

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

RAFAEL AZEVEDO GRIPP

**OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE
ROLAMENTOS FERROVIÁRIOS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2017

RAFAEL AZEVEDO GRIPP

**OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE
ROLAMENTOS FERROVIÁRIOS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano

CURITIBA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Especialização em Engenharia da Confiabilidade



TERMO DE APROVAÇÃO

OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE ROLAMENTOS FERROVIÁRIOS

por

RAFAEL AZEVEDO GRIPP

Esta monografia foi apresentada em 22 de janeiro de 2018, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
Membro Titular da Banca - UTFPR

RESUMO

GRIPP, Rafael Azevedo. **Otimização do ciclo de manutenção preventiva de rolamentos ferroviários**. 2017. 80. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Com a aplicação dos conceitos da engenharia de confiabilidade é possível realizar estudos de otimização de custos que além de ser objetivo deste trabalho é um dos principais pilares de qualquer empresa em um cenário competitivo. O paradigma de que somente manutenções preventivas oferecem menores custos deve ser analisada caso a caso. Para mancais de rolamento ferroviário foram analisados mais de 20 mil dados de manutenção, a base de informação utilizada foi o controle de desmontagem de mancais e envio para inspeção e relubrificação por motivo corretivo ou preventivo. Também foi avaliada a taxa de sucateamento para diferentes grupos com tempos distintos de operação para verificar a influência do tempo nos índices de sucateamento. As curvas de confiabilidade dos dados de manutenção mostraram que a estratégia de manutenção atual dos mancais de rolamento dos vagões de minério da EFVM é predominantemente corretivo com aproximadamente 80% dos rolamentos sendo removidos por alguma anormalidade antes do plano preventivo de 78 meses. Mesmo com capacidade de projeto diferente, os comportamentos das curvas de confiabilidade para manutenção são similares e baseado nessas curvas e no resultado dos índices de sucateamento foi possível avaliar que a estratégia atual para mancais de rolamento apresenta menor custo em comparação aos outros períodos do estudo.

Palavras-chave: Mancal. Rolamento. Ferroviário. Otimização. Custo.

ABSTRACT

GRIPP, Rafael Azevedo. **Otimização do ciclo de manutenção preventiva de rolamentos ferroviários.** 2017. 80. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

With reliability engineering concepts it is possible to study cost optimization, that is the objective of this work and one of the main pillars of any company in a competitive scenario. The paradigm that only preventive maintenance can offers lower costs should be analyzed case-by-case. More than 20 thousand maintenance data from railroad bearings were analyzed (from corrective and preventive reasons). To verify the influence of time on the scrap rate, bearing samples were also evaluated for different groups with different operating times. Maintenance reliability curves have shown that the current maintenance strategy for EFVM ore wagons is predominantly corrective with approximately 80% of the bearings being removed for some abnormality before the 78-month preventative periodic plan. Even with different design capacity, the behavior of maintenance reliability curves is similar. Based on reliability and scrap rates it was possible to evaluate that the current strategy for bearings presents lower cost compared to the other periods of the study.

Palavras-chave: Railroad Bearing. Preventive. Maintenance. Cost. Optimization

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 Principais produtos básicos exportados	14
Figura 1.2 Vagão tipo GDE para transporte de minério de ferro	15
Figura 1.3 Sistema de descarga do tipo cardumper	15
Figura 1.4 Truque ferroviário e rodeiro ferroviário	16
Figura 1.5 Mancal de rolamento ferroviário	16
Figura 1.6 Etapas da análise do custo do ciclo de vida.....	20
Figura 1.7 Sequência de etapas do trabalho.....	21
Figura 2.1 Mancal de rolamento com rolos esféricos e efeito autocompensador	23
Figura 2.2 Mancal de rolamento com rolos cônicos	24
Figura 2.3 Componentes do mancal de rolamento com rolos cônicos	25
Figura 2.4 Detalhe da montagem e nomenclatura dos componentes	26
Figura 2.5 Tensões de compressão do contato entre os componentes	27
Figura 2.6 Tensões cisalhantes devido ao contato entre os componentes	27
Figura 2.7 Evolução da degradação.....	28
Figura 2.8 Nucleação e evolução do defeito superficial	28
Figura 2.9 Exemplo de degola da manga do eixo	32
Figura 2.10 Distribuição dos locais de monitoramento de mancais de rolamento	32
Figura 2.11 Sistema detector de rolamento aquecido - Hotbox.....	33
Figura 2.12 Sistema detector acústico	33
Figura 2.13 Inspeção dinâmica sensível em Resplendor	34
Figura 2.14 Inspeção sensível manual do mancal de rolamento.....	34
Figura 2.15 Desempenho teórico e esperado com reparos.....	35
Figura 2.16 Fluxo das tarefas da manutenção do mancal de rolamento ferroviário	36
Figura 2.17 Exemplos do processo de inspeção dos componentes.....	37
Figura 2.18 Folha de dados dos fabricantes com tolerâncias e pontos de inspeção	37
Figura 2.19 Utilização do gabarito indicado na norma para classificação dos defeitos	38
Figura 2.20 Exemplo de polimento e desbaste da capa.....	38
Figura 2.21 Equipamento desenvolvido para teste e cone testado	39
Figura 3.1 Taxas de falhas características	41
Figura 3.2 Proporção dos tipos de manutenção relacionado com custo	42
Figura 3.3 Relação do custo com o tempo entre manutenções	43
Figura 3.4 Taxas de falhas características e relação com β	45
Figura 3.5 Influência de β sobre taxa de falhas e sobre a confiabilidade ($t_0=0$ e $\eta =1$)	46
Figura 3.6 Influência de η sobre taxa de falhas e sobre a confiabilidade ($\beta =3$ e $\gamma =0$)	46
Figura 3.7 Exemplo de construção da curva da função densidade de probabilidade.....	47
Figura 3.8 Relação entre $f(t)$, $F(t)$ e $R(t)$	47

Figura 3.9 Influência de β sobre taxa de falhas e sobre a pdf ($t_0=0$ e $\eta =1$)	48
Figura 3.10 Evolução do dano para um componente similar.....	48
Figura 3.11 Exemplo de um conjunto de dados completos suspensos.....	49
Figura 3.12 Representação gráfica da derivada em diferentes pontos	50
Figura 3.13 Fluxo das etapas para estudos de minimização do custo	51
Figura 3.14 Conceitos da Produção Enxuta	53
Figura 4.1 Distribuição típica da vida de mancais	55
Figura 4.2 Curva da taxa de falhas para mancais ferroviários	56
Figura 4.3 Probabilidade acumulada de falhas	58
Figura 4.4 Função de distribuição de falhas - todos os lotes.....	59
Figura 4.5 Comparação das curvas de Weibull bi e tripamétrica	60
Figura 4.6 Dados censurados em intervalo	61
Figura 4.7 Resultado do teste de aderência do software Weibull++	63
Gráfico 1.1 Divisão do orçamento de manutenção para vagões de minério EFVM ..	19
Gráfico 1.2 Motivo de retirada de vagões de circulação – por sistema	20
Gráfico 2.1 Causa das falhas em mancais de rolamento	29
Gráfico 2.2 Causa das falhas em mancais de rolamento	29
Gráfico 2.3 Principais causas de falhas em mancais de rolamento	30
Gráfico 2.4 Falhas em mancais de rolamento EFVM	31
Gráfico 2.5 Motivo de retirada de vagões de circulação - componentes do rodeiro ..	35
Gráfico 4.1 Mancais de rolamento analisados.....	57
Gráfico 4.2 Características das amostras analisadas	58
Gráfico 4.3 <i>Boxplot</i> valores de beta e L_{10}	59
Gráfico 4.4 Distribuição dos dados de mancais por fabricante.....	62
Gráfico 4.5 Distribuição dos dados de mancais de rolamento por classe	62
Gráfico 4.6 Probabilidade de falhas acumulada e pdf – comparação classes.....	64
Gráfico 4.7 Probabilidade de falhas acumulada e pdf – comparação fabricantes	65
Gráfico 4.8 Probabilidade de falhas acumulada e pdf - comparação fabricantes classe K.....	65
Gráfico 4.9 Taxa de sucateamento média dos componentes internos.....	67
Gráfico 4.10 Taxa de sucateamento média de mancais de rolamento por classe	67
Gráfico 4.11 Taxa de sucateamento de mancais de rolamento por fabricante.....	68
Gráfico 4.12 <i>Boxplot</i> - Sucateamento de mancais de rolamento por classe	68
Gráfico 4.13 Exemplo do cálculo das projeções de manutenções e reincidências ...	69
Gráfico 4.14 Projeções de manutenções para o mancal de rolamento classe K.....	71
Gráfico 4.15 Custo relativo esperado para o ciclo $E_R[C]$ – mancal classe K	71
Gráfico 4.16 Custo médio relativo de manutenção $Z_R[T]$ - mancal classe K	72
Gráfico 4.17 Projeções de manutenções para o mancal de rolamento classe E.....	72
Gráfico 4.18 Custo relativo esperado para o ciclo $E_R[C]$ – mancal classe E	73
Gráfico 4.19 Custo médio relativo de manutenção $Z_R [T]$ - mancal classe E	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Taxa de sucateamento e período do ciclo de manutenção	18
Tabela 4.1 Parâmetros da distribuição Weibull para diferentes defeitos	57
Tabela 4.2 Resultado da estimação dos parâmetros da equação Weibull	64

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

AAR - Association of American Railroad
AAR - Association of American Railroad
ABMA - American Bearing Manufacturers Association
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAM - Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos
C - Capacidade de carga dinâmica básica,
Cf – Custo corretiva
Cp – Custo preventiva
E[C] - Custo de manutenção
E[T] - Ciclo esperado de manutenção
EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas
F(t) - Probabilidade acumulada de falhas
FMEA - Failure Mode and Effect Analysis
GDE - Vagão do tipo gôndola para bitola métrica
GDT - Vagão do tipo gôndola para bitola larga
h(t) - Taxa de falhas
ISO - International Organization for Standardization
LCC - Life Cycle Cost
MLE - maximum likelihood estimates
MTTF - Mean Time to Failure
NBR – Norma Brasileira
P - Carga dinâmica equivalente
Pdf ou fdp - Função densidade de probabilidade
R(t) - Confiabilidade
T - Período Ciclo
VPS - Sistema de Manutenção Vale
Z(T) - Função custo

LISTA DE SÍMBOLOS

β - Parâmetro de forma

γ ou t_0 - Vida mínima ou parâmetro de localização

t - Período de vida transcorrido

∞ - Infinito

L_{10} – Vida básica do mancal de rolamento

SUMÁRIO

ABSTRACT	17
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	18
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS	21
LISTA DE SÍMBOLOS	22
SUMÁRIO	23
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	17
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.3 JUSTIFICATIVA	19
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2 ROLAMENTO FERROVIÁRIO	23
2.1 DEGRADAÇÃO DO ROLAMENTO	27
2.2 SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE MANCAIS DE ROLAMENTO	31
2.3 MANUTENÇÃO DE MANCAIS DE ROLAMENTO	35
2.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	39
3 REFERENCIAL TEÓRICO	40
3.1 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL	43
3.2 TIPOS DE DADOS	48
3.3 OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE MANUTENÇÃO.....	49
3.3.1 Custo manutenção corretiva.....	51
3.3.2 Custo manutenção preventiva	52
3.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	53
4 DESENVOLVIMENTO	54
4.1 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL APLICADA A MANCAIS DE ROLAMENTO	56
4.2 ESTUDO DE CASOS EFVM	60
4.2.1 Análise dos dados de manutenção.....	63
4.2.2 Custo de manutenção de mancais de rolamento	66
4.2.3 Otimização do ciclo de manutenção preventivo	69
4.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	73
5 CONCLUSÃO	75
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

O modal ferroviário de transporte se destaca pela eficiência energética que é em média quatro vezes maior que a rodoviária conforme a Associação Americana de Ferrovias (*American Association Railroads - AAR*) e por isso pode reduzir em 75% a emissão de gases do efeito estufa. (1)

Essa eficiência fica ainda mais evidente para cargas elevadas e em longas distâncias que é uma das características da demanda de transporte no Brasil. A exportação de grande volume de produtos com pouco beneficiamento se enquadra na categoria de produtos básicos. Os dados do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços mostram que do total de 185,2 bilhões de dólares referente às exportações brasileiras em 2016, os produtos básicos representaram 42,7% totalizando 79,1 bilhões. (2)

Os principais produtos básicos transportados nas ferrovias brasileiras são: soja em grão, minério de ferro e petróleo bruto, conforme mostra a Figura 1.1. Esses produtos têm como principais destinos os mercados da China, Países baixos (Holanda) e Japão. (2)

Figura 1.1 Principais produtos básicos exportados



Fonte: MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS (2017).

A última edição da pesquisa da Confederação Nacional do Transporte, publicada em 2015, registrou um crescimento na produção ferroviária (toneladas transportadas por km) de 28,9%, entre 2006 e 2014, juntamente com a redução de cerca de 50% do número de acidentes. (3)

Contribuindo para esse crescimento contínuo, a Vale se destaca no transporte do minério de ferro com uma produção anual recorde de 348,8 milhões de toneladas em 2016, conforme relatório anual. (4)

As duas principais ferrovias para escoamento desse produto possuem aproximadamente 900 km cada uma. Para atender a essa demanda a Vale possui mais de 30 mil vagões de minério de ferro dos mais de 100 mil vagões em circulação utilizados para transporte ferroviário de carga no Brasil. Na região Sudeste, a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) é responsável pelo transporte de aproximadamente 130 milhões de toneladas por ano com uma frota de cerca de 12 mil vagões. (5)

O modelo de vagão utilizado na EFVM para o transporte de minério de ferro é o gôndola do tipo *dumper* (tipo GDE). A Figura 1.2 mostra um lote desse modelo.

Figura 1.2 Vagão tipo GDE para transporte de minério de ferro



Fonte: Souza (2013).

Esse modelo não possui sistema próprio para descarga de material e por isso necessita de um sistema capaz de girar o vagão para realizar a descarga. A Figura 1.3 mostra parte sistema de descarga no virador de vagão (*cardumper*). (5) (6)

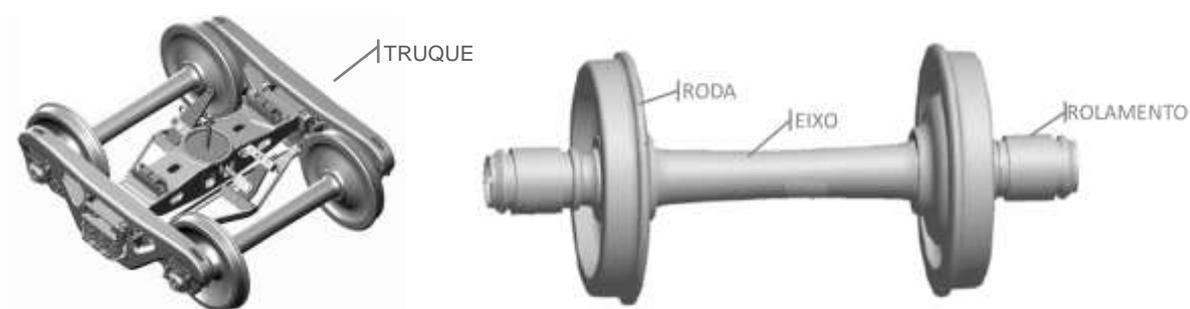
Figura 1.3 Sistema de descarga do tipo cardumper



Fonte: Autor.

Esse vagão pode ser dividido em subsistemas: superestrutura, choque e tração, freio, truque e rodeiro. A NBR 16440 define o truque ferroviário como conjunto de três peças, geralmente fundidas, que recebe a estrutura do vagão e transmite os esforços para os rodeiros. Ele também atua na dinâmica do movimento do vagão através dos sistemas de amortecimento e ampara-balanços. De maneira simplificada o rodeiro é constituído por um eixo, duas rodas e dois mancais de rolamento. As rodas são solidárias ao eixo, ou seja, não existe movimento relativo entre elas. A Figura 1.4 ilustra o subsistema truque e o rodeiro. (6)

Figura 1.4 Truque ferroviário e rodeiro ferroviário

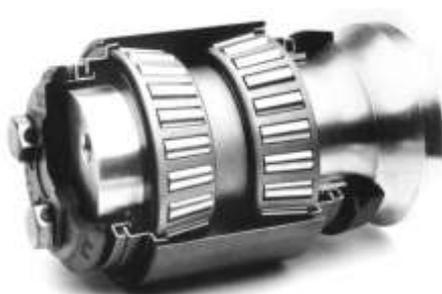


Fonte: Adaptada da NBR 16440 (2015).

Mancal de rolamento ou simplesmente rolamento é o componente montado com interferência na extremidade do eixo, o qual permite giro 'sem atrito' e tem o objetivo de transferir as cargas para o eixo. Esse por sua vez transfere para a roda já que são montados rigidamente um ao outro. (7)

O componente em estudo neste trabalho é o mancal de rolamento do tipo cartucho em vagões de minério da EFVM. A Figura 1.5 ilustra um exemplo com algumas partes em corte que mostram os componentes internos.

Figura 1.5 Mancal de rolamento ferroviário



Fonte: Timken (2015).

Embora o cálculo de vida útil dos mancais de rolamentos seja normatizado, conforme ABNT NBR ISO 281, é muito difícil estabelecer a durabilidade. Ela comenta que somente o resultado de ensaios com número suficiente de amostras, nas mesmas condições, poderia representar a vida. (8)

Na prática, um mesmo mancal de rolamento pode ter resultados diferentes dependendo da aplicação. De maneira geral, para mancais de rolamentos ferroviários, o desempenho é intrínseco a cada ferrovia e ao seu processo de manutenção. E um dos fatores que pode afetar a vida é o período entre manutenções ou ciclo de manutenção preventivo, que é o objeto de estudo deste trabalho.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

Existe uma linha tênue entre a identificação de defeitos ou falhas nos mancais de rolamentos ferroviários, pois qualquer parada de trem ou impactos na circulação com origem em anomalia no rolamento é classificada como falha. Essa realidade conservadora das ferrovias tem o objetivo de reduzir cada vez mais as falhas catastróficas que podem gerar ocorrências ferroviárias. (9)

Na EFVM, foram mantidos mais de 20 mil mancais de rolamentos no ano de 2016 provenientes de vagões do tipo gôndola, sendo que menos de 0,1% tiveram origem em eventos durante a circulação dos trens. (10)

Por isso para a avaliação do ciclo de preventivo é fundamental a análise estatística da manutenção dos rolamentos assim uma premissa importante neste trabalho é a definição de falha como sendo qualquer parâmetro fora dos estabelecidos que gere a necessidade de manutenção do mancal de rolamento.

Outra consideração importante neste trabalho é que toda manutenção realizada no rolamento o coloca na mesma condição que um novo rolamento (*as good as new*).

Apesar de não se conhecer a correlação direta entre os defeitos identificados durante a manutenção e a falha em rolamentos é consenso que existe uma conexão. Os parâmetros de manutenção têm a tendência de serem mais

conservadores e ainda não é possível precisar a taxa de evolução dos defeitos que levariam a uma falha real. (11)

Os estudos de benchmarks entre diversas ferrovias mostram uma diferença entre os prazos de manutenção preventiva e a taxa de sucateamento. Um resumo dos dados pode ser analisado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 Taxa de sucateamento e período do ciclo de manutenção

Ferrovias	Ciclo plano preventivo em rolamentos (anos)	Taxa média de sucateamento de rolamentos
Ferrovia 1	6,5	32%
Ferrovia 2	2	3%
Ferrovia 3	4	5%

Fonte: o autor (2017).

Um estudo conduzido pela Associação Americana de Ferrovias (AAR) indicou uma taxa de sucateamento de 15% para uma amostragem de 64 mil rolamentos removidos independente da causa, porém a estatística geral anual relatada é menor que 2% para uma população de 535 mil rolamentos mantidos. (11)

A partir dessas informações fica evidente a especificidade do desempenho do mancal de rolamento para cada ferrovia, mas também levanta a hipótese que o período de manutenção tenha influência na taxa de sucateamento e em seu desempenho. E que o atual período de manutenção na EFVM não seja o ponto ótimo, por isso é válido questionar:

Existe relação entre o período entre manutenções e a taxa de sucateamento?

Qual o tempo ótimo de manutenção preventiva para mancais de rolamentos em vagões de minério na EFVM?

