

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

SOLANGE ASSIS BARBOSA

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS TRILHOS DO TÚNEL MONTE
SECO L1**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2017

SOLANGE ASSIS BARBOSA

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS TRILHOS DO TÚNEL MONTE
SECO L1**

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



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DOS TRILHOS DO TÚNEL MONTE SECO L1

por

SOLANGE ASSIS BARBOSA

Esta monografia foi apresentada em 10 de Novembro de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Solange Assis Barbosa foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.
Membro Titular da Banca - UTFPR

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

Dedico este trabalho ao meu esposo Rodrigo, minha família e amigos, que sempre me apoiam nas minhas decisões e desafios de carreira e busca pelo conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para que eu pudesse cursar esta especialização, foram muitos fins de semana de aprendizado.

Agradeço a todos os professores pelo conhecimento repassado, em especial ao nosso coordenador Prof. Dr. Eng. Emerson Rigoni pela paciência, cobranças e motivação. Aos meus colegas de turma pelo ambiente de estudos saudável tornando possível não só agregar aprendizado, experiências profissionais, mas também grandes amizades. Em especial ao meu colega de turma Wagner de Castro Alves Silva, pelo companheirismo, paciência e disponibilidade em repassar seus conhecimentos sempre que solicitado, e principalmente pelo auxílio com a análise dos dados deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas de trabalho da Gerência de Planejamento e Implantação de Obras de VP pelo aprendizado profissional proporcionado pelos grandes ferroviários que lá trabalham e por me auxiliarem sempre em qualquer trabalho desenvolvido.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois sem o apoio e compreensão deles seria muito difícil vencer este desafio.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano, por ter me guiado nesta trajetória.

A todos o meu muito obrigada!

“Nós só fazemos melhor aquilo que repetidamente insistimos em melhorar. A busca da excelência não deve ser um objetivo, e sim um hábito. ” (Aristóteles)

RESUMO

BAROBOSA, Solange Assis. **Análise de Confiabilidade dos trilhos do túnel Monte Seco L1**. 2017. 64 páginas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Mediante aos orçamentos anuais de manutenção cada vez mais enxutos, é necessário que as empresas tenham maior assertividade no momento da definição da alocação dos recursos. Portanto, quanto maior for o conhecimento do comportamento dos seus ativos, maiores são as chances de se realizar uma manutenção no tempo certo, minimizando assim a probabilidade de falhas do mesmo. Este trabalho trata-se de um estudo de caso que tem como objetivo calcular a confiabilidade dos trilhos do túnel Monte Seco L1 baseado no histórico de falhas dos trilhos e definir quando deverão ser substituídos os trilhos restantes do local. Para este estudo é realizado um apanhado das distribuições de confiabilidade e utilizado o Weibul++ para definição da melhor distribuição de confiabilidade, cálculos das confiabilidades e geração dos gráficos de confiabilidade dos trilhos. O estudo traz como resultado a confiabilidade dos trilhos do túnel e a comprovação da necessidade da substituição dos trilhos restantes.

Palavras-chave: Análise de Dados de Vida. Confiabilidade. Falhas. Ferrovia. Trilho.

ABSTRACT

BARBOSA, Solange Assis. **Reliability Analysis of the Monte Seco L1 Tunnel Rails**. 2017. 64 pages. Monograph (Specialization in Reliability Engineering) – Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2017.

Increasing annual maintenance budgets mean that companies need to be more assertive when allocating resources. Therefore, the greater the knowledge of the behavior of its assets, the greater the chances of performing a maintenance in the right time, thus minimizing the probability of its failure. This work is a case study that objective to calculate the reliability of the Monte Seco L1 tunnel rails based on the history of rails failure and to define when they should be replaced remaining rails of the location. For this work a collection of reliability distributions was performed and the software Weibul++ was used to define the best reliability distribution, reliability calculations and generation of rails reliability graphs. The study results in the reliability of the tunnel rails and the proof of the need to replace the remaining rails.

Palavras-chave: Life Data Analysis. Reliability. Failures. Railroad. Rail.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção tipo de uma linha dupla com seus componentes básicos	18
Figura 2 – Perfil Vignole TR27	21
Figura 3 – Histórico da evolução do material do trilho.....	21
Figura 4 – Regiões do perfil do trilho.....	22
Figura 5 – Convenção para direção de propagação dos defeitos de trilhos.....	23
Figura 6 – Trinca nos furos da junta	29
Figura 7 – Dados de Confiabilidade	43
Figura 8 – Função densidade de probabilidade	44
Figura 9 – Função de distribuição cumulativa	45
Figura 10 – Relação matemática entre pdf e cdf.....	46
Figura 11 – Entrada de dados no Weibul++	55
Figura 12 – Resultado do teste de aderência.....	56
Figura 13 – Relatório de resultado simplificado.....	57
Figura 14 – Vida media trilhos túnel Monte Seco L1	59

