUARIBE, Heraclito Lopes, ADRIANO, Felipe Facanha, **Proposta de Análise para o Custo do Ciclo de Vida de Rodas Ferroviárias para Escolha do Fornecedor**. 14p. In: XXXI Congresso de Engenharia de Produção, Belo Horizonte, 2011.

REIS, Edna Afonso, REIS, Ilka Afonso, **Análise Descritiva de Dados**, 64p. Estatística, UFMG – Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

RELIASOFT, **Fundamentos da Engenharia de Confiabilidade, Análise de Dados e Modelagem Estatística**, G400.

RELIaweKI. **Life Data Analysis**, 2017. Disponível em: <http://www.reliawiki.org/index.php/Main_Page>. Acesso em: 5 set. 2017, 21:15.

RELIaweKI. **Degradation Data Analysis**, 2017. Disponível em: <http://reliawiki.org/index.php/Degradation_Data_Analysis>. Acesso em 5 set. 2017, 21:45.

RIBEIRO, Fernando Sgavioli, BERNUCCI, Liedi Bariani, COSTA, Robson Correia, MOURA, Edson, **Análise do Custo do Ciclo de Vida do Lastro Ferroviário na Estrada de Ferro Vitória Minas**. 13p. Artigo

SANTO, Francisco de Carvalho. **Análise de Contato Roda Trilho e Sua Influência na Vida em Serviço de Rodas Ferroviárias**. Campinas – SP. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2000.

SANTOS, A. A.; RODRIGUES FILHO, F. **Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor em Rodas Ferroviárias**. In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM/97. Bauru – SP. 1997.

SISDELLI, Armando, **Estudos de Desgastes de Rodas e suas Consequências nos Materiais Rodantes e na Via Permanente**. 124p. Monografia – Especialização em Transporte Ferroviário de Carga, IME – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006.

STACHOWIAK, G. W. **Wear – Materials, Mechanisms and Practice**. John Wiley & Sons, Inglaterra, 2006.

VILLAS BOAS, R. L.; CUNHA, A. P. A.; FONSECA, S. T.; SILVA, M. H.; MEI, P. R. **Efeitos da Adição do Nióbio e Molibdênio em Aço 0,7% C para Fabricação de Rodas Ferroviárias**: In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM 2010. Campina Grande, 2010.