Ou ainda, se é possível estabelecer diferenças para os diferentes fabricantes ou classes?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é calcular o tempo ótimo de manutenção preventiva de mancais de rolamentos ferroviários em vagões de minério na Estrada de Ferro Vitória a Minas.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

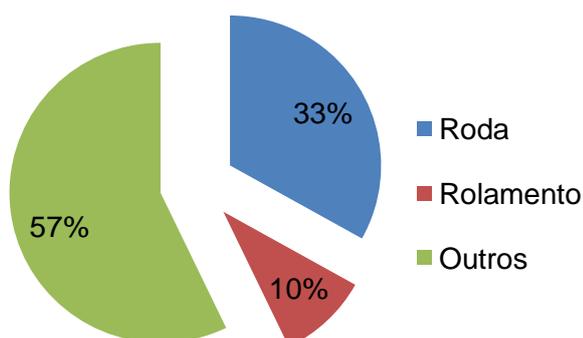
Os objetivos específicos que suportam a realização do objetivo geral são:

- Definir parâmetros e implantar controle na manutenção de rolamentos ferroviários com foco em confiabilidade.
- Verificar o comportamento da taxa de falhas em relação ao tempo.
- Identificar comportamento da taxa de sucateamento em função do tempo após a manutenção preventiva para avaliar o custo relativo com a reposição.
- Diferenciar taxa de sucateamento para os diversos modelos e fabricantes.

1.3 JUSTIFICATIVA

Dentre os principais custos de manutenção para os vagões de minério de ferro na EFVM, o mancal de rolamento se destaca como o segundo item mais relevante conforme mostra o Gráfico 1.1, com uma parcela de impacto no orçamento anual de aproximadamente 10%. O agrupamento 'outros' possui mais de 600 itens.

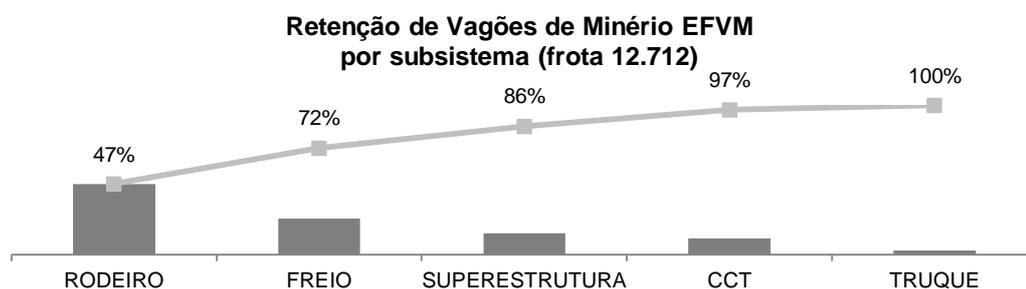
Gráfico 1.1 Divisão do orçamento de manutenção para vagões de minério EFVM



Fonte: o autor (2017).

Além dos custos de manutenção, a confiabilidade está associada diretamente com a indisponibilidade do ativo, a importância do mancal de rolamento é comprovada ao analisar os principais motivos da retirada de vagões de circulação (retenção). Dentre as mais de 25 mil manutenções realizadas na EFVM em 2016 em vagões de minério (GDE), o subsistema rodeiro se destaca com 47% dos motivos de retenção conforme mostra o Gráfico 1.2.

Gráfico 1.2 Motivo de retirada de vagões de circulação – por sistema



Fonte: o autor (2017).

A etapa de análise do custo de ciclo da manutenção é uma das etapas que compõe a análise do custo do ciclo de vida (LCC em inglês *Life Cycle Cost*) do componente. Conforme Figura 1.6, a avaliação econômica para manter o ativo inclui os custos de aquisição, instalação, operação, manutenção e descarte. (12)

Figura 1.6 Etapas da análise do custo do ciclo de vida



Fonte: Reliasoft (2017).

Essa avaliação é fundamental para apoiar a tomada de decisões, comparação de desempenho, planejamento e estratégia para atender a parâmetros de disponibilidade e confiabilidade do sistema. (12)

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os mesmos conceitos e ferramentas da análise de dados de vida serão utilizados para analisar os dados de manutenção. A base das análises são os tempos entre manutenções que precisam ser coletadas de maneira estruturada para possibilitar a utilização do *software* Weibull++ da Reliasoft. Através dele será possível estimar as curvas de confiabilidade, probabilidade de falhas e outras que auxiliam no cálculo do tempo ótimo entre manutenções.

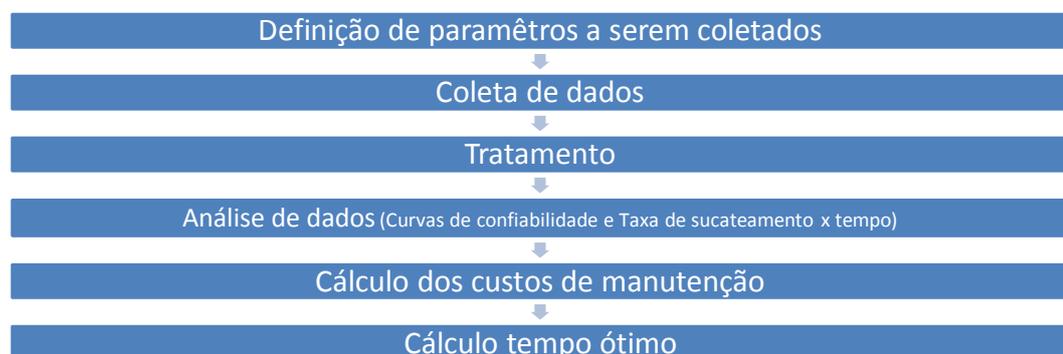
O primeiro passo é a revisão bibliográfica sobre mancais de rolamento ferroviários, análise de dados de vida e cálculos de otimização do ciclo de manutenção.

O segundo passo é a estruturação da forma de coleta dos dados que será realizada junto aos especialistas e a empresa prestadora do serviço de manutenção de rolamentos ferroviários, assim como a definição do número de amostra que possa representar de maneira significativa em relação à população dos rolamentos mantidos.

Os dados serão tratados para gerar as informações dos modos de falha e taxas de sucateamento em relação ao tempo. Os modos de falha serão avaliados em função das causas e das taxas de falha.

Um resumo dessas etapas está ilustrado na Figura 1.7 abaixo.

Figura 1.7 Sequência de etapas do trabalho



Fonte: o autor (2017).

A análise de dados ainda pode ser subdividida em: seleção do modelo ou distribuição, cálculo dos parâmetros do modelo estimado e validação do modelo.

Atualmente a seleção do modelo conta com auxílio de softwares especializados e dependerá dos dados coletados e das referências na literatura de trabalhos similares.

Importante ressaltar que a manutenção preventiva só faz sentido para os modos de falhas que possuem taxa de falha crescente e se o custo da manutenção preventiva for menor que o custo da manutenção corretiva. (14)

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo inicial delimita as condições de contorno do trabalho para que nos próximos capítulos os detalhes do componente e seu comportamento de manutenção sejam explanados. Uma breve revisão da distribuição de confiabilidade também serve de base para que o cálculo da otimização do custo de manutenção seja realizado. Os próximos capítulos possuem o seguinte conteúdo:

- O Capítulo 2 detalha o mancal de rolamento utilizado em ferrovias e mais especificamente na Estrada de Ferro Vitória a Minas. Também faz um resumo do mecanismo de degradação teórico e prático disponíveis na literatura e em outras ferrovias.
- O Capítulo 3 inicia apresentando a distribuição de confiabilidade Weibull. Os parâmetros da distribuição são mostrados juntamente com a sua influência nas curvas. Esse capítulo também traz a teoria do cálculo do ponto ótimo de manutenção. Ele termina diferenciando os tipos de manutenção corretiva e preventiva.
- O Capítulo 4 mostra alguns trabalhos sobre a confiabilidade de mancais de rolamentos ferroviários utilizando a distribuição Weibull. É nessa parte que os resultados da análise da base de dados da manutenção de mancais da EFVM são mostrados. Um estudo paralelo sobre a variação da taxa de sucateamento em relação ao tempo de ciclo de manutenção também é apresentado. A modificação da equação do cálculo do custo mínimo de manutenção é sugerida e os dados são utilizados nas equações do ponto ótimo de manutenção
- O Capítulo 5 finaliza o trabalho resumindo os resultados encontrados.

2 ROLAMENTO FERROVIÁRIO

Detalhar o componente e seus modos de falha de maneira qualitativa é a primeira tarefa de qualquer estudo de confiabilidade. Esse capítulo apresenta os principais mancais de rolamento utilizados em ferrovias e resume os mecanismos de degradação teórico e prático em diferentes ferrovias.

A gravidade de uma falha nesse componente levou a necessidade de monitoramento conforme é descrito nas próximas seções, assim como o processo de manutenção que tem por objetivo restaurar parte da confiabilidade e prolongar a vida.

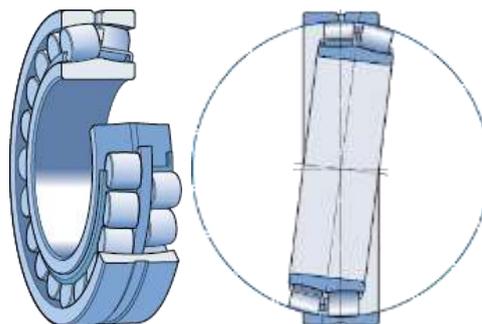
A NBR 7634 define os termos empregados em vagões ferroviários e descreve o mancal de rolamento como “elemento de máquina cuja finalidade deve ser transmitir carga entre um componente fixo e outro em movimento”. (15)

Dentre os diversos tipos, na maioria dos casos os rolamentos com rolos suportam cargas maiores que rolamentos com esferas devido a maior área de contato entre os elementos. Por isso para uma mesma carga as dimensões dos rolamentos com rolos tendem a ser menor, o que por sua vez, tendem a reduzir seus custos. (16)

A dinâmica em um vagão ferroviário faz com que o projeto do rolamento tenha que suportar cargas combinadas, ou seja, cargas axiais e radiais atuando simultaneamente. (17)

Por isso os rolos devem ser abaulados, do tipo cônicos ou esféricos, e a superfície de rolagem deve ser angular. A Figura 2.1 mostra um mancal de rolamento de rolos esféricos autocompensador.

Figura 2.1 Mancal de rolamento com rolos esféricos e efeito autocompensador



Fonte: SKF (2017).

Ele possui “duas carreiras de rolos com uma pista esférica comum no anel externo e duas pistas no anel interno inclinadas em um ângulo em relação ao eixo do rolamento” (SKF, 2017). A Figura 2.1 também mostra que o centro da esfera é o centro do rolamento e não se altera com a movimentação do conjunto. Esse efeito de autoalinhamento tem a vantagem de adaptar-se em algumas situações, como por exemplo, o desalinhamento ou flexão do eixo. (18)

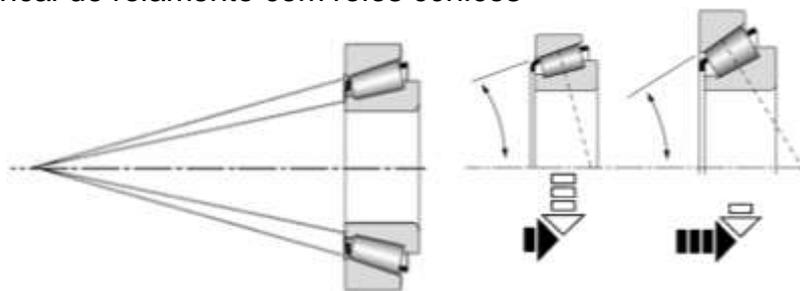
Conseqüentemente, quando houver erros de alinhamento em eixos e alojamentos ou flexão do eixo, são automaticamente ajustados, fazendo com que não ocorram cargas anormais no rolamento.

Para esses casos os elementos esféricos conseguem distribuir carga ao longo do comprimento do rolo sem criar pontos de concentração de tensão. Esses elementos também tem a capacidade de ampliar sua área de contato à medida que a carga aumenta. (19)

O mancal de rolamento de rolos cônicos, conforme mostra a Figura 2.2, é projetado para que todos os elementos na superfície dos rolos e das pistas se encontrem em um único ponto no centro do eixo. (19)

A localização desse ponto define a característica do mancal de rolamento, quanto mais longe o ponto estiver do rolamento (ângulos menores) maior a capacidade radial do mancal de rolamento. Caso o ponto se localize mais próximo, maior será a capacidade axial. (20)

Figura 2.2 Mancal de rolamento com rolos cônicos



Fonte: adaptado SKF (2017) e Timken (2015).

O projeto desse tipo de rolamento permite a desmontagem dos itens internos com maior facilidade se comparado com rolamentos de esferas ou autocompensadores e por isso apresenta uma maior mantenabilidade.(19) A Figura 2.3 ilustra um cone e os componentes que o compõem separadamente. Uma única

fileira de rolos permite o apoio da carga radial e carga axial em único sentido. Carga axial também é gerada pela reação do ângulo de contato da pista interna, essa direção de carga cria uma força separadora entre a superfície interna e externa e por isso em diversos casos fileiras duplas pareada são utilizadas. (21)

Figura 2.3 Componentes do mancal de rolamento com rolos cônicos



Fonte: Nachi (2007).

Na EFVM, atualmente apenas 2% dos mancais de rolamentos são do tipo com rolos esféricos autocompensadores e em caso de sucateamento são substituídos por mancais de rolamentos com rolos cônicos que representa 98% da frota.

Conforme mostra a Figura 2.4, esse mancal de rolamento utilizado na ferrovia é constituído por dois conjuntos de cones. Cada conjunto é composto por uma fileira de rolos cônicos separados por uma gaiola montados sobre uma pista interna. A gaiola pode ser fabricada em aço ou polímero e tem a função de separar os rolos e mantê-los em sua posição de projeto. Entre os dois cones existe um espaçador que controla as folgas finais. (22) As duas pistas externas estão em um único componente denominado capa. Os retentores são as vedações que evitam o vazamento da graxa e protegem contra contaminação externa. (23)

A tampa com os parafusos são montados de maneira a transmitir força (tensão de compressão) para o anel de desgaste e demais componentes até o anel de encosto que encontra resistência (apoio) no raio do eixo. (23)

Figura 2.4 Detalhe da montagem e nomenclatura dos componentes



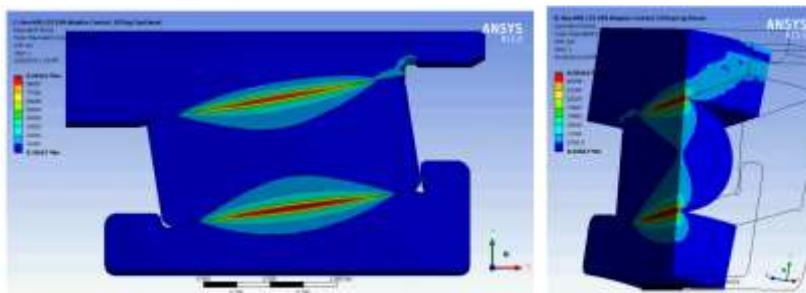
Fonte: TSB (2013).

2.1 DEGRADAÇÃO DO ROLAMENTO

A degradação teórica do mancal de rolamento se dá pela fadiga dos materiais dos componentes internos submetidos a carregamentos cíclicos. Se considerarmos o contato de rolagem puro, a tensão de contato gera uma tensão de cisalhamento máxima que se encontra em uma profundidade que equivale a metade do valor do raio de contato entre os dois corpos. (24)

O trabalho publicado em 2014 pelo Mason demonstrou através da simulação por elementos finitos a distribuição das tensões nos compontes do mancal de rolamento. A Figura 2.5 mostra o corte de uma sessão do mancal em um único rolete detalhando a distribuição das tensões de contato (von Mises). (25)

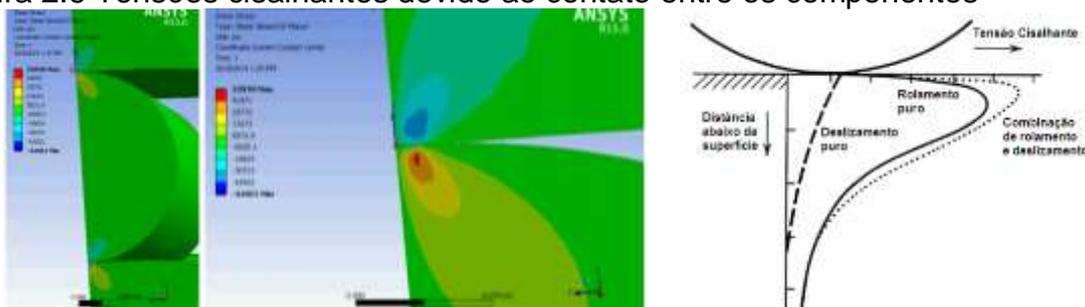
Figura 2.5 Tensões de compressão do contato entre os componentes



Fonte: Mason (2014).

São essas tensões compressivas que geram tensões cisalhantes conforme mostra a Figura 2.6. O gráfico representa a relação entre as tensões de cisalhamento e a profundidade mostrando que a simulação das tensões tem o mesmo comportamento do gráfico teórico. Assim é possível concluir que o principal mecanismo de degradação do mancal de rolamento é subsuperficial. (24)(25)

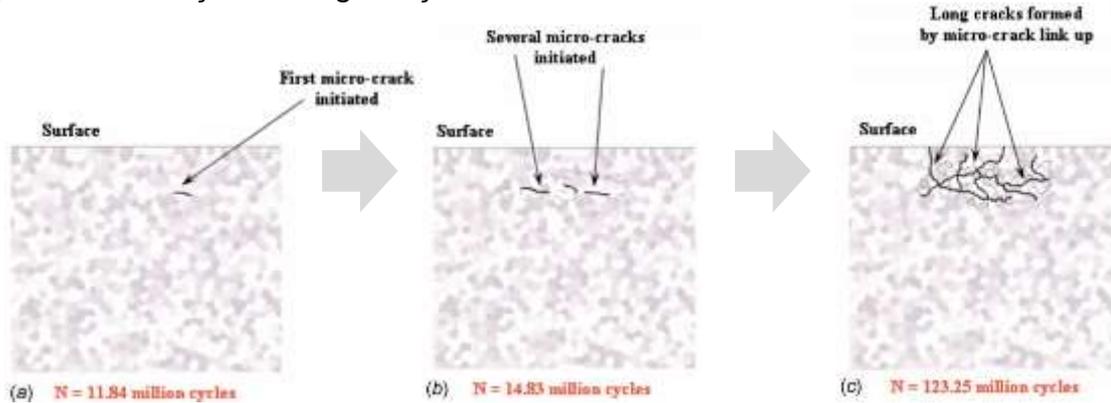
Figura 2.6 Tensões cisalhantes devido ao contato entre os componentes



Fonte: adaptado de Mason (2014) e Massoti (2011).

A Figura 2.7 mostra o detalhe do processo de nucleação de trinca em um corte da pista de rolagem. É possível observar que com a evolução dos ciclos o defeito subsuperficial evolui até romper a superfície. No exemplo, a nucleação é iniciada após 11,8 milhões de ciclos, com multiplicação das trincas em 14,8 até o aparecimento das trincas superficiais com mais e 123 milhões de ciclos.

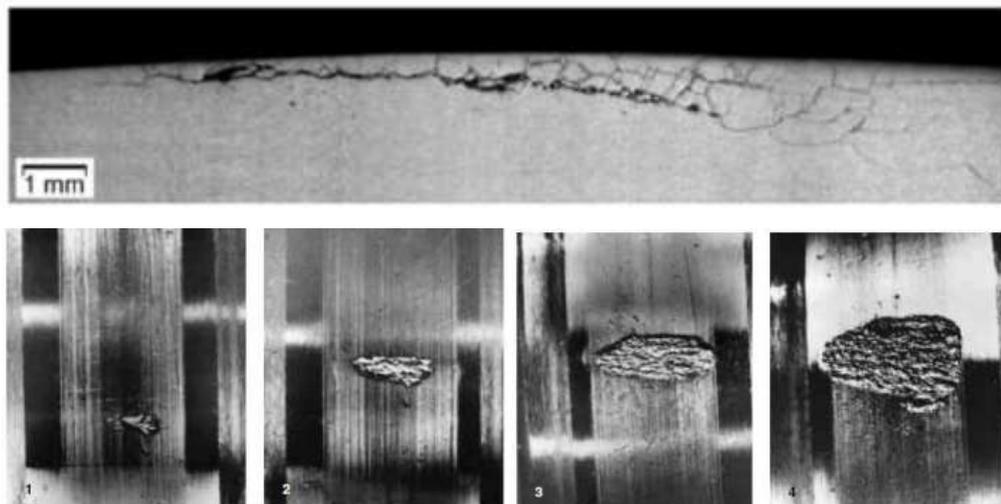
Figura 2.7 Evolução da degradação



Fonte: Sadeghi (2009).