LISTAS DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Trinca vertical no boleto	25
Fotografia 2 – Trinca horizontal no boleto	26
Fotografia 3 – Trinca de patinagem de roda.....	26
Fotografia 4 – Trinca no filete.....	27
Fotografia 5 – Trinca na alma.....	27
Fotografia 6 – Trinca transversal.....	28
Fotografia 7 – Trinca de fragmentação.....	28
Fotografia 8 – Trinca vertical na alma em junta/fora da junta	29
Fotografia 9 – Trinca nos furos fora da junta.....	30
Fotografia 10 – Trinca composta.....	31
Fotografia 11 – Trinca no patim do trilho	31
Fotografia 12 – Head check leve.....	32
Fotografia 13 – Head check severo.....	32
Fotografia 14 - Cracking.....	33
Fotografia 15 - Shelling	33
Fotografia 16 – Corrugação.....	34
Fotografia 17 – Dark spot.....	34
Fotografia 18 - SQUAT.....	35
Fotografia 19 - Spalling	35
Fotografia 20 - Flaking.....	36
Fotografia 21 - Escoamento	36
Fotografia 22 – Entrada Túnel Monte Seco L1	38
Fotografia 23 – Fraturas trilho túnel Monte Seco L1	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Histograma aproxima a função densidade de probabilidade	45
Gráfico 2 – Gráfico taxa de falhas x tempo dos trilhos do túnel Monte Seco L1	58
Gráfico 3 – Gráfico confiabilidade x tempo dos trilhos do túnel Monte Seco L1	58
Gráfico 4 – Função densidade de probabilidade de falhas dos trilhos do túnel Monte Seco L1	59

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Registro de fraturas de trilho (túnel Monte Seco L1)	53
Tabela 2 – Probabilidade de falha até setembro de 2018	60

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
AMV	Aparelho de Mudança de Via
BHJ	Trinca nos furos da junta
BHO	Trinca nos furos fora da junta
BNK	<i>Broken Rail</i> – Fratura de trilho
CC	<i>Control Cooled</i> – Resfriamento controlado
CDF	Função distribuição acumulada
EBF	Trinca de patinação de roda
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
ES	Espírito Santo
HSH	Trinca horizontal no boleto
HWS	Trinca no filete
IHHA	<i>Internacional Heavy Haul Association</i> – Associação Internacional de Ferrovias de Carga Pesada
L1	Linha 1
MG	Minas Gerais
MLE	Máxima verossimilhança
MTTF	Tempo médio entre falhas
MTTR	Tempo médio para reparo
PDF	Função densidade de probabilidade
PRJ/PRO	Trinca vertical na alma em junta/Fora da junta
PN	Passagem em nível
SWO	Trinca na alma
TDC	Trinca composta
TDD	Trinca de fragmentação
TDF	Trinca no patim
TDT	Trinca transversal
TLS	Trilho longo soldado
TR	Trilho
VSH	Trinca vertical no boleto

LISTA DE SÍMBOLOS

Kg – Quilograma

m – Metro

β – Beta

η – Eta

γ – Gama

λ – Lambda

μ – Mi

σ – Sigma

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	JUSTIFICATIVA	16
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	A VIA PERMANENTE E O TRILHO	18
2.1	A VIA PERMANENTE	18
2.1.1	Elementos de Via permanente e Suas Funções.....	19
2.2	TRILHO FERROVIÁRIO.....	19
2.2.1	Origem e Evolução do Trilho	20
2.2.2	Partes Integrantes do Trilho e Identificação	22
2.2.3	Terminologia para Caracterização da Direção de Propagação dos Defeitos de Trilhos	23
2.3	CLASSIFICAÇÃO DOS DEFEITOS E FRATURAS.....	24
2.4	NOMENCLATURA DOS DEFEITOS INTERNOS	25
2.5	NOMENCLATURA DOS DEFEITOS EXTERNOS E/OU SUPERFICIAIS	31
2.6	PREMISSAS DE SUBSTITUIÇÃO DE TRILHOS.....	37
2.7	TÚNEL MONTE SECO L1	37
2.8	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	38
3	ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE	40
3.1	CONCEITO BÁSICO DE CONFIABILIDADE	40
3.1.1	Principais Conceitos Associados à Confiabilidade	40
3.2	ESTATÍSTICA DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE	42
3.2.1	Tipos de Dados de Confiabilidade.....	42
3.2.2	Estatística Básica	43
3.2.2.1	Variáveis Aleatórias.....	44
3.2.2.2	Função Densidade de Probabilidade e Função Distribuição Acumulada	44
3.2.2.3	Função Taxa de Falha.....	46
3.2.2.4	Função Confiabilidade Condicional	47
3.2.3	Distribuições de Probabilidade	47
3.2.3.1	Distribuição Exponencial	48
3.2.3.2	Distribuição Weibull	49
3.2.3.3	Distribuição Normal	50
3.2.3.4	Distribuição Lognormal.....	50
3.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	51