O tempo até os primeiros sinais de fadiga é proporcional ao número de revoluções e a magnitude da carga imposta ao mancal de rolamento. A partir do momento em que o defeito subsuperficial se estendeu a superfície ele tende a crescer conforme mostra Figura 2.8. Essa evolução é relativamente lenta e na maioria dos casos é possível identificar o problema interno antes de uma falha. (24)
(26)

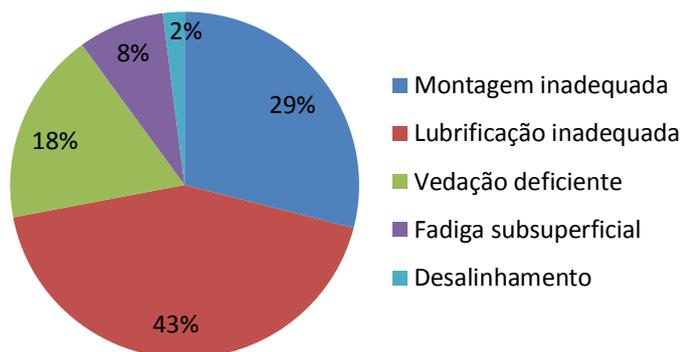
Figura 2.8 Nucleação e evolução do defeito superficial



Fonte: SKF (1994) e Stadler et al (2015).

Essa degradação teórica não reflete os principais modos de falha relatados pelos fabricantes que mostra que apenas 8% dos rolamentos falham devido a fadiga subsuperficial. A lubrificação e montagem inadequada são os principais modos de falhas com maior frequência, conforme mostra o Gráfico 2.1. (27)

Gráfico 2.1 Causa das falhas em mancais de rolamento

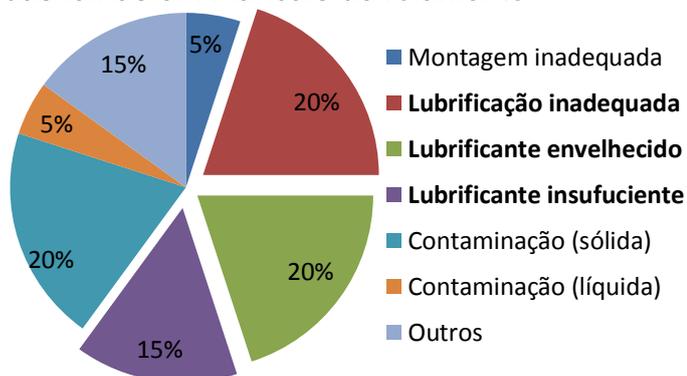


Fonte: Harris (2006).

De acordo com dados coletados entre 2001 e 2010, as falhas em mancais de rolamentos estão ranqueadas entre as três maiores causas de descarrilamentos ferroviários, totalizando 5,9% das ocorrências. (28)

Analisando a causa raiz no Gráfico 2.2, mais de 50% envolvem de alguma maneira a lubrificação. A classificação de inadequada representa 20%, envelhecido com 20% e insuficiente com 15%. O gráfico 4 mostra essa distribuição das causas das falhas. Esses dados mostram a relevância de todo o processo de seleção do lubrificante, aplicação e relubrificação. (28)

Gráfico 2.2 Causa das falhas em mancais de rolamento



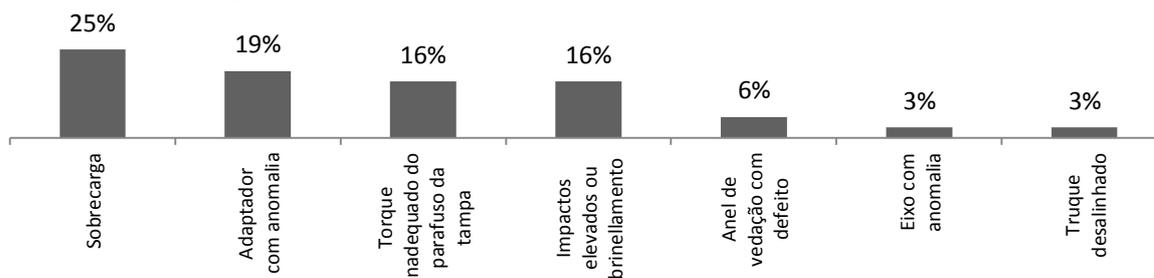
Fonte: Martinez (2015).

Aproximadamente 90% dos rolamentos são lubrificados com graxa, que tem o objetivo de reduzir o atrito entre a pista e o elemento rolante, que no caso ferroviário é o rolo cônico. A graxa apresenta algumas vantagens, como por exemplo, auxiliar na proteção contra contaminantes externos ou a proteção contra corrosão. (29) A redução do atrito possibilita um movimento com o mínimo de desgaste, ruído e aquecimento dos elementos, pois a graxa possui menor volatilidade é mais resistentes a cargas e pode proporcionar amortecimento das vibrações. (30)

Como mostrado anteriormente diversos outros fatores aceleram a degradação do mancal de rolamento e reduzem a vida de projeto. Outros relatados na literatura são: carga radial, carga axial, velocidade, temperatura, montagem inadequada, lubrificação, acabamento superficial, manutenção, propriedades mecânicas dos materiais aplicados etc. (31)

O trabalho de aplicação da ferramenta FMEA (em inglês *Failure Mode and Effect Analysis*) na MRS Logística mostrou as principais causas de falhas em rolamentos como sendo, em ordem de maior frequência: sobrecarga, adaptador com anomalia, torque inadequado do parafuso da tampa, impactos elevados ou brinellamento, anel de vedação com defeito, eixo com anomalia e truque desalinhado. O Gráfico 2.3 ilustra essa distribuição. (32)

Gráfico 2.3 Principais causas de falhas em mancais de rolamento



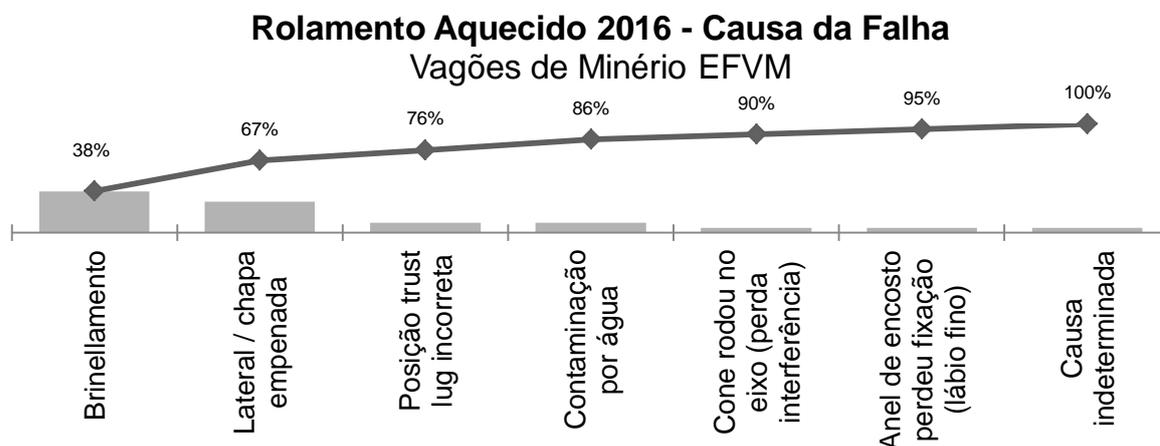
Fonte: Jesus (2009).

Outro estudo analisando 171 rolamentos que apresentaram falhas causando descarrilamentos ou impactos de atraso nos trens na antiga ferrovia Santa Fé, mostrou que as três maiores causas foram: excesso de lubrificação (18%), vedação (13%) e folga nos parafusos da tampa do rolamento (11%). (9)

Dentre as falhas em vagões de minério da EFVM durante a circulação de trens, o subsistema que se destaca com a maior quantidade de eventos é o rodeiro.

Em 2016, esse subsistema representou 38% dos eventos, sendo que 80% desses casos foram de rolamentos aquecidos. As causas do aquecimento do rolamento foram investigadas e são mostradas no Gráfico 2.4.

Gráfico 2.4 Falhas em mancais de rolamento EFVM



Fonte: o autor (2017).

O principal motivo das falhas também é o principal motivo do sucateamento dos mancais de rolamento na EFVM, esse modo de falha tem como origem os impactos radiais gerados durante a circulação na ferrovia. A concentração da carga em um dos cones ocasionada pela lateral do truque empenada, ou chapa de desgaste soldada de maneira irregular, acelera a degradação do rolamento e é a segunda causa do aquecimento de mancais.

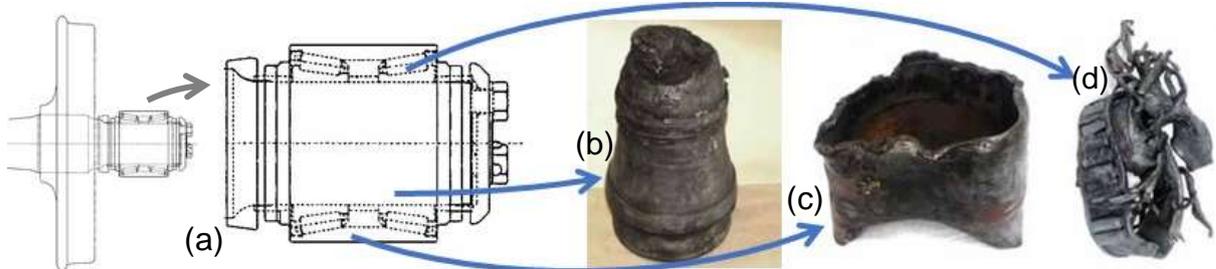
As diferentes bases de dados mostram algumas causas similares, porém fica evidente que diferentes ferrovias aplicando o mesmo tipo de rolamento apresentam diferentes comportamentos de falha.

2.2 SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE MANCAIS DE ROLAMENTO

Os principais sintomas do início da degradação de mancais de rolamentos ferroviários são o aumento da emissão acústico ou ruído que eventualmente levam ao aumento da temperatura, e em alguns casos, resultando na degola do eixo. A Figura 2.9, ilustra um caso de degola da manga de eixo juntamente com a condição final do eixo, da capa e do cone. (33) A degola da manga de eixo no pior cenário

pode ocasionar a queda da lateral do truque sobre a linha e isso pode desencadear a um descarrilamento e/ou tombamento da composição de vagões.

Figura 2.9 Exemplo de degola da manga do eixo



Fonte: adaptado de TBS (2005, 2013).

A Figura 2.9 (a) mostra esquema um rodeiro com todos os componentes. A Figura 2.9 (b) mostra a extremidade do eixo (manga do eixo) após o evento de degola, a região da manga sofreu grandes deformações, assim como a capa do mancal de rolamento visto na Figura 2.9 (c). A Figura 2.9 (d) mostra o conjunto cone envolvido do mesmo evento.

A EFVM mostrada na Figura 2.10, possui ao todo 14 pontos de monitoramento ao longo dos 905 km de ferrovia. 12 desses pontos possuem sensores de temperatura, um ponto possui sensores de ruído e outro uma equipe que realiza uma inspeção sensitiva dinâmica.

Figura 2.10 Distribuição dos locais de monitoramento de mancais de rolamento



Fonte: adaptado de ANTT (2017).

O sistema de monitoramento de temperatura em tempo real, ou sistema *hotbox*, utiliza sensores que medem a radiação infravermelha ao lado da ferrovia

para identificar rolamentos que estejam operando com temperatura elevada em comparação ao ambiente. O equipamento é destacado na Figura 2.11. (34)

Figura 2.11 Sistema detector de rolamento aquecido - Hotbox



Fonte: Vale (2009).

A informação da temperatura é diretamente proporcional a severidade dos danos internos dos componentes do mancal de rolamento. Ela também é influenciada pela carga vertical, carga lateral, velocidade, aplicação de freio, traçado e perfil da ferrovia. (33)

O objetivo principal é evitar prejuízos para as transportadoras, devido descarrilamentos ocasionados pela degola do eixo que tem como causa o aquecimento excessivo do rolamento. (35)

O sistema de monitoramento acústico utiliza um conjunto de sensores sonoros ao lado da ferrovia para captar a assinatura acústica dos mancais de rolamento, conforme mostra a Figura 2.12. Esse sistema possui um algoritmo capaz de identificar anomalias nos diferentes componentes dependendo da frequência e intensidade do sinal. (36)

Esses tipos de sistemas são extremamente assertivos e capazes de antecipar falhas em mancais de rolamento muito antes de apresentarem sintomas de aumento de temperatura significativos. Estima-se que no mínimo 35% das falhas possam ser detectadas com a tecnologia atual. (37)

Figura 2.12 Sistema detector acústico



Fonte: Costa (2015).

A inspeção sensitiva aplica os sentidos humanos com objetivo de realizar diagnóstico ou monitoramento de um equipamento. (38)

A inspeção sensitiva dinâmica em mancais de rolamento utiliza a audição para identificar anomalias. Conforme mostra a Figura 2.13, o procedimento é executado com os vagões em movimento em um determinado ponto da ferrovia e por isso precisa ser dinâmica. Isso significa que é necessário estar em movimento com pouca diferença de velocidade entre o inspetor e o vagão, por isso ela é realizada com auxílio de um veículo ao lado da ferrovia para que seja possível identificar o tipo de problema, intensidade e para coletar as informações.

Figura 2.13 Inspeção dinâmica sensitiva em Resplendor



Fonte: o autor (2017).

Outro tipo de inspeção sensitiva utilizada é a inspeção manual dos mancais de rolamento durante manutenções em oficina, mostrada na Figura 2.14. A folga axial, dificuldade para girar o rolamento, ruído excessivo, vazamento de graxa, retentores danificados ou qualquer outra anomalia são critérios para substituição do mancal de rolamento.

Figura 2.14 Inspeção sensitiva manual do mancal de rolamento

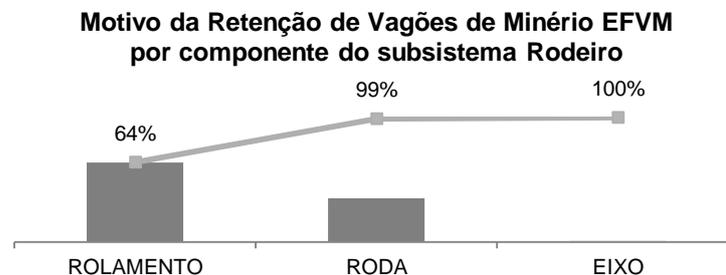


Fonte: AAR (2012).

Todo esse monitoramento reflete nos motivos de retirada de vagões de circulação, como mostrado anteriormente. Dos 47% dos vagões retidos devido ao

sistema rodeiro, 64% são provenientes de anomalias identificadas no mancal de rolamento, conforme mostra Gráfico 2.5.

Gráfico 2.5 Motivo de retirada de vagões de circulação - componentes do rodeiro



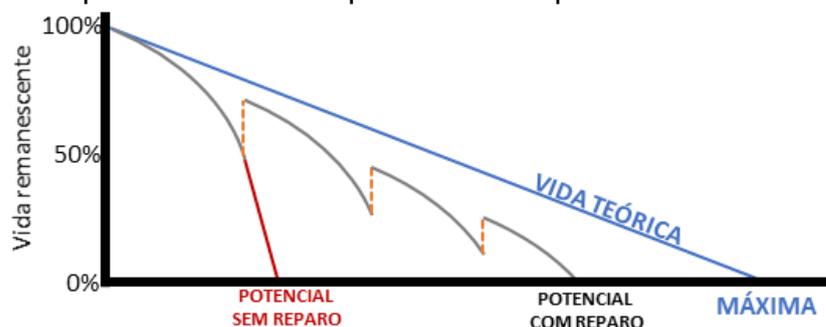
Fonte: o autor (2017).

Isso torna o mancal de rolamento o principal componente que gera necessidade de retenção do vagão dentre as centenas de componentes existentes resultando em mais de 7,5 mil retiradas de vagões da circulação. Como os vagões são fabricados em duplas, cada rolamento gera a necessidade de direcionar dois vagões para a oficina fazendo com que o rolamento também seja uma das principais causas de indisponibilidade de vagões para o transporte.

2.3 MANUTENÇÃO DE MANCAIS DE ROLAMENTO

Na maioria das indústrias que aplicam rolamentos com cargas/exigências elevadas o rolamento é removido antes de atingir sua vida plena ou econômica. O reparo desses rolamentos é uma maneira eficaz de estender a sua vida, sendo uma alternativa para o sucateamento. A Figura 2.15 tenta resumir o desempenho teórico do mancal de rolamento que são submetidos a manutenção ao longo da vida. (39)

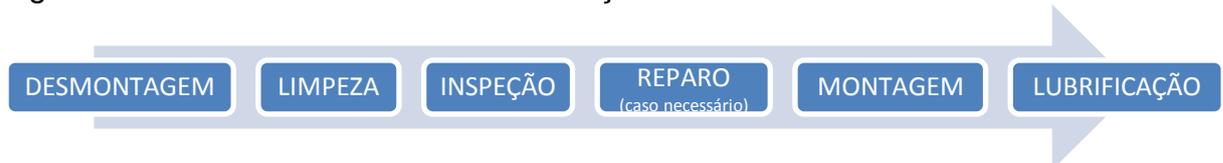
Figura 2.15 Desempenho teórico e esperado com reparos



Fonte: adaptado de Timken (2017).

As manutenções dos mancais de rolamentos ferroviários seguem as indicações da Associação Americana de Ferrovias (AAR seção H II S 723). O processo de recondicionamento de mancais de rolamentos pode ser resumido conforme fluxo das tarefas da Figura 2.16. (40)

Figura 2.16 Fluxo das tarefas da manutenção do mancal de rolamento ferroviário



Fonte: o autor (2017).

De maneira natural, a graxa dos mancais de rolamento altera suas propriedades ao longo do tempo, reduzindo seu desempenho. Essa degradação varia com o tipo da graxa, dimensões do rolamento, tipo de rolamento, velocidade de rotação, temperatura de trabalho entre outras. (41)

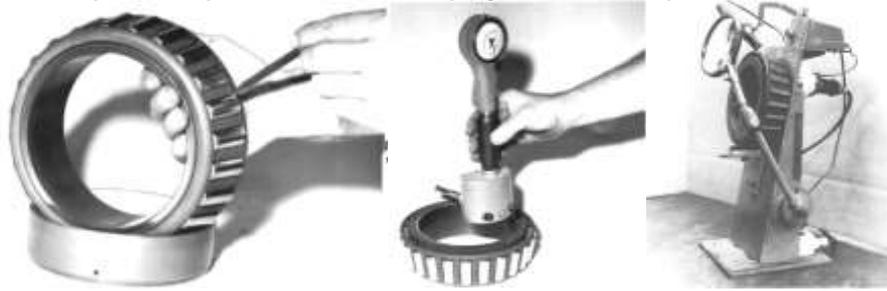
Essa alteração se deve principalmente a contaminação e oxidação da graxa, que é diretamente proporcional ao tempo de utilização e temperatura de trabalho. (30)

Nesses casos, a relubrificação é necessária e esse é um dos principais motivos da existência de manutenção preventiva periódica dos mancais de rolamento. (41)

Conforme citado anteriormente, o envelhecimento da graxa (perda de propriedades) é responsável por cerca de 20% das causas das falhas em mancais de rolamento ferroviários, assim como a contaminação com outros 20%. (28)

Outra etapa crítica é a de inspeção que avalia cada componente e o classifica para reutilização ou sucateamento. Desgastes, folgas, trincas e defeitos superficiais são analisados visualmente com auxílio de algumas ferramentas e calibres conforme Figura 2.17. (40)

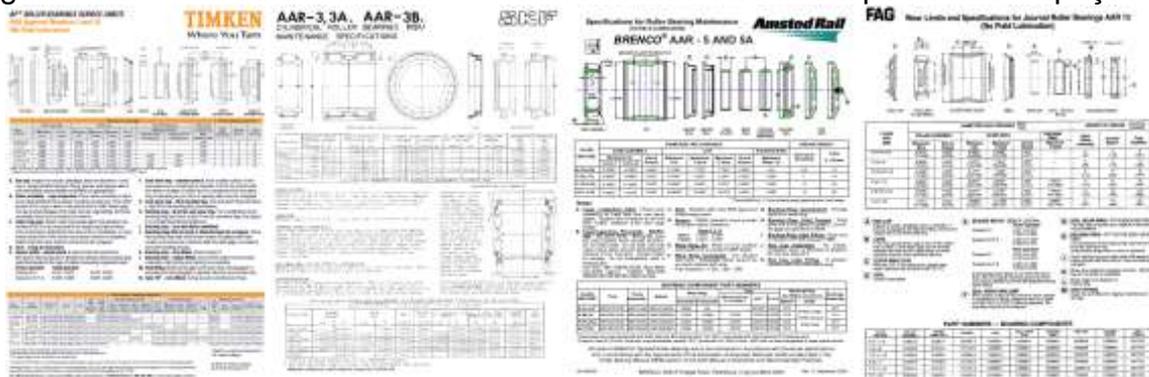
Figura 2.17 Exemplos do processo de inspeção dos componentes



Fonte: AAR (2012).

Todas as dimensões que precisam ser checadas, e suas tolerâncias, para o bom desempenho do rolamento são listadas pelos fabricantes conforme exemplos na Figura 2.18, sendo que a troca dos retentores é sempre obrigatória.

Figura 2.18 Folha de dados dos fabricantes com tolerâncias e pontos de inspeção



Fonte: AAR (2012).

Qualquer defeito superficial possui um padrão visual ou dimensional para ser avaliado. A Figura 2.19 mostra a utilização do gabarito contendo a tolerância dimensional de alguns defeitos superficiais permitidos pela norma. Os componentes fora dos padrões devem ser sucateados e substituídos. (40)

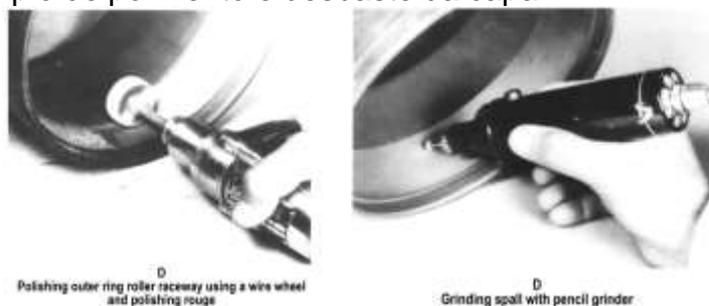
Figura 2.19 Utilização do gabarito indicado na norma para classificação dos defeitos



Fonte: o autor (2017) e AAR (2012).

Alguns defeitos superficiais são passíveis de serem reparados, como por exemplo, corrosão leve ou alteração da coloração podem ser removidas através do polimento conforme Figura 2.20. Pequenos defeitos superficiais, trincas ou fadigas iniciais também podem ser desbastadas conforme mostrado. Os limites de extensão e profundidade são normatizados para cada tipo de problema. (40)

Figura 2.20 Exemplo de polimento e desbaste da capa



Fonte: AAR (2012).

Para investigar a correlação entre a severidade dos defeitos na superfície de rolagem do mancal e o aumento da temperatura, um equipamento foi desenvolvido pela Universidade do Texas para registrar as temperaturas em diferentes velocidades e com aplicação de carga vertical. Diversos mancais de rolamentos foram testados com diferentes configurações de defeitos na pista externa e interna. Os defeitos variaram de 0,25 in² até maiores que 1 in². A Figura 2.21 mostra o eixo com rolamento montado no equipamento que foi desenvolvido com sistema hidráulico para aplicar a carga, motor para girar o eixo e ventiladores simulando movimento. A Figura 2.21 também ilustra um dos componentes analisado no teste com defeitos superficiais. (42)

Figura 2.21 Equipamento desenvolvido para teste e cone testado



Fonte: Tarawneh (2016).

Utilizando ferramentas estatísticas, o trabalho concluiu que para as condições testadas, não houve correlação entre o tamanho dos defeitos e o aumento de temperatura dos rolamentos. Nenhum dos mancais de rolamento atingiu a temperatura limite indicada pela AAR de 76°C acima da ambiente. (42)

Essa condição corrobora com a premissa *as good as new*, que considera que toda manutenção realizada coloca o mancal de rolamento na condição de novo.

2.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi detalhado o mancal de rolamento ferroviário, incluindo a nomenclatura dos componentes internos e suas funções básicas. A teoria da degradação foi explicada e os principais modos de falha foram evidenciados para diversas aplicações similares.

Também foram abordados os principais tipos de monitoramento ao longo da Estrada de Ferro Vitória a Minas que possibilitam maior segurança operacional realizando o diagnóstico dos mancais de rolamento em operação.

O propósito e o fluxo do processo de manutenção foram mostrados, juntamente com os critérios de aceitação para retornar o mancal para operação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Utilizar uma abordagem quantitativa é fundamental para análises de otimização. Esse capítulo descreve o método utilizado para calcular o ponto ótimo da manutenção preventiva de mancais de rolamentos ferroviários. Para isso a distribuição Weibull foi detalhada juntamente com os tipos de dados utilizados para gerar as curvas de confiabilidade. O foco deste trabalho é a otimização do custo de manutenção e por isso uma revisão das definições de preventivas e corretivas são mostradas nas próximas seções.

A NBR 5462 define a manutenção preventiva como aquela efetuada em intervalos predeterminados, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item. A NP EN 13306 complementa esse conceito adicionando que o estado do ativo não é conhecido, ou seja, não existe controle prévio. (43) (44)

Existem autores que simplificam o conceito, definindo a manutenção preventiva como todo o serviço de manutenção realizando equipamentos que não estejam em falha, ou seja, em condições operacionais ou em estado de defeito. (45)

A NBR 5462 define também a manutenção corretiva, como sendo aquela efetuada após algum evento, geralmente resultado de uma falha, que incapacita o equipamento de executar sua função requerida. Essa manutenção tem o objetivo básico de reestabelecer a função requerida do equipamento. (43)

De maneira simplificada é considerar que toda atividade feita após a ocorrência de uma falha com objetivo de tornar o equipamento novamente disponível é uma manutenção corretiva. (46)

Os diversos estudos citados por Rigoni (2009) que fundamentaram o ponto de partida para a Manutenção Centrada na Confiabilidade podem ser adaptados e simplificados em três comportamentos básicos das falhas em equipamentos ao longo do tempo. Esses comportamentos básicos são: falhas por desgaste, aleatórias e prematuras. (47)

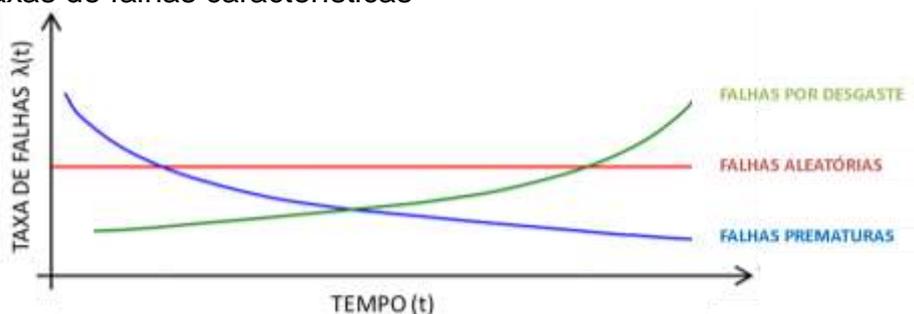
As falhas por desgaste são definidas pela NBR 5462 como falha por deterioração que resulta de mecanismos de degradação inerentes ao item, os quais determinam uma taxa de falha instantânea crescente ao longo do tempo. (43)

A taxa de falhas devido a um projeto inadequado, montagem incorreta, não conformidade da fabricação se inicia elevada e tem a tendência de reduzir a taxa com o passar do tempo, elas também são chamadas de falhas prematuras.

A NBR também define a condição em que a ocorrência da falha é imprevisível, ou seja, qualquer falha que tenha o comportamento aleatório possui a taxa constante ao longo do tempo. (43)

As falhas aleatórias podem ter ou não um comportamento inicial diferente, unindo um comportamento de degradação ou prematuro. Dentre todos os estudos citados por Rigoni, menos de 4% apresenta um comportamento combinado entre os três mecanismos que ilustraria a Curva da Banheira. As três curvas típicas são mostradas na Figura 3.1. Outro ponto destacado nos padrões de comportamento é que a maioria das aplicações práticas, não possui relação entre idade do equipamento e o aumento da taxa de falhas. (47)

Figura 3.1 Taxas de falhas características



Fonte: adaptado de Rigoni (2009).

Uma política de manutenção preventiva seria indicada somente para equipamentos ou componentes que possuem uma taxa de falha crescente, ou seja, que aumentam a probabilidade de falhar com o passar do tempo. Assim para os casos onde não há previsibilidade das falhas, ou elas sejam prematuras, outras políticas são mais indicadas. (48)

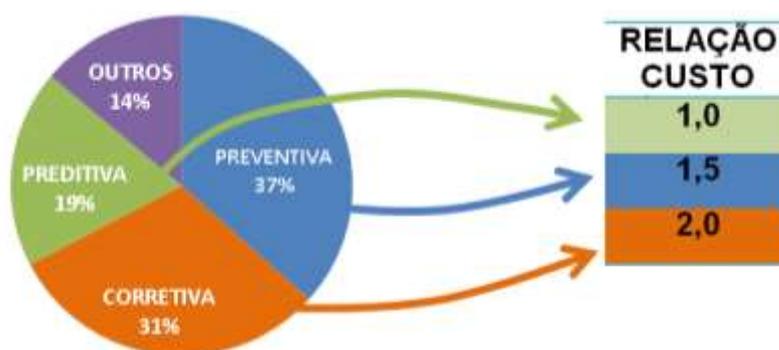
Além da taxa de falhas, o custo de manutenção tem grande relação com a definição da política de manutenção. Quando os custos de uma falha ou indisponibilidade do equipamento são relativamente baixos, a manutenção preventiva deixa de trazer retorno econômico significativo. Pontos relevantes que devem ser considerados são os possíveis danos gerados a segurança e ao meio ambiente devido à consequência de uma falha. (46)

Assim, para que se indique uma manutenção preventiva, os custos de atuação antes da falha devem ser menores que os custos de atuação corretiva. (48) Logo, em alguns casos a política de manutenção pode ser apenas corretiva. (46)

Conforme resultado do relatório da Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (Abraman) de 2013 a manutenção preventiva está percentualmente pouco maior que a manutenção corretiva na indústria brasileira, indicando a falta de planejamento. (49)

Kardec & Nascif fazem uma correlação geral entre os custos para cada tipo de manutenção. Para uma manutenção corretiva não planejada o custo seria no mínimo 30% maior que o custo de uma manutenção preventiva e o dobro da manutenção preditiva. (50) A Figura 3.2 mostra essa relação de custo em conjunto com a distribuição dos tipos de manutenção na indústria brasileira em 2013.

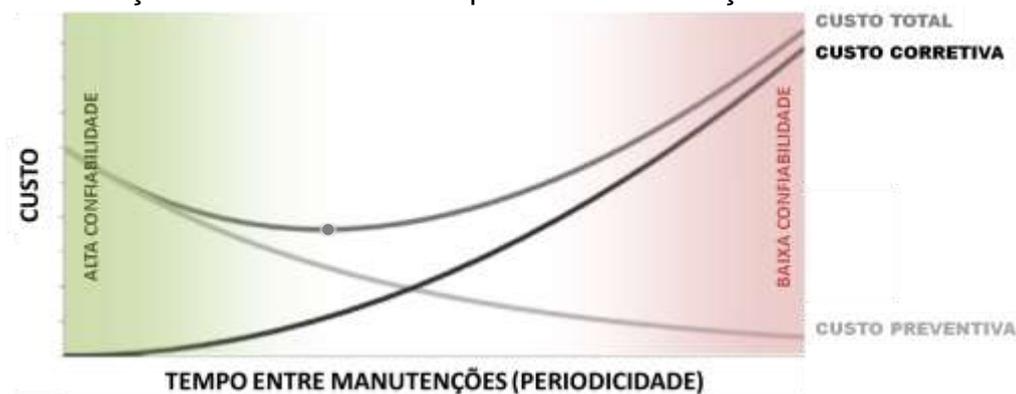
Figura 3.2 Proporção dos tipos de manutenção relacionado com custo



Fonte: adaptado de Viscione (2017) e Kardec (2009).

Com objetivo de minimizar os custos de manutenção a proporção entre as manutenções preventivas e corretivas deve ser analisada. Essa análise deve estudar a periodicidade do plano preventivo, pois o aumento da frequência de maneira conservadora eleva a quantidade de manutenções antes da falha e por consequência os custos. Porém, caso o período entre as manutenções seja elevado a confiabilidade do equipamento fica comprometida e a elevada quantidade de falhas também faz com que os custos aumentem. Esses dois comportamentos são ilustrados na Figura 3.3. A figura também mostra a combinação das políticas de manutenção representada pelo 'custo total, é possível notar que existe um valor mínimo nessa curva que representa o ponto ótimo do custo. (51)

Figura 3.3 Relação do custo com o tempo entre manutenções



Fonte: adaptado de Santana (2010).

Uma maneira de encontrar o tempo ótimo entre manutenções é modelando matematicamente as curvas de custo da manutenção preventiva e corretiva ao longo do tempo. As principais informações além dos custos com materiais, serviços e mão de obra é probabilidade de falha e confiabilidade em relação ao tempo. (48)

Adaptando a NBR 5462 a probabilidade de falha pode ser definida como a probabilidade de um item não “desempenhar uma função requerida, sob dadas condições, durante um dado intervalo de tempo”. (43) Assim a probabilidade acumulada de falhas $F(t)$ se relaciona com a confiabilidade $R(t)$ conforme equação abaixo: (52)

$$F(t) = 1 - R(t) \quad \rightarrow \quad R(t) + F(t) = 1$$

3.1 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL

No dia a dia a confiabilidade tem diferentes significados, mas nesse caso é a probabilidade de um item desempenhar sua função sem falhar por um determinado período dentro das condições especificadas. Assim a confiabilidade é em função do tempo. (52)

Em 1939 Waloddi Weibull desenvolveu um método e equações estatísticas para avaliar a resistência a fratura de diversos materiais baseado em pequenas populações. Esse método pode ser e tem sido aplicado para analisar, determinar e prever a distribuição acumulada de falhas por degradação e outros fenômenos físicos. (53)

A tese de Assis (2013) lista alguns dos inúmeros trabalhos publicados utilizando a distribuição Weibull. Os temas incluem estudos sobre alturas de ondas, conflito de tráfego, falhas em rolamentos, previsão de mudanças tecnológicas, terremotos etc. (54) Outros exemplos são citados na literatura, como estudos de garantia, seguro, crescimento de árvores e planejamento de estoque. (55)

A distribuição de Weibull é uma das mais largamente utilizadas na engenharia de confiabilidade. Ela consegue modelar os principais comportamentos de falha através da variação de seus parâmetros. (56)

E por isso é citada por alguns autores como a melhor distribuição para representar eventos relacionados a sistemas técnicos, (46) “pois se tem em mãos uma distribuição que pode representar qualquer curva de taxa de falha no tempo” conforme referida por Barbosa. (57)

Um dos principais é o parâmetro de forma β , que pode auxiliar na elaboração da estratégia de manutenção do equipamento. A Figura 3.4 ilustra o comportamento da taxa de falhas com a variação do valor de β . (46)

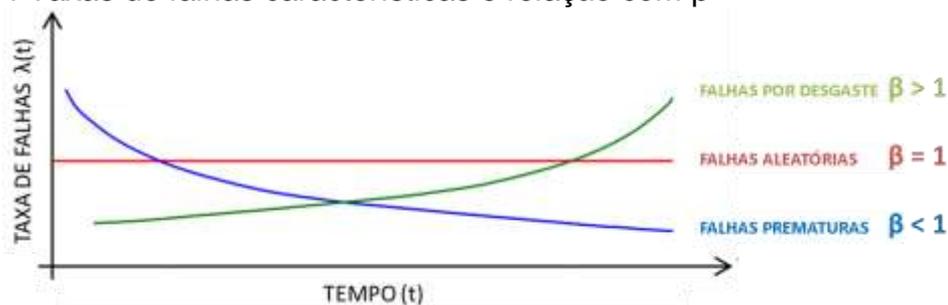
Para valores de β menores que 1, o equipamento possui característica de falhas prematuras como descrito anteriormente que podem ter origem na especificação, projeto, aplicação, montagem ou utilização. (46)

Quando β se iguala a 1 a taxa de falhas é constante e a distribuição de Weibull se comporta de forma idêntica a função Exponencial. Alguns exemplos são componentes eletrônicos, tais como capacitores, transistores, resistores e circuitos integrados. Para esse caso em específico a taxa de falhas pode ser calculada utilizando o tempo inverso do tempo médio para falhar ($1/MTTF$). (48)

Para valores de β maiores que 1 a taxa inicia baixa e evolui conforme comportamento de falhas por desgaste. Essa degradação ou envelhecimento decorre do desgaste natural, que será maior com o passar do tempo. (50)

Esses comportamentos, curva da taxa de falhas em relação ao tempo para os diferentes valores de β estão ilustrados na Figura 3.4.

Figura 3.4 Taxas de falhas características e relação com β



Fonte: adaptado de Rigoni (2009).

A distribuição se aproxima da distribuição Normal para valores de β próximos a 3,5, para o valor de 2,5 se aproxima da distribuição Lognormal e quando é igual a 2 a taxa de falhas cresce de forma linear seguindo a distribuição de Rayleigh. (31)

Outro parâmetro da função é o η que é conhecido como vida característica. Ele representa um tempo (horas, ciclos, etc) em que 63,2% da população falha até este instante independente do valor de beta. Ou seja, a partir do tempo η existem 36,8% de sobreviventes. (59)

Se analisar a confiabilidade de um único indivíduo, o η pode ser interpretado como tempo no qual existe uma probabilidade aproximada de 63,2% que o equipamento ou item venha a falhar. O η também pode ser chamado de parâmetro de escala. (57)

A distribuição pode ser somente os dois parâmetros apresentados (β e η) ou ser tripamétrica considerando o γ ou t_0 . Esse parâmetro é o tempo de falhas livre, ou seja, até esse tempo não existe probabilidade de falha. Esse parâmetro também é conhecido como parâmetro de localização. (46)

A confiabilidade $R(t)$ que descreve a probabilidade de sobrevivência como função do tempo e a função acumulada de falhas $F(t)$ Weibull tripamétrica são detalhadas nas equações: (59)

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad \rightarrow \quad F(t) = 1 - R(t)$$

η - Vida característica

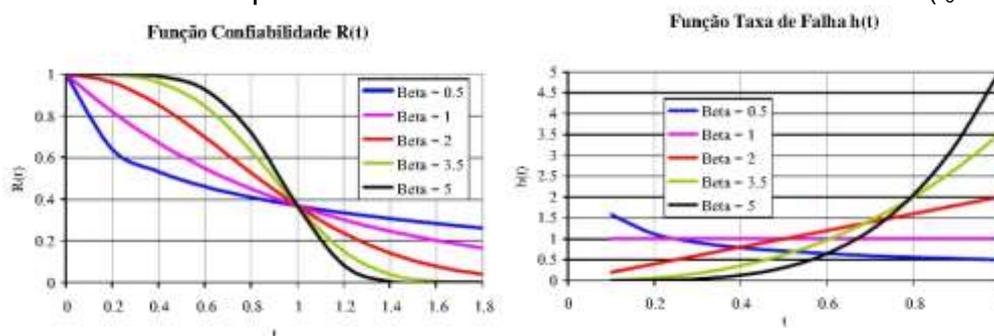
β - Parâmetro de forma

γ ou t_0 - Vida mínima ou parâmetro de localização

t - Período de vida transcorrido

A Figura 3.5 mostra a influência da variação dos valores de beta nas curvas de confiabilidade e taxa de falhas. Se observarmos o tempo $t=1$ no gráfico da função de confiabilidade $R(t)$ da Figura 3.5 veremos que ele é o ponto de inflexão para todas as curvas independente do β . Esse é o ponto onde $t = \eta$ (vida característica). Se calcularmos a confiabilidade para $t = \eta$ utilizando a Weibull, teremos $R(\eta) = 1/e \approx 0,3679$ e a probabilidade de falha $F(\eta) = 1 - 1/e \approx 0,6321$. (59)

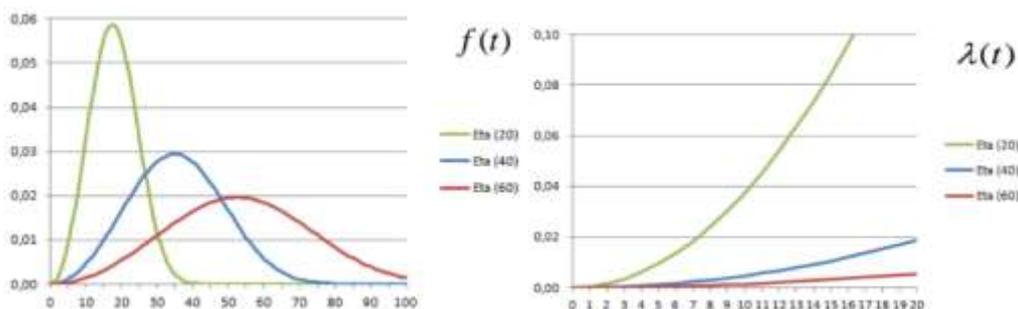
Figura 3.5 Influência de β sobre taxa de falhas e sobre a confiabilidade ($t_0=0$ e $\eta=1$)



Fonte: Assis (1999).