4	ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS TRILHOS DO TÚNEL MONTE SECO L1	52
4.1	COLETA DE DADOS	52
4.2	ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS	54
4.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	60
5	CONCLUSÃO	61
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
6	REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, existem no mundo ferrovias que operam com altas densidades de tráfego e cargas por eixo, sendo estas classificadas como *Heavy Haul*. Conforme definido pela *Internacional Heavy Haul Association – IHHA*, para que uma ferrovia se enquadre neste tipo ela precisa atender pelo menos dois dos seguintes critérios:

- Operar regularmente ou estar contemplada a operação de trens unitários combinados com pelo menos 5.000 toneladas de massa bruta;
- Transportar ou estar contemplado o transporte de frete de receita de pelo menos 2 milhões de toneladas brutas por ano em um determinado segmento de linha de transporte com pelo menos 150 quilômetros de comprimento;
- Operar regularmente ou estar contemplada a operação de equipamentos com carga por eixo de 25 toneladas ou mais.

A Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) é uma das ferrovias brasileiras que se enquadram na classificação de ferrovias *Heavy Haul*, sua concessão atualmente pertence a Vale. Com seus 905 quilômetros de extensão que ligam Belo Horizonte (MG) a Vitória (ES), é responsável pelo transporte anual de mais de 119 milhões de toneladas de minério de ferro, além de aproximadamente 40% de toda a carga ferroviária do país. Nos vagões, circulam também produtos como aço, soja, carvão e calcário. Além disso, transporta anualmente cerca de 1 milhão de pessoas no trem de passageiros.

A EFVM é uma ferrovia de bitola métrica e é dividida em linha principal, ramais e pátios. É uma ferrovia que possui a linha principal totalmente duplicada, sendo ela dividida em EH's e RH's. As EH's são extensões de linha divididas em curvas e tangentes que somadas possuem em torno de 7 quilômetros podendo este número variar conforme a região. As RH's são os locais onde os trens podem alternar entre uma linha e outra e são compostas pelos AMV's (Aparelhos de Mudança de Via) e tem em torno de 265 metros de extensão, podendo também este número variar conforme a região e quantidade de AMV's presentes. Além disso em alguns trechos temos a presença de túneis, pontes e viadutos devido a geografia presente nos locais por onde a ferrovia passa.

Para garantir a segurança operacional e pessoal dos trens que diariamente trafegam pela EFVM, a via permanente conta com profissionais, equipamentos e manutenções periódicas para garantia da segurança operacional e pessoal dos passageiros que circulam diariamente pela linha férrea.

Porém, como todo sistema complexo, a ferrovia também sofre com a ocorrência de falhas, estas falhas geram interdições de via, que podem dependendo da natureza e tempo de reparo para reestabelecimento do tráfego pode gerar impactos na produção e atrasos nos trens de passageiros.

Este trabalho buscará analisar a confiabilidade dos trilhos de um determinado trecho da ferrovia através de análises estatísticas para auxílio na tomada de decisão quanto a substituição dos mesmos.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

Mediante aos orçamentos anuais de manutenção cada vez mais enxutos, é necessário que as empresas tenham maior assertividade no momento da definição da alocação dos recursos. Portanto, quanto maior for o conhecimento do comportamento dos seus ativos, maiores são as chances de se realizar uma manutenção no tempo certo, minimizando assim a probabilidade de falhas do mesmo.

Atualmente na área de manutenção de via permanente da EFVM são realizadas inspeções periódicas para levantamento das condições dos ativos, que associadas ao histórico de falhas e aos limites técnicos pré-estabelecidos são definidas as manutenções a serem realizadas.

Quando há reincidência de falhas em alguns ativos, faz-se necessária uma análise mais detalhada para definição do melhor caminho a seguir. A área de confiabilidade da via permanente da EFVM é responsável pela realização destas análises e definição da substituição ou não destes componentes que estão falhando e gerando interrupções no tráfego de trens. O conhecimento da confiabilidade dos ativos nos permite através de análises estatísticas identificar a vida média e a probabilidade de falhas dos mesmos. Desta hipótese emerge a pergunta principal que norteia este trabalho: **Quando se deve programar a substituição dos trilhos do Túnel Monte Seco L1, dado as falhas já ocorridas no local?**

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é determinar a confiabilidade dos trilhos do túnel Monte Seco L1 dado as falhas já ocorridas no local.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para cumprimento do objetivo geral do trabalho, os seguintes objetivos específicos abaixo deverão ser atendidos:

- Levantar os dados de falhas no local;
- Avaliar o melhor modelo a ser utilizado;
- Calcular a vida média dos trilhos no local;
- Avaliar a probabilidade de novas falhas no local;
- Avaliar a substituição do restante dos trilhos do túnel.