Conforme mostra a Figura 3.6, a vida característica também pode ser utilizada para comparar desempenho dos equipamentos. É possível notar que a taxa de falhas cresce de maneira inversamente proporcional ao η , ou seja, quanto maior o η menor o crescimento da taxa de falhas. (60)

Figura 3.6 Influência de η sobre taxa de falhas e sobre a confiabilidade ($\beta=3$ e $\gamma=0$)

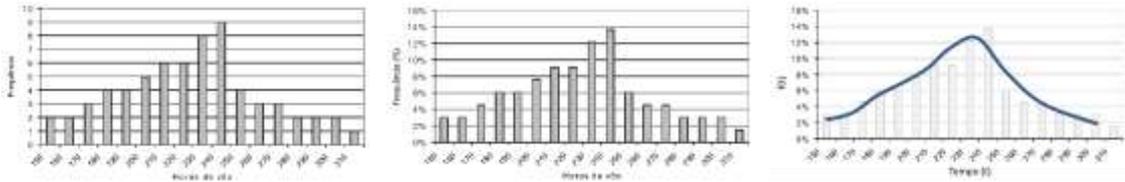


Fonte: Rigoni (2017).

A função densidade de probabilidade pode ser explicada utilizando um exemplo hipotético. O exemplo da Figura 3.7 mostra o histograma do sucateamento de pneus agrupados em função do tempo de um lote completo. O mesmo histograma pode ser representado em porcentagem de frequência. Uma curva que

descreve o comportamento da população de pneus é chamada de função densidade de probabilidade (fdp ou pdf), conforme linha contínua que passa por todos os valores de sucateamento. (59)

Figura 3.7 Exemplo de construção da curva da função densidade de probabilidade

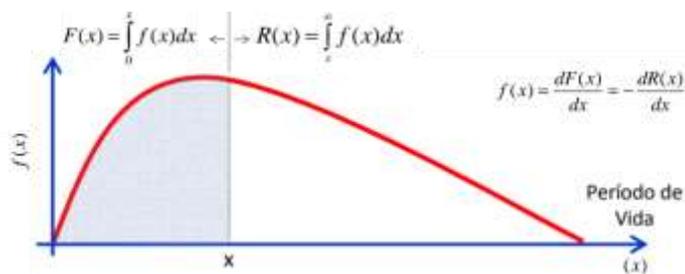


Fonte: adaptado de Assis (1999).

Uma vez que a curva é contínua e contempla todos os valores possíveis no tempo, a área sob esta será igual a 100% da população. Ou seja, a integral em todo tempo t ($-\infty$ até $+\infty$) da função em relação ao tempo é igual a 1. (59)

Para uma função densidade de probabilidade, a área acumulada até o ponto x , conforme ilustra a Figura 3.8, é a probabilidade acumulada de falha até o ponto x ($F(x)$). E a área sob a curva após o ponto x é a probabilidade de sobrevivência ou confiabilidade após o ponto x ($R(x)$). Assim, $R(x) + F(x) = 1$. (60)

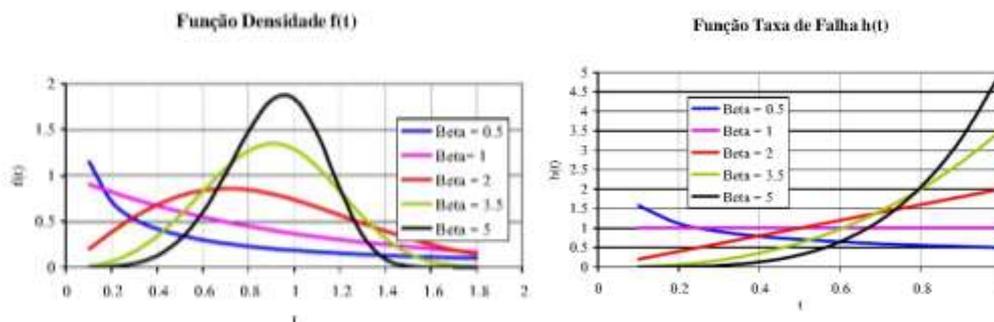
Figura 3.8 Relação entre $f(t)$, $F(t)$ e $R(t)$



Fonte: adaptado de Rigoni (2017).

A relação entre a função densidade de probabilidade Weibull $f(t)$ e sua confiabilidade é denominada taxa de falhas $h(t)$, ou seja, $h(t) = f(t)/R(t)$. A influência dos valores de beta conforme citado anteriormente está ilustrada na Figura 3.9. (59)

Figura 3.9 Influência de β sobre taxa de falhas e sobre a pdf ($t_0=0$ e $\eta=1$)



Fonte: Assis (1999).

O comportamento da taxa de falhas foi explicado anteriormente conforme a Figura 3.4, porém agora é possível visualizar o comportamento da função densidade de probabilidade para os diferentes valores de beta citados anteriormente.

3.2 TIPOS DE DADOS

A medida mais importante para estimar as curvas de confiabilidade é o tempo até a falha. Para Fogliatto ele é o “tempo transcorrido desde o momento em que a unidade é colocada em operação até a sua primeira falha”. (61)

De maneira adaptada o comportamento da degradação de mancais de rolamentos ferroviários pode ser ilustrado na Figura 3.10. A definição do estado de falha em mancais de rolamento fica definida como qualquer ruído, aquecimento, excesso de atrito ou parâmetro de manutenção fora dos padrões que fazem com que tenha que ser substituído. Diferente da norma da American Bearing Manufacturers Association (ABMA) que afirma que o critério de falha é a primeira evidência de fadiga, o que será analisado são suas possíveis consequências. Ou do critério de fadiga utilizado pelo fabricante do rolamento que utilizam a medição da área dos defeitos internos acima de $0,01 \text{ in}^2$. (12)

Figura 3.10 Evolução do dano para um componente similar

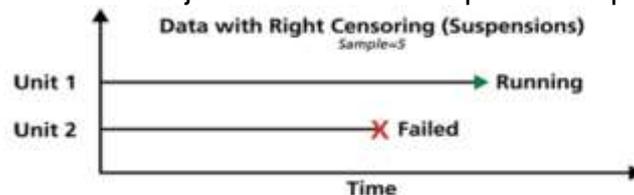


Fonte: Tchakoua (2014).

A precisão dos parâmetros estimados para as curvas de confiabilidade (exemplo: β , η e γ) estão diretamente ligadas a qualidade e acuracidade dos dados de tempos até a falha coletados. Existem basicamente dois tipos de dados de tempos até a falha, completos e censurados. Os dados completos são aqueles em que o tempo de início da operação e tempo da falha é conhecido, assim é possível calcular o tempo em operação até a falha. (59)

Existem diversos tipos de dados censurados, o mais comum é o dado suspenso que é aquele que representa itens ou equipamentos que foram retirados de operação, mas não estavam em estado de falha. O tempo de início da operação é conhecido e o tempo da retirada de circulação também, porém não é possível calcular o tempo até a falha. Esses dois exemplos estão ilustrados na Figura 3.11 abaixo, onde duas unidades iniciaram a jornadas juntas. A unidade 1 foi retirada de circulação antes da falha e a unidade 2 após a falha. (62)

Figura 3.11 Exemplo de um conjunto de dados completos suspensos



Fonte: Reliasoft (2017).

Atualmente, com ajuda de *softwares* estatísticos que utilizam as equações mostradas, a determinação dos parâmetros (exemplo: β , η e γ) pode ser feita numérica e automaticamente.

3.3 OTIMIZAÇÃO DO CICLO DE MANUTENÇÃO

A política de manutenção preventiva considera que um item ou equipamento será substituído quando falhar ou até atingir uma idade T , o que ocorrer primeiro. O desafio é encontrar o tempo T que pode ser otimizado para diversas finalidades, como por exemplo, disponibilidade, confiabilidade ou custos. (63)

O ciclo esperado de troca (ou tempo do ciclo de manutenção) é denominado $E[T]$ e o custo de todo o ciclo é o $E[C]$. O modelo consagrado de Barlow & Hunter

define o custo como $Z(T)$ e o intervalo ótimo de manutenção preventiva é o tempo T que minimiza essa equação: (59)

$$Z(T) = E[C] / E[T]$$

A função do custo $Z(T)$ representa o valor médio com manutenção por unidade de tempo, e é composta por uma parte determinística relacionada aos custos com manutenção preventiva cíclica e outra aleatória relacionada aos custos das manutenções corretivas. As equações abaixo mostram o detalhamento do custo $E[C]$ e do tempo do ciclo $E[T]$. (64)

$$E[C] = C_f \int_0^T f(t) dt + C_p \int_T^{\infty} f(t) dt = C_f F(T) + C_p R(T)$$

$$E[T] = \int_0^T t f(t) dt + T \int_T^{\infty} f(t) dt = \int_0^T R(t) dt$$

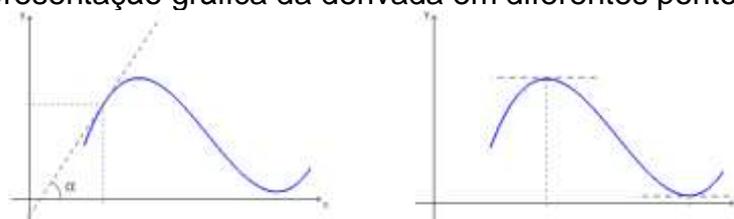
$$\min: Z(T) = \frac{E[C]}{E[T]} = \frac{C_f F(T) + C_p R(T)}{\int_0^T R(t) dt}$$

Assim, minimizando o quociente $Z(T)$ estamos indiretamente minimizando o numerador e maximizando o denominador. Isso significa reduzir o custo esperado $E[C]$ e aumentar o intervalo de tempo entre manutenções $E[T]$. (59)

Em engenharia, os problemas geralmente são complexos e não lineares podendo utilizar-se de métodos numéricos para sua solução. Os métodos determinísticos, baseados no cálculo de derivadas produzem bons resultados. (65) Em muitos casos esses problemas envolvem maximização de lucro ou minimização de custos e a derivada pode auxiliar nessa otimização. (66)

A derivada pode ser interpretada geometricamente como a inclinação de uma reta tangente a uma curva conforme Figura 3.12. (66) Nela também é possível observar que existe um ponto local mínimo e um máximo e que as retas tangentes a esses pontos são horizontais paralelas ao eixo x , portanto com inclinação igual a zero. Ou seja, nesses pontos a derivada da função é igual a zero. (67)

Figura 3.12 Representação gráfica da derivada em diferentes pontos



Fonte: Santana (2010).

Com isso, para minimizar a equação $Z(T)$ é necessário encontrar a raiz de $Z'(T)$, ou seja, resolver a equação $Z'(T) = 0$. A equação $Z'(T) = 0$ é transcendente (não algébrica) e sua solução pode contar com auxílio do cálculo numérico utilizando métodos como Newton-Raphson para solução de equações que garante uma precisão em centésimos. (68)

Outro método mais simples utilizado na busca de $Z(T)$ mínimo é a resolução dos valores $Z(T)$ para diversos tempos T e com o auxílio do gráfico $Z(T) \times T$ identificar o ponto ou região mínimo. (59)

A Figura 3.13 a seguir ilustra o fluxo das etapas para conseguir chegar a função do custo $Z(T)$ utilizando o software de confiabilidade Weibull++ da Reliasoft.

Figura 3.13 Fluxo das etapas para estudos de minimização do custo



Fonte: o autor (2017).

Essa figura simplifica um fluxo de uma otimização genérica, porém outras etapas devem ser inseridas dependendo da complexidade do sistema. O software utilizado é somente um dos métodos de se obter as curvas de confiabilidade e custos de manutenção podem necessitar de outras etapas de detalhamento, assim como a minimização de $Z(T)$.

3.3.1 Custo manutenção corretiva

O custo da manutenção corretiva deve ser calculado através do somatório dos custos de todas as tarefas necessárias para tornar o item ou equipamento novamente disponível. Essa parada originada por uma falha não programada e tudo relacionado a ela deve ser contabilizada. Até os custos indiretos como processos judiciais ou indenizações devem ser levados em consideração. (59)

O termo custo da 'não-confiabilidade' foi criado para descrever essa situação de eventos de falha que não estão atreladas a planos preventivos ou preditivos. Além dos custos citados anteriormente, os custos devido as perdas de produção (qualidade ou quantidade) devem ser considerados como custos diretos. Outros custos indiretos conhecidos da 'não-confiabilidade' são: (69)

- 1) Todos os custos envolvidos para estar preparado para responder as falhas. Uma empresa que trabalha de forma reativa tende a ser maior que empresas proativas.
- 2) O custo da perda de negócios ou vendas com o não cumprimento dos prazos de entrega ou devido à baixa qualidade do produto.

A manutenção corretiva pode ser o método mais caro, pois para reduzir os impactos operacionais, é necessário estoque elevado de peças sobressalentes e maior utilização de hora extra. Ela também tende a reduzir a vida do equipamento e das instalações. Existe o risco aumentado de paradas por falhas em períodos de cronograma apertado que aumentam as chances de retrabalho e redução da disponibilidade dos equipamentos. (70)

Apesar de em alguns casos indesejada ela é a forma de manutenção mais primária e impossível de ser eliminada completamente, pois não se consegue prever o momento exato de uma pane. (64)

3.3.2 Custo manutenção preventiva

A manutenção preventiva por conceito atua antes de uma falha, assim todos os custos necessários para manutenção ou substituição do componente ou equipamento devem ser considerados, incluindo as horas trabalhadas diretamente, indiretamente (administrativo), custos com material e serviços. (59)

Se o período da manutenção preventiva for bem calculado ele tende a reduzir os custos de indisponibilidade do equipamento, estoque de peças ou ociosidade das máquinas. (71)

Além das tarefas diretas envolvendo o reparo ou substituição do equipamento em si, a programação e o planejamento se tornam ainda mais importantes em uma política preventiva. Ela envolve a escolha de técnicos com conhecimento para

determinar os itens e tarefas relevantes, assim como o estudo dos tempos para manutenções e/ou entre manutenções. (72)

Uma das bases do Sistema de Produção da Vale (VPS) fundamentado nos conceitos da Toyota é a estabilidade, conforme mostra a Figura 3.14. Mesmo na manutenção é possível utilizar os conceitos da produção enxuta fazendo com que a padronização e melhoria contínua estejam presentes com maior perenidade. (73)

Figura 3.14 Conceitos da Produção Enxuta



Fonte: Vale (2013).

Como a manutenção preventiva tende a ter tarefas mais padronizadas em comparação a manutenção corretiva, é possível ter um fluxo contínuo com tempos determinados, consumo de materiais previsíveis e outras vantagens com o objetivo de reduzir o *lead time*, otimizar os custos e aumentar a qualidade do serviço.

3.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram mostrados os dois tipos de estratégia de manutenção utilizados para os mancais de rolamento da EFVM, preventivo e corretivo.

A principal distribuição de confiabilidade Weibull foi descrita, assim como o significado de cada um de seus parâmetros e influência nas curvas de taxa de falhas, confiabilidade e função de densidade de probabilidade.

O memorial de cálculo genérico de otimização monótono foi mostrado, assim como o conceito geral do cálculo dos custos de manutenção preventivo e corretivo.

4 DESENVOLVIMENTO

Antes da aplicação das curvas de confiabilidade, principalmente a probabilidade acumulada de falhas, é importante realizar uma validação comparando com outras aplicações similares. Assim alguns trabalhos sobre a confiabilidade de mancais de rolamentos ferroviários utilizando a distribuição Weibull são mostrados neste capítulo.

As curvas de confiabilidade resultantes da utilização dos dados de manutenção coletados são mostradas juntamente com os cálculos das taxas de sucateamento para as diferentes classes de mancais de rolamento.

Os cálculos dos custos de manutenção dependem de cada aplicação e por isso as próximas seções mostram uma adaptação proposta para que o cálculo do ponto ótimo de manutenção. E a seção subsequente utiliza todas as informações geradas para tentar determinar um ponto ótimo de manutenção que apresente menor custo.

A especificação de projeto para mancais de rolamento ferroviário definida pela AAR é uma vida mínima esperada em que não mais de 10% tenham que ser substituídos por fadiga dos componentes internos. O período mínimo depende da classe do rolamento, mas está entre 1,2 a 1,6 milhões de quilômetros aproximadamente. (74)

Essa vida também pode ser chamada de vida B10 e isso significa que a confiabilidade para esse tempo (km, ciclos ou revoluções) é de 90%. A ABMA utiliza esse critério e o denomina como vida nominal. (19)

Um conjunto de mancais apresentará ampla variação na vida para grandes amostras. A Figura 4.1 mostra a distribuição típica da vida para mancais de rolamento. (16)

Figura 4.1 Distribuição típica da vida de mancais



Fonte: Norton (2004).

Diferente de outras aplicações, os mancais de rolamento não seguem uma distribuição normal ou gaussiana, eles se distribuem estatisticamente conforme a Weibull, que é desviada. (16)

Em 1947 Lundberg e Palmgren utilizaram a distribuição de Weibull para estabelecer a teoria básica da dispersão estocástica para a vida de rolamentos. Eles incluíram os parâmetros de contato da teoria de Hertz para obter uma relação entre a vida e a carga para mancais de rolamento. Essa relação pode ser expressa de uma maneira relativamente simples, conforme equação abaixo: (75)

$$L_{10} = (C/P)^p$$

Onde C é a capacidade de carga dinâmica básica, que depende da geometria do mancal de rolamento e P é a carga dinâmica equivalente. Para mancais de rolamento com esferas p é 3 e 10/3 para o caso de rolos. Essa equação foi adaptada e utilizada pela ISO a partir de 1962. Ao longo dos anos, diversas constantes e fatores foram introduzidos para diferentes níveis de confiabilidade, propriedades dos materiais e lubrificantes, resultando na equação atual da ISO 281:2010 Mancais de rolamentos - Capacidade de carga dinâmica e vida útil estimada: (75)(76)

$$L = a_1 a_{ISO} L_{10}$$

Além do fator de modificação da vida para confiabilidade a_1 , foi inserido um fator global a_{ISO} . Esse fator possui diversos cálculos e tabelas empíricas de referência que levam em consideração o tipo, tamanho e geometria dos componentes internos do mancal de rolamento, o perfil da pista, rotação, limite de fadiga do material, tipo de lubrificante, nível de contaminação, entre outros. (76)

Apesar da evolução das equações para estimar a vida dos mancais de rolamento, a norma deixa claro que “não considera a influência do desgaste,

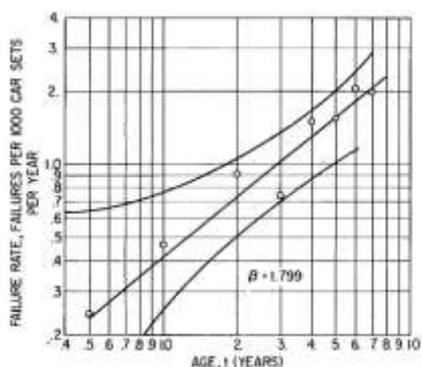
corrosão e erosão elétrica na vida do rolamento”. E também não indica a aplicação das equações para os casos de cargas extremamente elevadas que possam causar deformações plásticas nos componentes, mais especificamente nos casos onde a carga dinâmica equivalente é maior que metade de capacidade dinâmica básica. (76)

Assim em alguns casos a melhor maneira de calcular a vida é através da coleta dos dados de campo dos mancais de rolamento. Ou seja, coletar os dados até a falha (ou suspensões) de um número suficiente de amostras para estimar o comportamento através de curvas estatísticas.

4.1 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL APLICADA A MANCAIS DE ROLAMENTO

Um dos primeiros estudos sobre a confiabilidade dos mancais de rolamentos com rolos cônicos em vagões ferroviários nos Estados Unidos coletou os dados de vendas de mancais rolamentos (início de operação) ao longo de alguns anos e os dados dos relatórios de falhas registrados na AAR. A taxa de falhas para uma amostra de mais de 200 mil rolamentos em operação e 302 falhas devido a rolamentos aquecidos foi representada pela distribuição Weibull e o beta estimado foi de 1,79, conforme mostra a Figura 4.2. (77)

Figura 4.2 Curva da taxa de falhas para mancais ferroviários

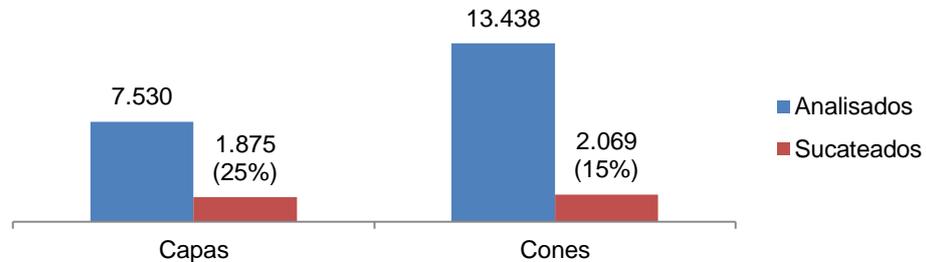


Fonte: Mcgrew (1977).

No mesmo trabalho, os dados de manutenção também foram estudados, baseados em três oficinas com informações referente a dois meses, totalizando mais de 7.500 mancais de rolamentos conforme Gráfico 4.1. Os componentes sucateados

seguiram os critérios e limites de defeitos descritos na AAR. Cada mancal de rolamento possui uma capa e dois conjuntos de cones que apresentaram uma taxa de sucateamento de 25% e 15% respectivamente. (77)

Gráfico 4.1 Mancais de rolamento analisados



Fonte: Adaptado de Mcgrew (1977).

O resultado das análises dos dados de manutenção chegou a estimativa de betas específicos para cada modo de falha (sucateamento) para capas e cones. Os valores variaram entre 1,29 e 1,96. Os valores de beta e L_{10} também foram calculados conforme mostra Tabela 4.1. (77)

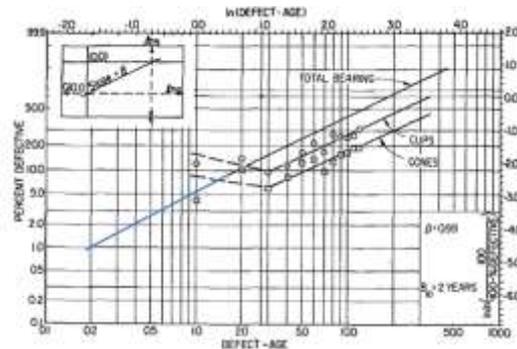
Tabela 4.1 Parâmetros da distribuição Weibull para diferentes defeitos

	CAPA			CONE		
	Vida característica	L_{10}	Beta	Vida característica	L_{10}	Beta
Oversize	30,39	9,63	1,96	52,57	9,19	1,29
Spalling	42,45	12,84	1,88	145,11	30,37	1,44
Brinelling	46,95	9,79	1,44	50,85	15,37	1,88
Total	28,17	5,64	1,5	35,6	6,5	1,32

Fonte: adaptado de Mcgrew (1977).

Baseado em todos os dados agrupados e utilizando a distribuição bi paramétrica de Weibull foi plotado a probabilidade acumulada de falhas conforme Figura 4.3. (77)

Figura 4.3 Probabilidade acumulada de falhas

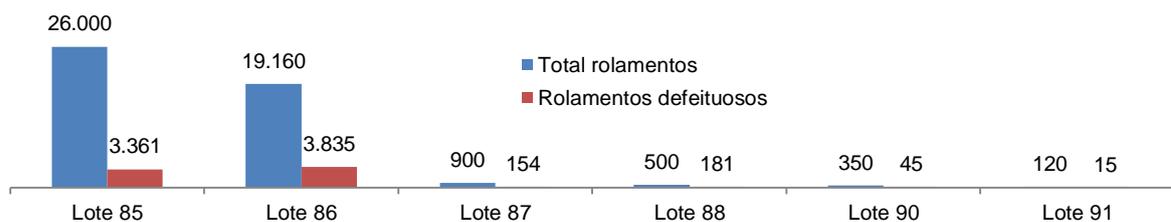


Fonte: Mcgrew (1977).

O trabalho concluiu que a vida L_{10} de acordo com os dados de sucateamento mostrados anteriormente foi de aproximadamente dois anos. Essa vida é menor do que a especificada pela AAR, porém o estudo ressalta que a norma se refere somente aos dados de fadiga, sem considerar os modos de falhas competitivos, como por exemplo, o desgaste do diâmetro interno do cone ou as deformações plásticas devido a impactos e outros defeitos conforme Tabela 4.1. (77)

No ano 2000, foram avaliados alguns lotes de mancais de rolamentos de vagões ferroviários provenientes de vagões de minério do tipo GDT da Estrada de Ferro Carajás. Os dados de diferentes lotes totalizaram 7.591 rolamentos defeituosos de uma amostra de 47.030 unidades conforme Gráfico 4.2. (78)

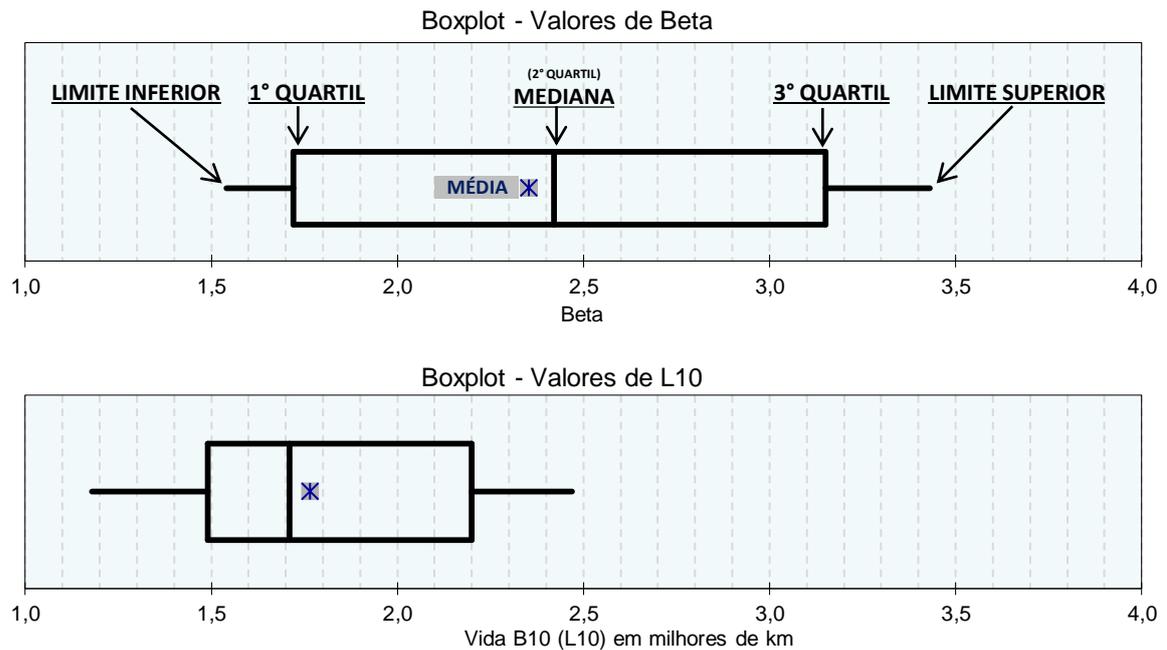
Gráfico 4.2 Características das amostras analisadas



Fonte: adaptado de Araujo (2010).

Os lotes foram avaliados individualmente e também agrupados. Com objetivo de resumir os dados do trabalho foi realizada uma estatística descritiva dos quartis que está ilustrada no Gráfico 4.3 *boxplot*, para os valores de beta e L_{10} encontrados. Com todos os dados agrupados o beta foi de 1,72 e o L_{10} de 2,2 milhões de quilômetros. (78)

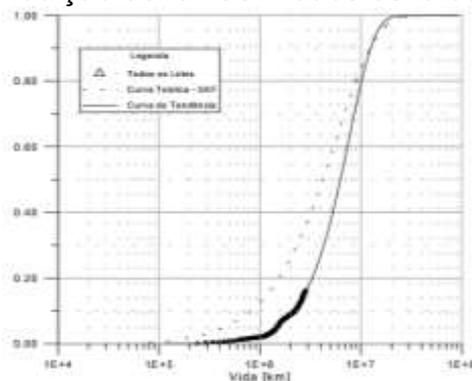
Gráfico 4.3 *Boxplot* dos valores de beta e L₁₀



Fonte: adaptado de Araujo (2010).

No trabalho também foi realizado uma comparação do resultado experimental com o teórico, que concluiu que a equação teórica utilizada (79) é conservadora, ou seja, antecipa os eventos de falha. É possível observar essa comparação no Figura 4.4, onde a linha pontilhada (teórica) aumenta antes dos dados reais. (78)

Figura 4.4 Função de distribuição de falhas - todos os lotes



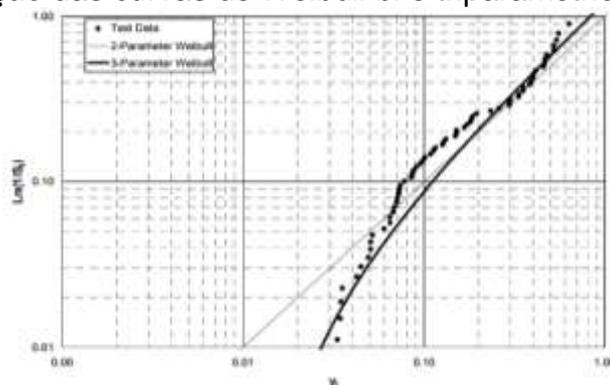
Fonte: Araujo (2010).

O trabalho publicado em 2006 pela Timken cita diversas referências que utilizaram a Weibull triparmétrica (β , η e γ) para mancais de rolamento e verificaram a existência de um período sem falhas, ou seja, 100% de confiabilidade ($\gamma > 0$). O

objetivo do estudo foi verificar se o comportamento, para mancais de rolamento ferroviários, poderia ser modelado por essa distribuição e confirmar a existência de um período sem falhas. (80)

O estudo se baseou na análise de 9.982 rolamentos ferroviários e concluiu que existem evidências de uma vida mínima sem falhas. A Figura 4.5 mostra um dos resultados comparando a plotagem dos dados juntamente com a distribuição Weibull com dois e três parâmetros. O valor estimado do beta foi de 1,68. (80)

Figura 4.5 Comparação das curvas de Weibull bi e tripamétrica



Fonte: Kotzalas (2006).

Uma das conclusões foi que a Weibull tripamétrica utilizada se ajustou melhor aos dados coletados, mas que o resultado foi de certa maneira conservadora conforme mostra Figura 4.5. (80)

4.2 ESTUDO DE CASOS EFVM

De maneira um pouco diferente dos trabalhos mostrados, o objetivo deste é otimizar o período entre manutenções preventivas dos mancais de rolamento e para isso é necessário conhecer o comportamento dos rolamentos que necessitam ser enviados para manutenção.

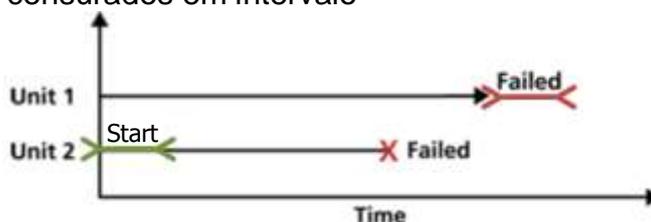
Conforme exposto no Capítulo 2.2, a manutenção da EFVM possui diversas formas de identificar possíveis anomalias nos mancais de rolamento: ruído através do detector acústico ou inspeção dinâmica sensitiva, temperatura através dos detectores de *hotbox* ao longo da ferrovia e inspeção sensitiva durante a inspeção manual dos rodeiros.

Os dados de cada rolamento removido de rodeiros em circulação e enviado para manutenção são coletados juntamente com as informações do motivo, data de aplicação e retirada do mancal de rolamento, independente da origem/necessidade corretiva ou preventiva.

A base de dados utilizada contempla os dados de janeiro de 2016 a agosto de 2017, totalizando mais de 22 mil mancais de rolamentos. Com essa base é possível calcular os tempos até a falha, que para esse caso são os tempos até a manutenção. Os mancais de rolamentos enviados somente pelo motivo do período preventivo foram considerados suspensos e os mancais que possuíam anomalias foram considerados completos.

O tratamento inicial dos dados mostrou uma incerteza na data da aplicação do mancal de rolamento, somente a informação do semestre e ano de aplicação está disponível. Esse tipo de dado poderia ser considerado como dado censurado em um intervalo, que pode refletir a incerteza da data do início da data da aplicação ou a incerteza do tempo em que a falha ocorreu, conforme mostra a Figura 4.6. Esse segundo caso é mais frequente em situações onde o equipamento ou componente não é monitorado constantemente. Outro exemplo seria um equipamento sendo monitorado em um período determinado e a falha na maioria das vezes irá ocorrer dentro do intervalo e não em um tempo específico, ou seja, entre os tempos de inspeção.

Figura 4.6 Dados censurados em intervalo

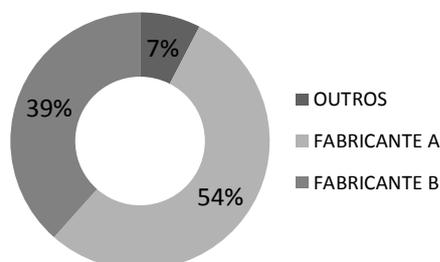


Fonte: adaptado de Reliasoft.

Para o caso específico dos mancais de rolamentos da EFVM, após avaliação da base de dados, a informação da data de aplicação do mancal de rolamento foi simplificada considerando a mediana do semestre. Um exemplo dessa simplificação seria um componente aplicado no segundo semestre de 2014 que teve a data de aplicação simplificada para 30 de setembro de 2014.

A base de dados também mostra uma predominância de dois fabricantes, conforme Gráfico 4.4, e por isso somente os dois foram considerados nas análises.

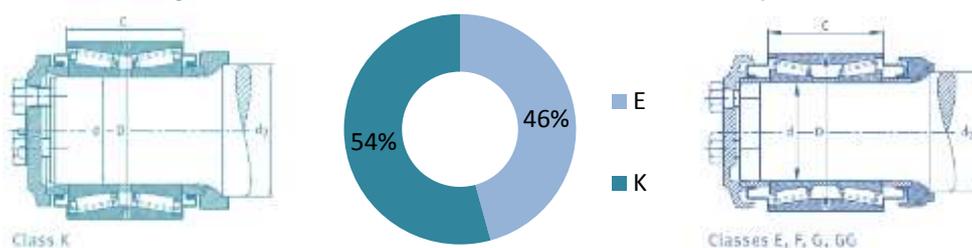
Gráfico 4.4 Distribuição dos dados de mancais por fabricante



Fonte: Autor.

Outra característica é a diferença entre as classes existentes conforme classificação da AAR, classe K e classe E, que são projetados para cargas estática diferentes, 34,4 e 26,3 kips respectivamente. A proporção na frota entre as classes está ilustrada no Gráfico 4.5 juntamente com uma representação esquemática do projeto de cada um. Além da classe o rolamento também é conhecido pelas dimensões da manga do eixo (diâmetro x comprimento) onde são montados com interferência, rolamentos classe K são montados em eixos com dimensões 6. ½"x 9" e rolamentos classe E em 6"x 11".

Gráfico 4.5 Distribuição dos dados de mancais de rolamento por classe

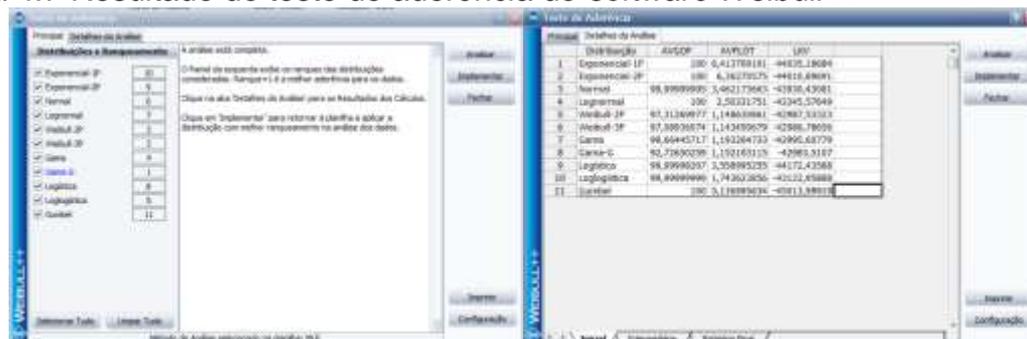


Fonte: o autor (2017).

Uma das etapas da análise dos dados de vida é a seleção da distribuição e todos os trabalhos citados utilizaram a distribuição de Weibull, porém os dados deste trabalho são dados até a manutenção e não até a falha. Por isso foi utilizado o *software* Weibull++ para confirmar se essa distribuição se ajustaria aos dados de manutenção. Ele utiliza três fatores (teste Kolmogorov-Smirnov, coeficiente de correlação normalizado e o valor de verossimilhança) para ranquear as distribuições

e indicar qual se ajusta melhor aos dados inseridos. O resultado da análise está exemplificado na Figura 4.7, mostrando que a Weibull triparamétrica foi a segunda mais indicada para os dados inseridos. Assim ela foi utilizada para que seja possível realizar alguma comparação entre o resultado do estudo com outros trabalhos da literatura.

Figura 4.7 Resultado do teste de aderência do software Weibull++



Fonte: o autor (2017).

Após a seleção da distribuição, o próximo passo é a estimação dos parâmetros que se refere ao processo de utilização das amostras de tempos até a falha (completos ou suspensos) para determinar os parâmetros da distribuição selecionada de maneira que ela se ajuste ao comportamento desses dados. (56)

O método da máxima verossimilhança, em inglês *maximum likelihood estimates* (MLE), é um método consolidado de estimação de parâmetros de modelos estatístico. Seu uso é difundido devido a sua consistência, eficiência assintótica, normalidade assintótica e invariância. (81)

A utilização do MLE para estimar os parâmetros é recomendada quando a amostra contém dados suspensos e completos, grandes amostras, suspensões após todas as falhas e dados agrupados. (82)

4.2.1 Análise dos dados de manutenção

A Tabela 4.2 resume o resultado da estimação dos parâmetros para a base de dados agrupada de maneiras diferentes. A base contém mais de 20 mil amostras com o tempo até a falha (manutenção) em meses, o beta variou ente 1,49 e 1,76

para os diferentes grupos. Esse comportamento é similar ao encontrado nos trabalhos citados, onde as taxas de falhas também são crescentes e os valores de beta ficaram próximos. Para alguns casos ele apresentou um período sem falhas, mas na maioria dos grupos ele não foi significativo.

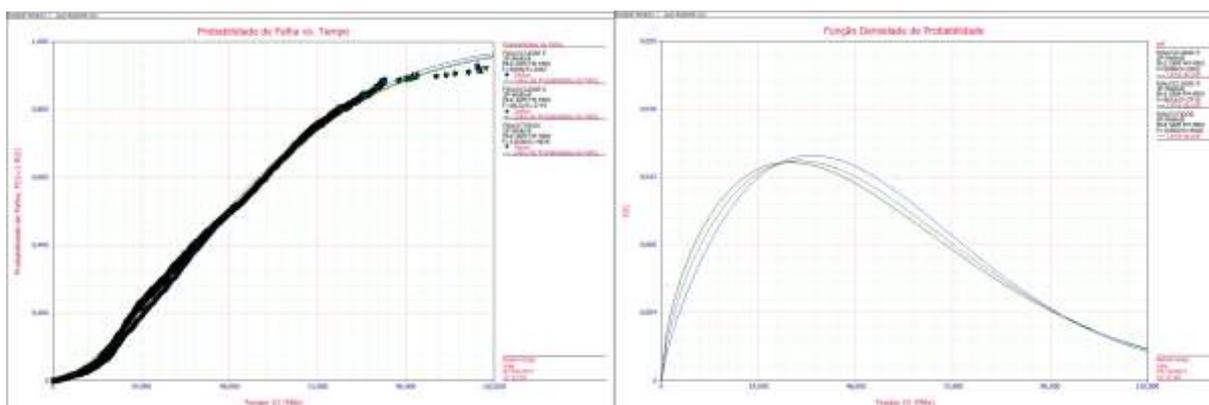
Tabela 4.2 Resultado da estimação dos parâmetros da equação Weibull

GRUPOS	Beta	Eta	Gama	Total	Falha	Suspensão
TODOS	1,6588	59,6685		20.426	15.600	4.826
CLASSE E	1,7603	58,9784		8.970	6.908	2.062
CLASSE K	1,5886	58,9882	0,066	11.341	8.622	2.719
FABRICANTE A	1,6310	62,2265		8.456	6.299	2.157
FABRICANTE B	1,6730	57,2305	0,298	11.855	9.231	2.624
FABRICANTE A - E	1,7508	58,4160		4.684	3.696	988
FABRICANTE B - E	1,7249	60,8202	0,840	4.286	3.212	1.074
FABRICANTE A - K	1,4920	68,0110		3.772	2.603	1.169
FABRICANTE B - K	1,6380	54,8541	0,298	7.569	6.019	1.550

Fonte: o autor (2017).

O Gráfico 4.6 mostra a função de distribuição acumulada de falhas (manutenções) para os 20.426 mil dados coletados e compara com as duas classes E e K separadamente. O gráfico também mostra a comparação entre as classes da função densidade de probabilidade. Analisando os gráficos e a tabela anterior é possível notar que não existe diferença significativa entre os resultados. Um comportamento diferente entre as classes seria esperado, pois possuem capacidades diferentes, porém no caso das manutenções na EFVM apresentam comportamento similar. Isso não significa que as vidas dos rolamentos também sejam similares, pois a vida é baseada nos dados até o sucateamento e não nos dados até a manutenção.