1.3 JUSTIFICATIVA

Segundo Silva, Filho e Magalhães (2010), o trilho é sem margem de dúvidas o componente mais importante da superestrutura. É tecnicamente considerado o principal elemento de suporte e guia dos veículos ferroviários, e economicamente detém o maior custo entre os elementos estruturais da via. Ele sozinho representa aproximadamente 20% do orçamento total de investimentos da via permanente da EFVM.

Considerando os dados de falhas de via permanente da EFVM do ano de 2017 acumulados até setembro, as fraturas de trilho ocupam o segundo lugar nos modos de falhas totais, sendo que as fraturas ocorridas no túnel Monte Seco L1 representam 9% do total fraturas do ano.

A fratura de trilho é um dos fatores que trazem risco para as operações ferroviárias, pois podem ser a causa principal para acidentes ferroviários de grandes proporções (descarrilamentos, tombamentos, etc.).

Avaliando as informações acima, torna-se viável a avaliação da substituição total dos trilhos no local mediante ao cálculo da sua confiabilidade.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Segundo Silva e Menezes (2005), existem várias formas de se classificar uma pesquisa: do ponto de vista de sua natureza, da forma de abordagem, de seus objetivos e dos procedimentos técnicos.

Conforme esta classificação, os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho são: do ponto de vista de sua natureza uma pesquisa aplicada, com uma abordagem quantitativa, uma vez que serão utilizadas análises estatísticas. Do ponto de vista de seus objetivos trata-se de uma pesquisa exploratória e do ponto de vista de procedimentos técnicos trata-se de um estudo de caso.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 01 deste trabalho faz uma introdução rápida sobre o assunto que será abordado, apresentação e justificativa do tema, bem como seus objetivos, métodos de pesquisa e estrutura do trabalho.

O capítulo 02 fará uma apresentação geral do tema para desenvolvimento do trabalho, descrevendo a via permanente, bem como seus principais elementos e funções, partes integrantes dos trilhos, identificação, mapeamento e caracterização dos defeitos de trilhos e critérios de substituição adotados pela EFVM para substituição dos mesmos.

O capítulo 03 trará o referencial teórico sobre falha e análise de dados de vida.

O capítulo 04 será apresentada a aplicação da análise de dados de vida no objetivo da pesquisa

O capítulo 05 finaliza o trabalho com os resultados obtidos e conclusões.

2 A VIA PERMANENTE E O TRILHO

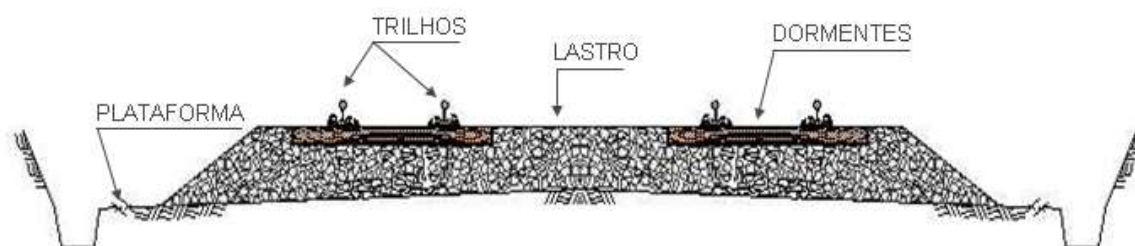
Este capítulo apresenta uma introdução sobre a via permanente e seus elementos. Como o tema central do trabalho são as fraturas de trilho, será apresentada uma breve origem e evolução do mesmo, suas partes integrantes e identificação. Também será abordado o mapeamento e caracterização dos defeitos de trilhos, além dos critérios de substituição adotados pela EFVM.

2.1 A VIA PERMANENTE

Segundo Brina (1983), a superestrutura das ferrovias é constituída pela via permanente, que está sujeita à ação de desgaste das rodas, dos veículos e do meio (intempéries) e é constituída de modo a ser renovada, quando o seu desgaste atingir o limite de tolerância exigido pela segurança ou comodidade da circulação e substituída nos seus principais constituintes, quando a intensidade de tráfego ou aumento de peso do material rodante exigir esta remodelação.

Os três principais elementos da via permanente são: o lastro, os dormentes e os trilhos e estão apoiados sobre a plataforma ferroviária conforme demonstrado na figura 1 abaixo:

Figura 1 – Seção tipo de uma linha dupla com seus componentes básicos



Fonte: Azevedo (2008).

A composição e/ou tipo dos componentes básicos de uma ferrovia são definidos pelos especialistas de forma cuidadosa, pois eles devem suportar as cargas transportadas, além das várias condições adversas que podem estar atribuídas.

2.1.1 Elementos de Via permanente e Suas Funções

O lastro é o elemento situado entre os dormentes e a plataforma e que tem por funções principais:

- Distribuir sobre a plataforma os esforços resultantes das cargas dos veículos ferroviários;
- Formar um suporte diminuindo as trepidações resultantes das passagens dos veículos de acordo com seu limite elástico;
- Formar uma superfície contínua e uniforme para os dormentes e trilhos;
- Impedir o deslocamento dos dormentes, tanto no sentido longitudinal quanto no transversal;
- Facilitar a drenagem da superestrutura.