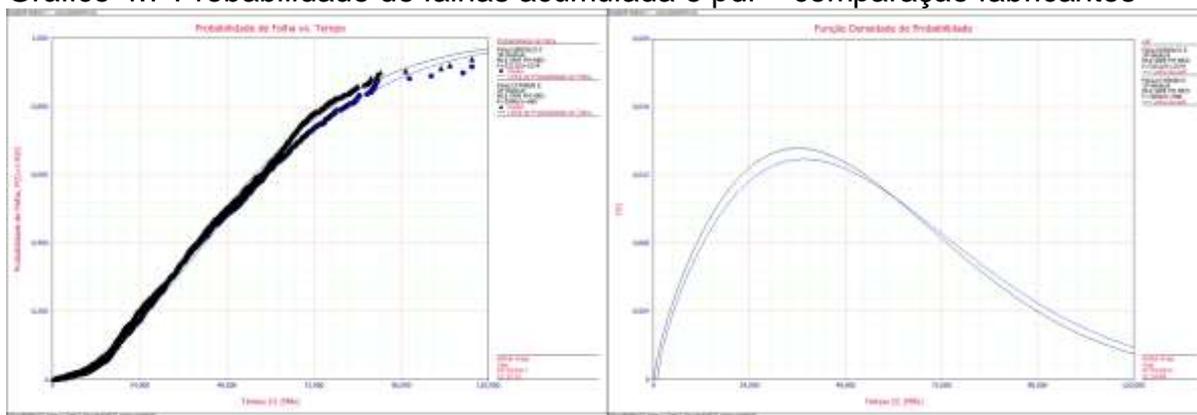
Gráfico 4.6 Probabilidade de falhas acumulada e pdf – comparação classes



Fonte: o autor (2017).

O desempenho entre manutenções dos dois fabricantes analisados pode ser comparado através do Gráfico 4.7. No caso da avaliação considerando todas as classes não é possível notar uma diferença significativa.

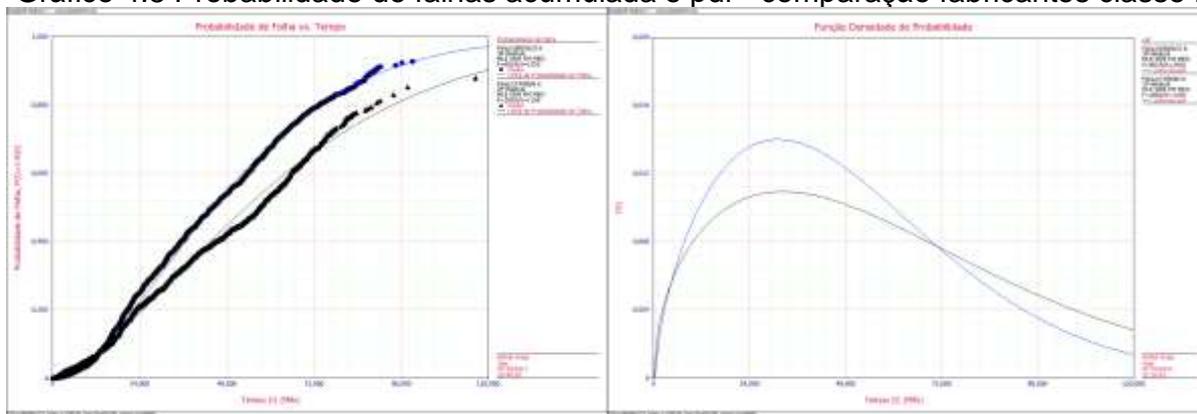
Gráfico 4.7 Probabilidade de falhas acumulada e pdf – comparação fabricantes



Fonte: o autor (2017).

Porém ao se comparar o desempenho da classe K entre os fabricantes fica evidente a existência de uma diferença, conforme Gráfico 4.8. Através da comparação da vida (manutenção) utilizando o *software* Weibull++, pode-se dizer que a probabilidade dos itens do fabricante A ser maior que os itens do fabricante B é de 57,4%. Para a classe E o comportamento não apresentou diferença significativa.

Gráfico 4.8 Probabilidade de falhas acumulada e pdf - comparação fabricantes classe K



Fonte: o autor (2017).

4.2.2 Custo de manutenção de mancais de rolamento

O custo de manutenção deveria englobar todos os itens citados no Capítulo 3.3.1 e 3.3.2, porém na prática a aquisição dessas informações é muito complexa, pois envolvem outros setores da empresa, alguns são custos diluídos entre processos e outros custos não são detalhados nos sistemas informatizados. Por isso os custos que serão considerados neste trabalho se resumem ao custo de manutenção e o custo de reposição caso o mancal seja sucateado durante o processo de manutenção. Esse processo de manutenção foi detalhado no Capítulo 2.3 conforme norma AAR.

Para descobrir como o custo de manutenção preventiva se comporta em relação ao período do ciclo de manutenção, foram planejadas 100 amostras de mancais de rolamento escolhidos aleatoriamente de diferentes tempos de manutenção.

Com o histórico de manutenção de aproximadamente 20 mil mancais mantidos por semestre (tamanho da população), a seleção de 100 unidades de cada período, resultaria em uma confiança de 95% com uma margem de erro de aproximadamente 10%.

O cálculo do tamanho da amostra pode seguir a referência de Gil, 2008, p.94: “Quando uma população não supera 100 mil elementos, a fórmula para o cálculo do tamanho da amostra passa a ser a seguinte:

$$n = [\sigma^2 \cdot p \cdot (1-p) \cdot N] / [e^2 \cdot (N-1) + \sigma^2 \cdot p \cdot (1-p)]$$

onde: n = Tamanho da amostra

σ^2 = Nível de confiança escolhido

p = Percentagem com a qual o fenômeno se verifica

N = Tamanho da população

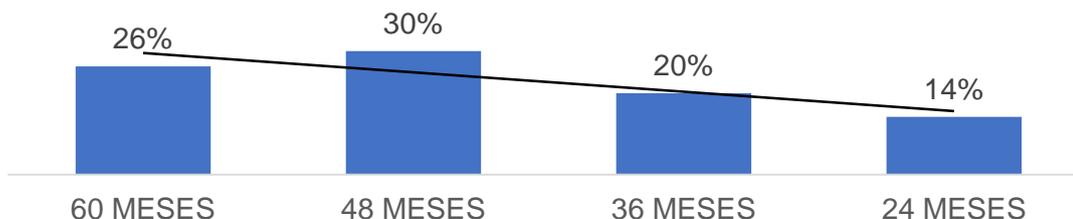
e^2 = Erro máximo permitido”

Foram planejados os períodos do segundo semestre de 2015, 2014, 2013 e 2012, totalizando 400 mancais de rolamentos. Os períodos selecionados foram menores que o período atual (6,5 anos), pois a hipótese é que a redução do período entre as manutenções possa reduzir a taxa de sucateamento e afetar o custo global do processo de manutenção dos mancais de rolamento da EFVM.

Os mancais de rolamento foram selecionados de maneira aleatória em vagões de minério que foram direcionados para oficina de manutenção

(independente do motivo) antes que qualquer análise fosse realizada. O resultado do diagnóstico das amostras de mancais de rolamentos pode ser resumido no Gráfico 4.9. É possível notar pela linha de tendência que o período entre as manutenções influencia a taxa de sucateamento, confirmando uma das hipóteses levantadas.

Gráfico 4.9 Taxa de sucateamento média dos componentes internos

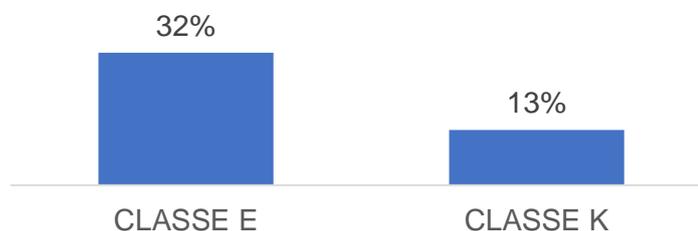


Fonte: o autor (2017).

Menos de 70% dos rolamentos planejados foram analisados, o que faz com que o nível de confiança do resultado reduza e a margem de erro aumente. A baixa quantidade de amostras principalmente para o período de 60 meses pode ajudar a explicar o motivo da redução do sucateamento se compararmos com o período de 48 meses.

Também é possível analisar a variação entre as taxas de sucateamento para as diferentes classes, K e E. Os mancais de rolamento da classe E, que são projetados para uma carga menor e na prática estão submetidos as mesmas cargas do classe K, apresentaram uma maior taxa de sucateamento, conforme Gráfico 4.10.

Gráfico 4.10 Taxa de sucateamento média de mancais de rolamento por classe



Fonte: o autor (2017).

Diferente da análise de desempenho em relação à manutenção mostrado no Gráfico 4.8 comparando os dois fabricantes, a taxa de sucateamento média não

mostrou uma discrepância significativa para a amostra analisada, conforme Gráfico 4.11.

Gráfico 4.11 Taxa de sucateamento de mancais de rolamento por fabricante

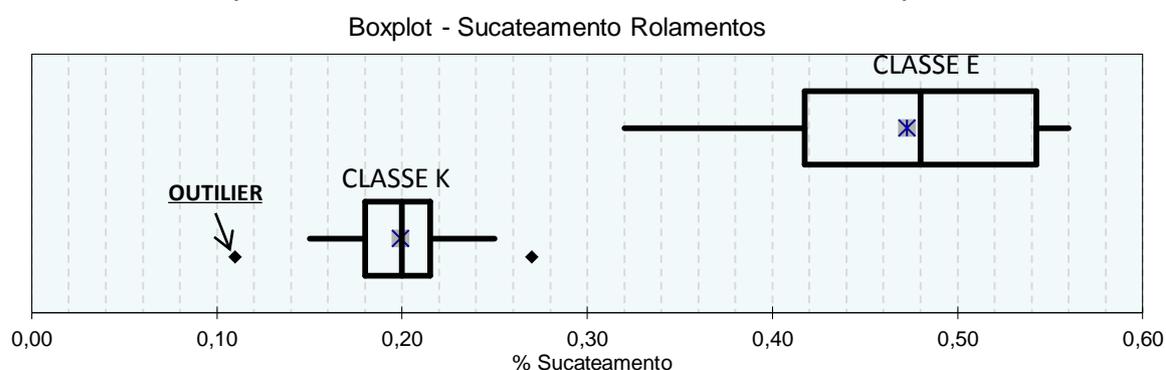


Fonte: o autor (2017).

Como mostrado anteriormente afora o período entre manutenções, diversos outros fatores afetam o sucateamento dos mancais rolamentos na manutenção preventiva periódica.

A estratégia atual de manutenção dos mancais de rolamento tem por consequência as curvas de probabilidade de falhas acumuladas mostrados anteriormente no Gráfico 4.6. Elas mostram que aproximadamente 80% dos mancais são retirados dos rodeiros devido a manutenção corretiva antes do período de 6,5 anos. Assim o custo com a manutenção corretiva foi calculado baseado na média de sucateamento de mancais de rolamentos enviados para manutenção. O Gráfico 4.12 *boxplot* mostra a dispersão da taxa de sucateamento ao longo de 14 meses registrados nos controles de manutenções. Os pontos considerados fora da normalidade (*outliers*) foram desconsiderados da média utilizada.

Gráfico 4.12 *Boxplot* - Sucateamento de mancais de rolamento por classe



Fonte: o autor (2017).

Os dados mostram uma grande diferença para as classes de rolamento de maneira similar ao mostrado no Gráfico 4.10. A taxa de sucateamento dos mancais da classe E é mais de duas vezes superior para o caso de manutenções corretivas ou preventivas. Esses dados mostram taxas maiores de sucateamento, pois são primordialmente de manutenções corretivas e os dados do Gráfico 4.10 de manutenções 'preventivas'.

4.2.3 Otimização do ciclo de manutenção preventivo

Seguindo o fluxo resumido na Figura 3.13, após o cálculo das curvas de confiabilidade e probabilidade de falhas utilizando a base de dados de manutenções, juntamente com o cálculo dos custos de manutenções corretivas e preventivas é possível descrever a equação do cálculo do custo de manutenção em relação ao período de ciclo $Z(T)$.

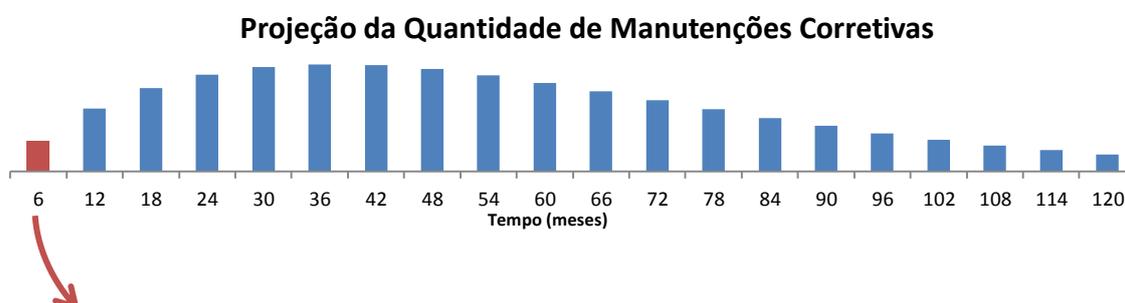
Adaptando o modelo de Barlow & Hunter mostrado anteriormente, o custo esperado para um ciclo de manutenção será resumido por:

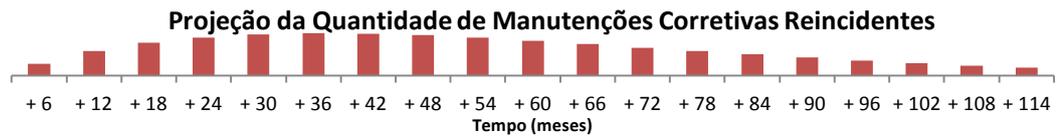
$$E[C] = C_r F(T) + C_p R(T) \rightarrow E[C] = C_r F(T) + C_p(T) R(T)$$

A alteração proposta para o custo com manutenção preventiva cíclica é baseada no estudo realizado e detalhado anteriormente, comprovando que a taxa de sucateamento para mancais de rolamento varia com o tempo do ciclo.

Outra adaptação para calcular a quantidade de rolamentos mantidos corretivamente $F(T)$ é a inclusão da reincidência das manutenções corretivas realizadas ao longo do período do ciclo preventivo. O exemplo abaixo mostra as projeções de manutenções para um ciclo hipotético de 120 meses. O Gráfico 4.13 destaca que os componentes mantidos corretivamente nos primeiros seis meses irão gerar outras manutenções corretivas e elas seriam consideradas no cálculo. Essa lógica se aplica para todas as manutenções corretivas ao longo dos meses.

Gráfico 4.13 Exemplo do cálculo das projeções de manutenções e reincidências





Fonte: o autor (2017).

Essa consideração altera novamente a equação do custo esperado para um ciclo, resultando em:

$$E[C] = C_f F(T) + C_p(T) R(T) \quad \rightarrow \quad E[C] = C_f \sum F(T) + C_p(T) R(T)$$

O custo de manutenção corretiva C_f no caso de mancais de rolamento será calculado a partir da taxa de sucateamento das manutenções corretivas:

$$C_f = \% \text{ Sucateamento Corretiva} \times \text{Custo de Reposição} \\ + \% \text{ Não Sucateamento Corretiva} \times \text{Custo Manutenção}$$

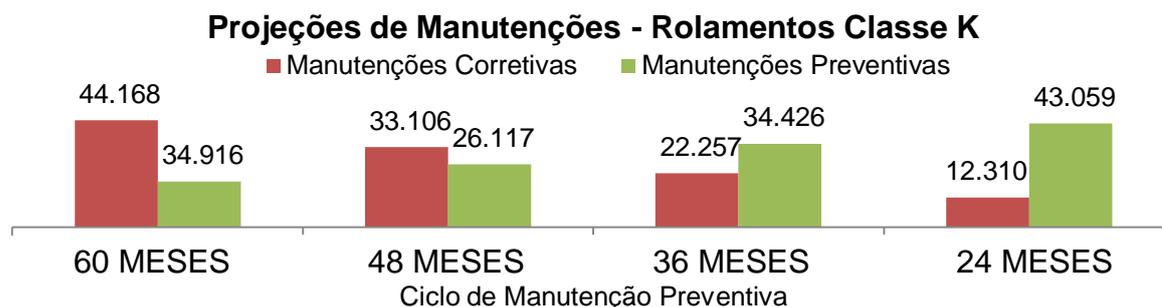
O custo de manutenção preventiva C_p utilizará a amostragem aleatória de diferentes períodos de manutenção para determinar a taxa de sucateamento para a manutenção preventiva:

$$C_p(T) = \% \text{ Sucateamento Preventiva}(T) \times \text{Custo de Reposição} \\ + \% \text{ Não Sucateamento Preventiva}(T) \times \text{Custo Manutenção}$$

O método simplificado citado anteriormente para a minimização do $Z(T)$ foi a comparação da resolução dos valores $Z(T)$ para diversos tempos T . Esse método foi utilizado devido a possíveis imprecisões para geração de uma equação para a variação da taxa de sucateamento ao longo do tempo e a sua extrapolação para outros períodos nos caso dos mancais de rolamento.

O Gráfico 4.14 mostra a projeção de manutenção preventiva e corretiva em relação a diferentes períodos de manutenção T para mancais de rolamento classe K, considerando a frota atual da EFVM (54,9 mil). A relação entre a quantidade de manutenção preventiva e o total de manutenções é de 30% para o período de 60 meses, 44% para 48 meses, 61% para 36 meses e 78% para 24 meses.

Gráfico 4.14 Projeções de manutenções para o mancal de rolamento classe K



Fonte: o autor (2017).

Considerando um custo de reposição como sendo sete vezes maior que o custo de manutenção, o custo relativo esperado $E_R[C]$ para os diferentes tempos de ciclo de manutenção podem ser calculados. O Gráfico 4.15 mostra o resultado para os diferentes valores de tempo de ciclo. O resultado é adimensional, pois se utilizou o valor 7 para reposição e 1 para manutenção.

Gráfico 4.15 Custo relativo esperado para o ciclo $E_R[C]$ – mancal classe K



Fonte: o autor (2017).

O custo relativo $E_R[C]$ é o custo acumulado durante todo o período avaliado, por exemplo, para o período de 24 meses toda manutenção ou reposição durante os dois anos foi somada sem considerar variações ou correções financeiras.

Como mostrado anteriormente, para a comparação e determinação do ponto ótimo o resultado do custo relativo esperado para o ciclo de manutenção deve ser dividido pelo período do ciclo resultando no custo médio relativo de manutenção $Z_R(T)$. O Gráfico 4.16 mostra a relação do custo médio para mancais de rolamento classe K.

Gráfico 4.16 Custo médio relativo de manutenção $Z_R[T]$ - mancal classe K

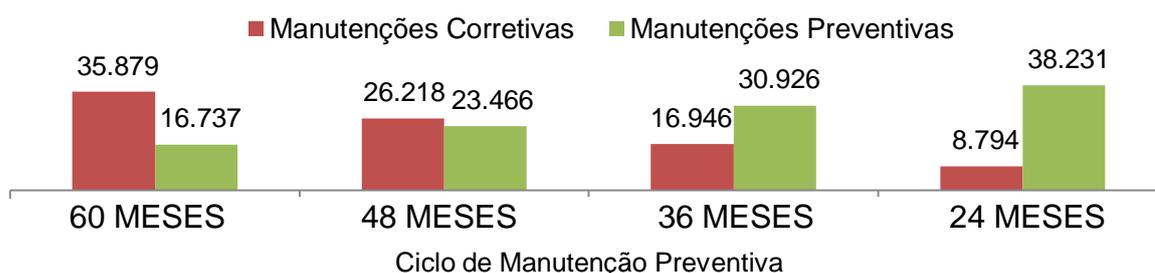


Fonte: o autor (2017).

Apesar da redução da confiabilidade com o aumento do ciclo de manutenção e do aumento significativo da quantidade de manutenções corretivas o custo de manutenção também reduz para os dados analisados. Isso se deve ao comportamento da taxa de sucateamento ao longo do tempo, mostrando que o valor relativo com manutenção seguindo a estratégia atual de 78 meses ainda é menor se somente o custo for analisado.

A mesma metodologia pode ser realizada para os mancais de rolamento da classe E. O Gráfico 4.17 mostra a projeção de manutenção preventiva e corretiva em relação a diferentes períodos de manutenção T para os 46,8 mil mancais de rolamentos da frota. De maneira similar, a relação entre a quantidade de manutenção preventiva e o total de manutenções é de 32% para o período de 60 meses, 47% para 48 meses, 65% para 36 meses e 81% para 24 meses.