O dormente é o responsável por receber e transmitir ao lastro os esforços produzidos pelas cargas dos veículos, servindo de suporte dos trilhos, permitindo a sua fixação e procurando manter invariável a bitola da via.

Os trilhos constituem o apoio e ao mesmo tempo a superfície de rolamento para os veículos ferroviários.

Na EFVM o lastro utilizado é o lastro de brita em quase sua totalidade, porém ainda existem alguns trechos com escória. A dormentação predominante na linha principal é de aço, porém alguns trechos ainda apresentem dormente de madeira, principalmente em pontes e túneis. Nos circuitos de via são utilizados dormentes de madeira. E os trilhos utilizados possuem perfil TR68, com alguns trechos com perfil TR57 (as terminologias dos trilhos serão melhor detalhadas nos itens seguintes).

2.2 TRILHO FERROVIÁRIO

Segundo Brina (1983), o trilho é o elemento que constitui a superfície de rolamento para as rodas dos veículos ferroviários. Desde os primórdios das estradas de ferro, ele vem sofrendo uma evolução permanente até os dias atuais, principalmente com o grande desenvolvimento da tecnologia do aço. A forma e o comprimento evoluíram gradativamente, até atingirem perfis modernos de grande

seção e também seu peso para permitir as pesadas cargas por eixo dos trens modernos.

Para Filho, Silva e Magalhães (2010), o trilho tem como funções:

- Resistir diretamente as tensões que recebe do material rodante e distribuir, por sua vez, aos demais componentes de superestrutura;
- Atuar como guia das rodas em seus movimentos;
- Servir de condutor para a corrente elétrica em linhas sinalizadas e linhas eletrificadas.

Como a EFVM é uma ferrovia sinalizada em quase sua totalidade, quando há ocorrência de uma fratura de trilho a corrente elétrica é interrompida e conseqüentemente a rota dos trens é cortada impedindo que o mesmo circule sobre uma fratura, sendo uma das maneiras de prevenir a ocorrência de acidentes ferroviários devido a este modo de falha.

Os trilhos podem ser curtos ou longos soldados. Os trilhos curtos são os trilhos tal qual saem da siderúrgica, normalmente possuem de 12 a 24 metros de comprimento e são unidos através de talas de junção.

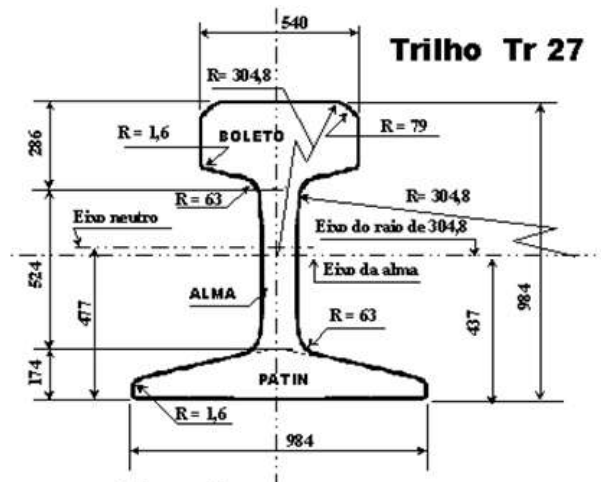
Já o trilho longo soldado (TLS), é formado por vários trilhos curtos unidos por soldagem elétrica e na EFVM possuem 216 metros, sendo eles unidos uns aos outros através de soldagem aluminotérmica.

2.2.1 Origem e Evolução do Trilho

De acordo com Filho, Silva e Magalhães (2010), o trilho tem sua origem vinculada à racionalização do transporte de cargas (carroças de carvão) e sua evolução está ligada ao incremento dessas cargas e da necessidade de velocidade de transporte dos veículos cargueiros. Atualmente o desenvolvimento do trilho está mais voltado para o material nele empregado.

Segundo Filho, Silva e Magalhães (2010), a última alteração básica no perfil do trilho foi dada pelo engenheiro americano Vignole. O custo de produção foi reduzido com a introdução do patim de largura uniforme. Além disto, a proporção entre o boleto alma e patim foi tão vantajosa que desde o primeiro TR Vignole de 27kg/m (Figura 2) em 1838, até o mais robusto hoje utilizado de 75kg/m, poucas modificações foram realizadas em sua forma.

Figura 2 – Perfil Vignole TR27

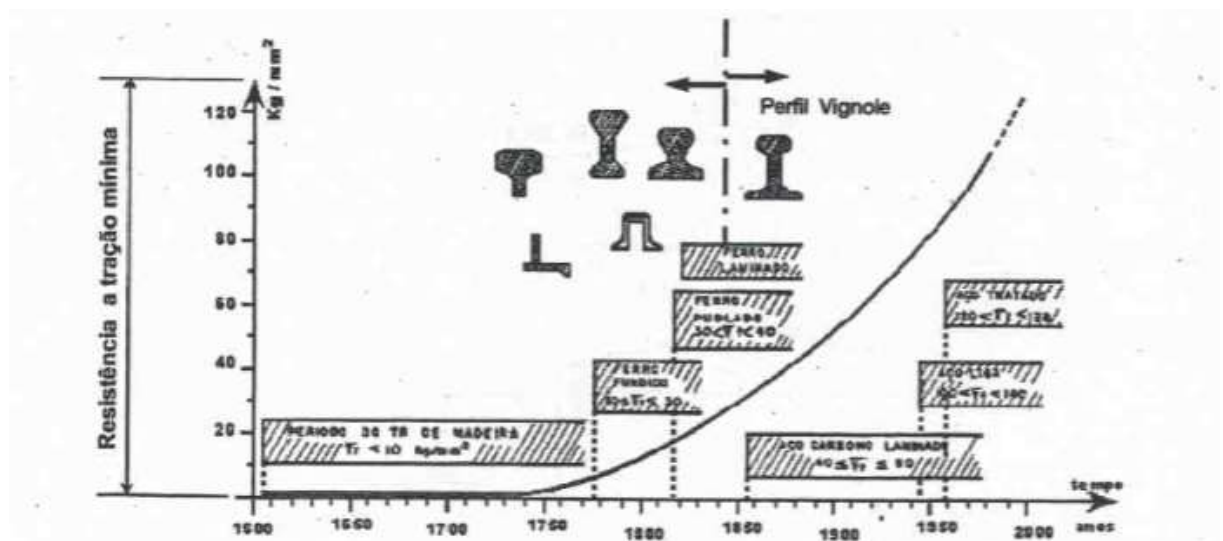


Fonte: Filho, Silva e Magalhães (2010).

A EFVM utiliza em quase sua totalidade trilhos de seção TR68, porém em alguns trechos são utilizados trilhos de seção TR57 (pátios e trechos de menor carga por eixo).

Na figura 3 abaixo podemos verificar o histórico de evolução do material do trilho ao longo dos anos:

Figura 3 – Histórico da evolução do material do trilho



Fonte: Filho, Silva e Magalhães (2010).

Conforme podemos perceber após a definição do perfil do trilho por Vignole, foram realizadas alterações significativas no material de fabricação do trilho, sendo o

trilho de aço tratado o último tipo de trilho fabricado que permite proporcionar a superfície de rolamento do boleto maiores durezas e suportar maiores cargas por eixo.

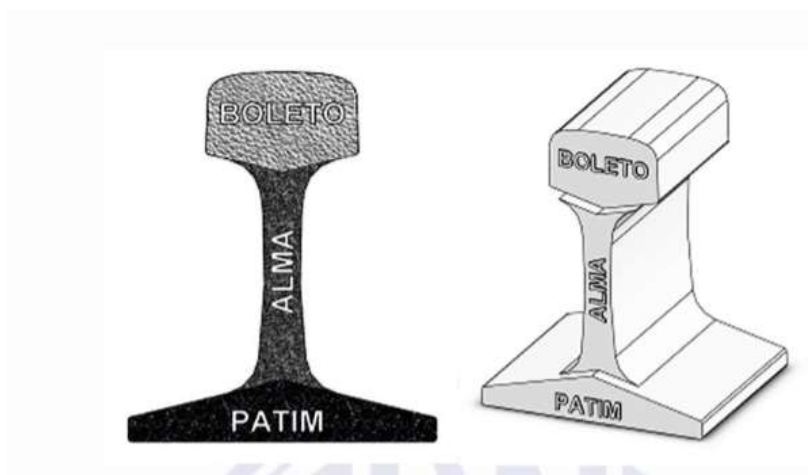
Atualmente na EFVM temos desde de trilhos de aço carbono, liga e tratados, sendo os do tipo tratado em maior quantidade.

2.2.2 Partes Integrantes do Trilho e Identificação

O trilho é composto de três partes: boleto, alma e patim.

A NBR 7640 (2014) apresenta as regiões do perfil do trilho conforme figura 4 abaixo:

Figura 4 – Regiões do perfil do trilho



Fonte: NBR 7640 (2014).

De acordo com a NBR 7640 (2014), o boleto é a região superior da seção do trilho, a alma a região intermediária com orientação vertical e o patim a região inferior com configuração horizontal.

O boleto deve ter massa suficiente para que o desgaste não afete o momento de inércia da seção. Já a alma deve possuir altura suficiente para resistir a flexão e o boleto não deve ser muito fino, ele deve garantir que a alma continue perpendicular ao dormente, durante as solicitações transversais. Caso ele não possua espessura adequada, pode acumular deformações permanentes ao longo da vida e provocar acidentes.