Gráfico 4.17 Projeções de manutenções para o mancal de rolamento classe E



Fonte: o autor (2017).

O custo relativo esperado para os diferentes tempos de ciclo de manutenção para os mancais de rolamento classe E podem ser vistos no Gráfico 4.18.

Gráfico 4.18 Custo relativo esperado para o ciclo $E_R[C]$ – mancal classe E



Fonte: o autor (2017).

O Gráfico 4.19 a seguir mostra a relação do custo médio de manutenção $Z(T)$ para mancais de rolamento classe E ao longo do tempo.

Gráfico 4.19 Custo médio relativo de manutenção $Z_R [T]$ - mancal classe E



Fonte: o autor (2017).

De maneira similar aos mancais de rolamento classe K, a estratégia de manutenção atual de 78 meses também apresenta menor custo para a classe E. O custo médio relativo de manutenção $Z_R (T)$ atual é menor em comparação aos outros períodos de ciclo de manutenção analisados.

4.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram resumidos diversos trabalhos de análise de dados de vida de mancais de rolamentos ferroviários que auxiliaram na escolha da distribuição aplicável, assim como um pouco da ISO 281 que normatiza em relação aos cálculos para estimar a durabilidade.

As premissas do estudo de casos dos mancais de rolamento da EFVM foram detalhadas, assim como o resultado do cálculo das curvas de probabilidade de falhas e confiabilidade juntamente com os parâmetros estimados da distribuição

Weibull para diferentes cenários. As definições para os cálculos dos custos de manutenção corretiva e preventiva foram explanados incluindo adaptações das equações do custo médio de manutenção $Z[T]$.

Por fim, os custos médios de manutenção foram mostrados para as diferentes classes de rolamentos, chegando a conclusões similares para as diferentes classes.

Assim, ainda o custo da manutenção corretiva seja maior que o custo da manutenção preventiva e que a taxa de sucateamento reduza com a redução do ciclo de manutenção, o aumento da quantidade de planos preventivos supera essas reduções fazendo com que períodos maiores tenham custos relativos menores. Isso faz com que a estratégia atual apresente menor custo para os casos estudados

5 CONCLUSÃO

O estudo de caso dos mancais de rolamentos ferroviários dos vagões de minério na Estrada de Ferro Vitória a Minas mostrou que a base de dados de manutenção contemplando os motivos da retirada dos mancais de rolamento possui dados suficientes para as análises estatísticas. Porém a base de dados da manutenção dos mancais de rolamentos precisa ser melhorada e por isso necessitou de um estudo em paralelo com amostras aleatórias. Além do estudo, foi iniciada a implantação de uma melhoria no controle da manutenção. Outra sugestão seria a inserção do mês de manutenção além do semestre e ano.

O estudo realizado com as amostras aleatórias de mancais de rolamento com diferentes tempos em operação mostrou que o período do ciclo de manutenção tem influência sobre a taxa de sucateamento. Também foi possível evidenciar que os mancais de rolamento classe E apresentaram maior taxa de sucateamento em relação mancais classe K nas amostras analisadas e no histórico de manutenção. O ponto de atenção foi a quantidade das amostras aleatórias analisadas menor que o planejado em mais de 30%.

O resultado das análises dos dados das manutenções de mais de 20 mil mancais de rolamento utilizando a distribuição Weibull mostrou que a estratégia atual é predominantemente corretiva (ou condicional), ou seja, alguma anormalidade é identificada nos mancais antes do período preventivo.

O cálculo dos custos de manutenção corretiva e preventiva foram simplificados devido à dificuldade na aquisição de dados e determinação das correções financeiras ao longo do tempo dos serviços de manutenção e aquisição de materiais.

Apesar da manutenção corretiva representar aproximadamente 80% das manutenções realizadas, para os mancais de rolamento da EFVM a estratégia atual apresenta menor custo se considerarmos os dados analisados. Assim, não foi possível calcular um ponto ótimo do custo de manutenção, o recomendável seria manter a estratégia atual para os mancais de rolamento e ampliar os estudos.

As limitações do período analisado e quantidade de amostras contribuíram para esse resultado.

A diferença evidenciada no desempenho entre manutenções dos fabricantes para a classe K não se confirma em uma diferença significativa na taxa sucateamento.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da implantação dos controles de manutenção de rolamentos será possível no futuro atualizar as curvas de confiabilidade e taxas de sucateamento para revisar a estratégia de manutenção, o recomendável seria manter a revisão anual atualmente empregada.

Também será possível realizar a análise de dados de vida para comparar o desempenho dos diferentes fabricantes e classes. Essa análise poderia completar uma análise do custo de ciclo de vida para mancais de rolamento ferroviários.

Uma revisão dos controles de manutenção e movimentação de componentes no sistema informatizado de manutenção daria subsídio a um estudo da alteração da estratégia de data calendário para quilometragem.

O aprofundamento da análise do comportamento estatístico para os diferentes modos de falha poderia auxiliar na otimização do plano preventivo e/ou iniciar o estudo da utilização de parâmetros preditivos da base de dados de temperatura e ruído.

Outra estratégia para estudar a periodicidade do plano preventivo seria analisar a degradação da graxa e dos componentes internos ao longo do tempo para se determinar um limite técnico/econômico.

A profundar a análise da diferença do desempenho para os fabricantes também podem auxiliar na escolha da melhor estratégia de manutenção.

REFERÊNCIAS

- (1) ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. **The environmental benefits of moving freight by rail**, 2017. Disponível em: www.cbo.gov/publication/50049. Acesso em: 14 out. 2017.
- (2) MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. **Balança comercial brasileira: Acumulado do ano**, 2017. Disponível em: www.mdic.gov.br/noticias (02/01/2017). Acesso em: 14 out. 2017.
- (3) CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Ferrovias 2015**. Brasília, 2015. Disponível em: www.cnt.org.br/Pesquisa/pesquisa-cnt-ferrovias. Acesso em: 14 out. 2017.
- (4) VALE. **Vale production in 4Q16**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://www.vale.com/en/investors/information-market>. Acesso em: 14 out. 2017.
- (5) OLIVEIRA, Alisson. **Plano Diretor de Manutenção Ferroviária EFVM Vale**. Vitória, 2016
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16440**: Vagão ferroviário – Truque de três peças com dois rodeiros – Requisitos mínimos. Rio de Janeiro, 2015.
- (7) VALE. **Apostila de Engenharia Ferroviária: Manutenção de Vagões**. Vitória, 2013.
- (8) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 281**: Mancais de rolamentos - Capacidade de carga dinâmica e vida útil estimada. Rio de Janeiro, 2010.
- (9) MCGREW, J. M.; KRAUTER, A. I.; MOYAR, G. J.. **Reliability of Railroad Roller Bearings**. Journal of Lubrication Tech 99, p. 30-36, jan. 1977.
- (10) VALE. **Apresentação Gerenciamento da Rotina: Manutenção de Vagões EFVM**. Vitória, 2017.
- (11) MCGREW, J. M.; KRAUTER, A. I.; MOYAR, G. J.. **Reliability of Railroad Roller Bearings**. Journal of Lubrication Tech 99, p. 30-36, jan. 1977.
- (12) RELIASOFT. **Análise do Custo do Ciclo de Vida - LCC**. Disponível em <http://reliasoft.com.br/seminars/gencourses/lcc.htm>. Acesso em: 14 out. 2017.
- (13) MURTHY, D. N. P.; XIE, Min; JIANG, Renyan. **Weibull Models**. New Jersey, 2004.

- (14) RELIASOFT. **System Analysis Reference: Reliability, Availability & Optimization.** Tucson (Arizona). Disponível em <http://www.synthesisplatform.net/references/.pdf>. Acesso em: 14 out. 2017.
- (15) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7634: Vagão ferroviário - Terminologia.** Rio de Janeiro, 1993.
- (16) NORTON, R. **Projeto de máquinas**, Bookman, Porto Alegre, 2004.
- (17) SKF. **Rolamentos de rolos cônicos.** Disponível em <http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/roller-bearings/tapered-roller-bearings>. Acesso em: 14 out. 2017.
- (18) SKF. **Rolamentos autocompensadores de rolo.** Disponível em www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/roller-bearings/spherical-roller-bearings. Acesso em: 14 out. 2017.
- (19) SHIGLEY, J. E. **Elementos de Máquinas**, Vol. 2, 3ed., LTC, Rio de Janeiro, 1984.
- (20) TIMKEN. **Understanding Tapered Roller Bearings.** Disponível em http://www.alfatekrolamentos.com.br/Catalogos/USA_chap_1.pdf. Acesso em: 14 out. 2017.
- (21) NACHI. **Rolamentos de rolos cônicos.** 2007. Disponível em <http://nachi.com.br/catalogos/Rolamentos-de-Rolos-Conicos.pdf>. Acesso em: 14 out. 2017.
- (22) MASON, Michael A. **A practical tool for the determination of surface stresses in railroad bearings with different contact geometries and load conditions using finite element analysis.** Virginia, 2014. Disponível em <http://scholarscompass.vcu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4636&context=etd>. Acesso em: 14 out. 2017.
- (23) TRANSPORTATION SAFETY BOARD OF CANADA. **Railway Investigation Report R11T0034.** Oakville (Ontario), 2011. Disponível em <http://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/rail/2011/r11t0034/r11t0034.pdf>. Acesso em: 14 out. 2017.
- (24) MASSOTI, João G. Brigoni. **Metologia para análise de defeitos em rolamentos e cálculo de vida remanescente à fadiga.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011
- (25) MASON, Michael A. **A practical tool for the determination of surface stresses in railroad bearings with different contact geometries and load**

conditions using finite element analysis. Virginia, 2014. Disponível em <http://scholarscompass.vcu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4636&context=etd>. Acesso em: 14 out. 2017.

(26) SKF. **Bearing failures and their causes.** Sweden, 1994. Disponível em http://www.mana-omerzu.si/files/Bearing_Failures_and_Their_Causes.pdf. Acesso em: 14 out. 2017.

(27) HARRIS, T.A.; KOTZALAS M.N. **Advanced Concepts of Bearing Technology.** 5a ed., Florida-USA: CRC Press, 2006.

(28) MARTINEZ, Thania Alejandra, **Modeling the Residual Useful Life of Railroad Bearing Grease.** Dissertação (Mestrado) – The University of Texas Rio Grande Valley. Texas, 2015.

(29) MULLET, G. W. **Grease lubrication of rolling bearings,** Tribology, v. 6, n. 1, p. 21-28, Surrey (England), fev. 1973.

(30) CAVALCANTE, Ielena Eulália Matias. **Estudo cinético e reológico de graxas lubrificantes submetidas à degradação térmica oxidativa.** Dissertação (Mestrado) – UFPB/CCEN. João Pessoa, 2012.

(31) ZARETSKY, Erwin V. **Rolling Bearing Life Prediction, Theory, and Application.** NASA, Cleveland (Ohio), 2013.

(32) JESUS, Julio C. **Application of Technical FMECA (Failure Mode and Effect Analysis) in Roller Bearings for Freight Car.** In: INTERNATIONAL HEAVY HAUL CONFERENCE. Belo Horizonte (MG), 2009.

(33) TOURNAY, HM; CUMMINGS, S. **Monitoring the Performance of Railroad Cars by means of Wayside Detectors in Support of Predictive Maintenance.** In: INTERNATIONAL HEAVY HAUL CONFERENCE, Pueblo (Colorado), 2005.

(34) VALE. **Sistema de Gestão de Vagões.** In: PRÊMIO MAXION REVISTA FERROVIÁRIA. São Paulo, 2009

(35) FREITAS, Nilton de; PAIVA, Heleno Faria. **Monitoramento da Temperatura de Rolamento de Vagões.** In: V ENCONTRO ANTF DE FERROVIAS. Vitória, 2015.

(36) COSTA, Paulo Sergio; et al. **Gestão de riscos - Utilização de monitoramento preditivo online na gestão de riscos na frota de vagões da EFC.** São Luis, 2015.

(37) MOYNIHAN, T.W.; GLENBURNIE, G.W. **Railway Safety Technologies.** Glenburnie (Ontario), 2007.

(38) SPAMER, Fernanda Roda. **Técnicas preditivas de manutenção de máquinas rotativas**. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000900.pdf>. Acesso em: 14 out. 2017.

(39) TIMKEN. **Using Bearing Repair To Extend Bearing Life: For Heavy Industries**. 2017. Disponível em <https://www.timken.com/wp-content/uploads/2017/04/Bearing-Repair-For-Heavy-Industries-Technical-White-Paper.pdf>. Acesso em: 14 out. 2017.

(40) AAR - ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROAD. **S-723: Manual of Standards and Recommended Practices Roller Bearing - Section H II**. Washington, 2014.

(41) NTN. **Care and Maintenance of Bearings: CAT. No. 3017/E**. 2017. Disponível em https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-03/care_and_maintenance_of_bearings_en.pdf. Acesso em: 14 out. 2017.

(42) TARAWNEH, Constantine; et al. **Temperature profiles of railroad tapered roller bearings with defective inner and outer rings**. In: JOINT RAIL CONFERENCE. Columbia (South Carolina), 2016. Disponível em http://www.utrgv.edu/railwaysafety/_files/documents/presentations/jrc2016_5816.pdf. Acesso em: 14 out. 2017.

(43) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e mantenedibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

(44) ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL. **NP EN 13306: Terminologia da Manutenção**. Leça da Palmeira, 2007.

(45) NEVES, Marcelo Moraes. **Utilização de simulação para estudo de processos de recuperação de componentes de vagões nas oficinas da estrada de ferro Vitória a Minas**. 2008. f. Monografia (especialização) Curso de Especialização em Transportes Ferroviário de Carga, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://transportes.ime.eb.br/etfc/monografias/mon050.pdf>. Acesso em: 14 out. 2017.

(46) CORRÊA, Rodrigo Fernandes. **Otimização de periodicidade nos planos de manutenção preventiva: uma modelagem matemática**. 2015. f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

(47) RIGONI, Emerson. **Metodologia para implantação da manutenção centrada na confiabilidade: uma abordagem fundamentada em Sistemas Baseados em Conhecimento e Lógica Fuzzy**. f. Tese (doutorado) - Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina,

Florianópolis, 2009.

(48) RELIASOFT. **Preventive Maintenance**. Disponível em http://www.reliawiki.org/index.php/Preventive_Maintenance. Acesso em: 14 out. 2017.

(49) VISCIONE, Leonardo. **Manutenção Preventiva: Importante Indicador**. 2017. Disponível em <http://www.athivo.com/manutencao-preventiva-indicador/>. Acesso em: 14 out. 2017.

(50) KARDEC, A.; NASCIF J. **Manutenção: função estratégica**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009.

(51) CORRÊA, Rodrigo Fernandes; DIAS, Acires. **Modelagem matemática para otimização de periodicidade nos planos de manutenção preventiva**. 2016. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2016000200267#B005Acesso em: 14 out. 2017.

(52) VICENTE, Fernando. **Assessing the cost of unreliability in gas plant to have a sustainable operation**. Neuquén, 2012.

(53) ZARETSKY, Erwin V. **Rolling Bearing Life Prediction, Theory, and Application**. NASA, Cleveland (Ohio), 2013.

(54) ASSIS, Edilson Machado de. **O modelo q-Weibull em confiabilidade, árvores de falha dinâmicas e implementação de manutenção**. f. Tese (doutorado) - Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Salvador, 2013.

(55) MURTHY, D. N. P.; XIE, Min; JIANG, Renyan. **Weibull Models**. New Jersey, 2004.

(56) RELIASOFT. **Life Data Analysis Reference**. Tucson (Arizona). Disponível em http://www.synthesisplatform.net/references/Life_Data_Analysis_Reference.pdf. Acesso em: 14 out. 2017.

(57) BARBOSA, João Paulo. **Modelagem da confiabilidade de equipamentos por combinações ou extensões de distribuições de Weibull**. f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2008.

(58) VACCARO, Guilherme Luís Roehé. **Modelagem e análise da confiabilidade de sistemas**. f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.

- (59) ASSIS, Edilson Machado de. **Otimização do intervalo de substituição dos pneus de uma frota de aeronaves Brasília EMB120**. f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Salvador, 1999.
- (60) RIGONI, Emerson. **Apresentação métodos para análise de falhas**. Vitória, 2017.
- (61) FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J.L.D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- (62) RELIASOFT. **Life Data Classification**. Disponível em http://reliawiki.org/index.php/Life_Data_Classification. Acesso em: 14 out. 2017.
- (63) HUANG, J.; MILLER, C. R. **Optimal Preventive-Replacement Intervals for the Weibull Life Distribution: Solutions & Applications**. University of South Florida. Tampa, 1995.
- (64) SANTOS, Wagner Baracho dos; COLOSIMO, Enrico Antônio; MOTTA, Sergio Brandão da. **Tempo ótimo entre manutenções preventivas para sistemas sujeitos a mais de um tipo de evento aleatório**. Belo Horizonte, 2006. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/gp/v14n1/15.pdf>. Acesso em: 14 out. 2017.
- (65) SARAMAGO, Simone Pereira; STEFFEN, Valder. **Introdução às técnicas de otimização em engenharia**. Horizonte Científico, v. 3 ,n. 2. Uberlândia, 2009.
- (66) SANTANA, Anderson Marcolino de. **Aplicação das derivadas**. JI-PARANÁ, 2010. Disponível em [http://www.dmejpa.unir.br/menu_arquivos/1787_anderso_marcolino .pdf](http://www.dmejpa.unir.br/menu_arquivos/1787_anderso_marcolino.pdf). Acesso em: 14 out. 2017.
- (67) CÁLCULO Diferencial e Integral I: resumo da aula teórica 13. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.
- (68) JUSTO, Dagoberto Adriano Rizzoto; et al. **Cálculo Numérico: Um livro colaborativo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017. Disponível em <https://www.ufrgs.br/numerico/livro/main.html>. Acesso em: 14 out. 2017.
- (69) VICENTE, Fernando. **Assessing the cost of unreliability in gas plant to have a sustainable operation**. Neuquén, 2012.
- (70) MONTEIRO, Caio Italiano; et al. **Manutenção Corretiva: Manutenção e Lubrificação de Equipamentos**. Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2010. Disponível em http://wwwwp.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_6.pdf. Acesso em: 14 out. 2017.

(71) NG Informática. **Manutenção preventiva, preditiva e corretiva.** 2016. Disponível em <http://www.ngi.com.br/novidades/manutencao-preventiva-preditiva-corretiva-diferenca/>. Acesso em: 14 out. 2017.

(72) SEIXAS, Eduardo Santana. **Determinação do intervalo ótimo para manutenção:** preventiva, preditiva e detectiva. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CONFIABILIDADE. Reliasoft. Fortaleza, 2011.

(73) VALE. **MANUTENÇÃO ENXUTA.** In: IV ENCONTRO DE FERROVIAS. Vitória, 2013. Disponível em <http://www.antf.org.br/wp-content/uploads/2017/08/Manuten%C3%A7%C3%A3o-Enxuta-Modo-de-Compatibilidade.pdf>. Acesso em: 14 out. 2017.

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

(75) SKF. **The SKF formula for rolling bearing life.** 2001. Disponível em <http://evolution.skf.com/us/the-skf-formula/>. Acesso em: 14 out. 2017.

(76) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 281:** Mancais de rolamentos - Capacidade de carga dinâmica e vida útil estimada. Rio de Janeiro, 2010.

(77) MCGREW, J. M.; KRAUTER, A. I.; MOYAR, G. J.. **Reliability of Railroad Roller Bearings.** Journal of Lubrication Tech 99, p. 30-36, jan. 1977.

(78) ARAUJO, Ana Paula Nunes de; FERREIRA, Jorge Luiz de Almeida. **Análise estatística de defeitos em rolamentos ferroviários.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2010 Disponível em <http://www.abcm.org.br/anais/conem/2000/LC9752.pdf>. Acesso em: 14 out. 2017.

(79) BERGLING, G. **Fiabilidad de los Rodamientos,** La Revista de Rodamientos 188, 1976.

(80) KOTZALAS, Michael N. **Statistical distribution of tapered roller bearing fatigue lives at high levels of reliability.** In: ASME INTERNATIONAL JOINT TRIBOLOGY CONFERENCE. San Antonio (Texas), 2006

(81) BATISTA, João Luís F. **Verossimilhança e Máxima Verossimilhança.** UNIVERSIDADE de SÃO PAULO. Piracicaba, 2009. Disponível em <http://cmq.esalq.usp.br/BIE5781/lib/exe/fetch.php?media=leituras:verossim.pdf>. Acesso em: 14 out. 2017.

(82) RELIASOFT, **Apresentação Treinamento LCC**. Vitória, 2017

(83) GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.