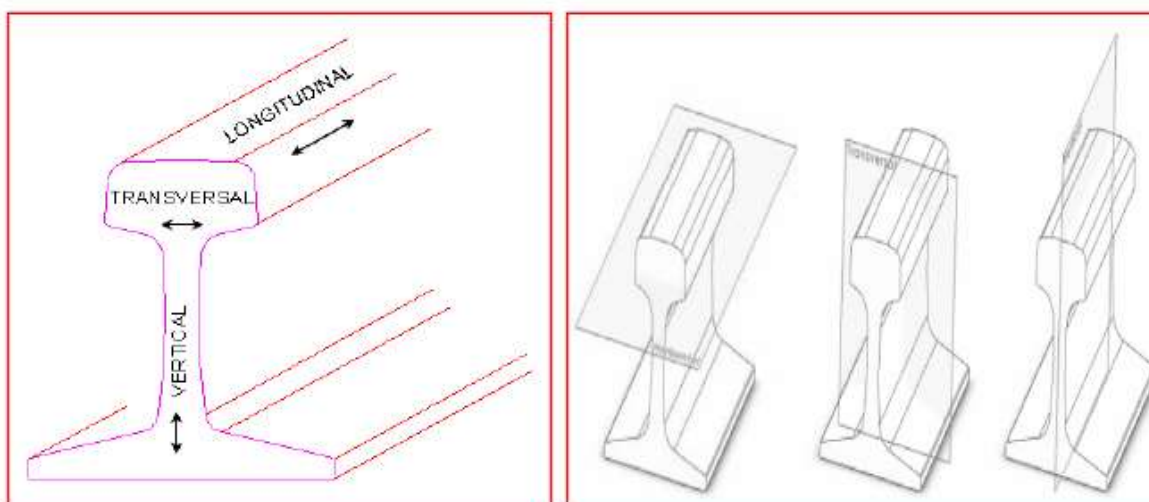
Os trilhos podem ser identificados por inscrições permanentes que os fabricantes gravam na alma em alto e baixo relevo. Várias tentativas de padronização foram definidas por órgãos normatizadores, porém, os fabricantes de trilhos nem sempre seguem estas orientações e estabelecem seus próprios modelos de gravação. Por não ser foco deste trabalho, não serão abordados os padrões utilizados para identificação dos fabricantes.

Além das identificações dos fabricantes, existem também nomenclaturas para definição da espécie do trilho que são gravadas no trilho normalmente em alto relevo (Ex.: CC – *Control Cooled* – resfriamento controlado: técnica para reduzir o teor de hidrogênio), porém, também não serão abordadas.

2.2.3 Terminologia para Caracterização da Direção de Propagação dos Defeitos de Trilhos

Conforme definido no manual de via permanente Vale (2013) e NBR 7640 (2014), a maioria dos defeitos requer alguma forma de sollicitação para iniciar e se desenvolver. Para identificação dos defeitos deve-se utilizar a seguinte convenção em relação aos três planos geométricos conforme figura 5:

Figura 5 – Convenção para direção de propagação dos defeitos de trilhos



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

Os planos horizontal e vertical estendem-se na direção longitudinal do trilho, e o plano transversal é perpendicular aos outros dois, contando o trilho de maneira a mostrar seu perfil.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS DEFEITOS E FRATURAS

Existem dois tipos de classificação de defeitos: internos e externos.

Conforme definido na NBR 7640 (2014), os defeitos internos são aqueles localizados na região interna do trilho e que, enquanto não provocarem uma fratura ou uma trinca exposta, só podem ser detectados por alguns métodos de inspeção não destrutiva, como ultrassom ou radiografia.

Na EFVM a identificação destes defeitos é realizada por ultrassom rodoferroviário e classificados conforme tipo de defeito e tamanho. Estes tipos de defeitos e tamanho estão descritos em procedimento específico de inspeção do equipamento e também no manual da via permanente.

Os defeitos externos ou superficiais como descrito na NBR 7640 (2014), são aqueles que podem ser detectados visualmente, estando expostos na região externa do trilho, e cuja origem está relacionada tipicamente ao contato do trilho com os outros elementos, como as rodas ferroviárias ou os elementos de fixação. Uma trinca interna que tenha aflorado para a superfície do trilho, ainda que seja detectável visualmente, mantém sua classificação de defeito interno.

Na EFVM são realizadas inspeções visuais periódicas pelos inspetores de cada trecho para detecção dos defeitos externos. Estes defeitos são classificados conforme nomenclatura e priorizados para substituição em caso de necessidade, dependendo da severidade do defeito.

Os defeitos podem ocorrer tanto nos trilhos quanto nas soldas (aluminotérmica ou elétrica), porém por não fazerem parte do escopo deste trabalho as fraturas ocorridas em soldas não serão detalhadas.

Ainda seguindo o que a NBR 7640 (2014) determina que, quando ocorre uma fratura, o defeito mantém a classificação de acordo com sua causa original. Como por exemplo, um trilho partido em consequência de uma trinca transversal é reportado como TD. Algumas fraturas ocorrem subitamente, sem indício de causa anterior, em consequência de utilização inadequada, sobrecarga ou impacto. Neste

caso, são reportadas separadamente como fraturas acidentais, com a sigla BKN, da denominação inglês “*Broken Rail*”.

2.4 NOMENCLATURA DOS DEFEITOS INTERNOS

As nomenclaturas dos defeitos internos que serão apresentadas a seguir foram extraídas do manual de via permanente da Vale (2013), sendo elas utilizadas para pela área de confiabilidade de via permanente para a classificação dos defeitos.

- VSH – Trinca Vertical no Boleto

Este tipo de descontinuidade, quando evoluída, faz quebrar o boleto em duas metades longitudinalmente. Esta fratura forma um dente na superfície de rolamento, fornecendo alto risco de descarrilamento pelo impacto do friso. Estas características impossibilitam o entalamento desde defeito por não resolver o problema.

Fotografia 1 – Trinca vertical no boleto



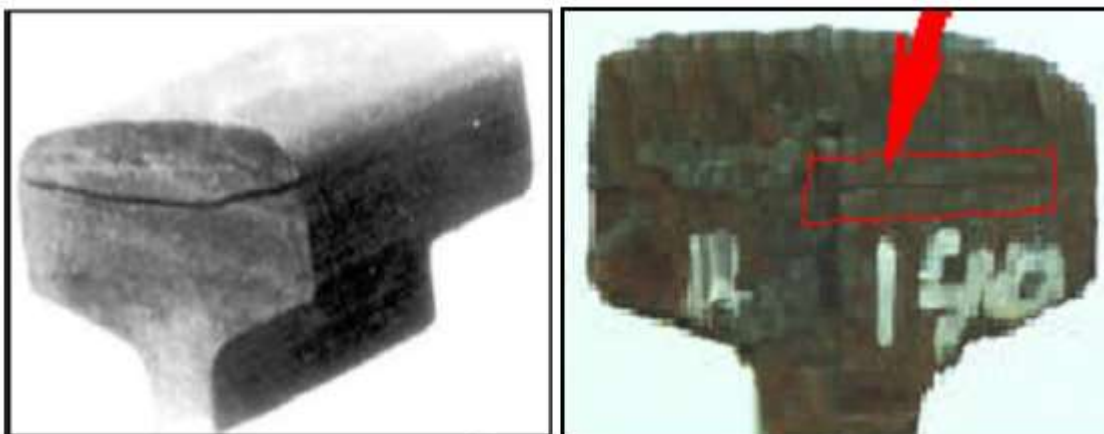
Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- HSH – Trinca Horizontal no Boleto

Em estágio avançado este tipo de trinca, é facilmente visualizada em uma ronda a pé ou até mesmo em inspeções de auto de linha. O defeito causa a fragmentação do boleto.

Não se deve entalar este tipo de defeito, uma vez que a propagação da trinca ocasionará o deslocamento completo do boleto, podendo atingir grandes comprimentos.

Fotografia 2 – Trinca horizontal no boleto



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- EBF – Trinca de Patinagem de Roda

Trinca no plano transversal, produzida por fissuração interna, logo abaixo da marca de patinação, que se encaminha em direção a alma do trilho de modo rápido e no sentido da parte externa do boleto.

Não se permite entalamento destes defeitos, devendo conforme sua gravidade, ser o trilho retirado da linha.

Fotografia 3 – Trinca de patinagem de roda



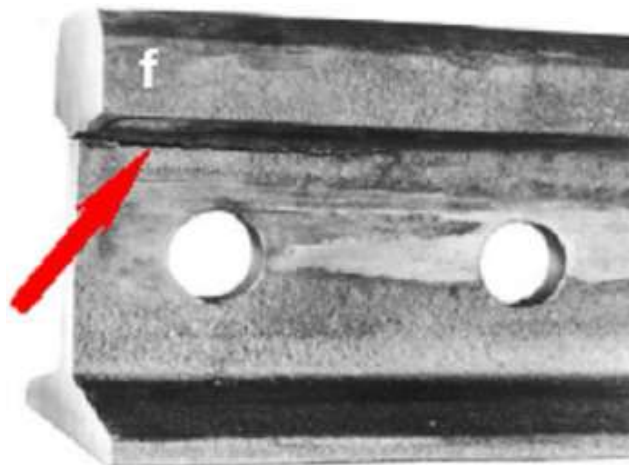
Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- HWS – Trinca no Filete

Normalmente de comprimento grande, pode ser encontrado mais em PN's (passagens em nível), principalmente devido ao esforço lateral contínuo originado das rodas dos carros sobre o boleto. De difícil identificação a olho nu, pode ser visualizado quando em estágio avançado.

Este defeito não é entalável, devendo ser substituído todo o comprimento comprometido.

Fotografia 4 – Trinca no filete

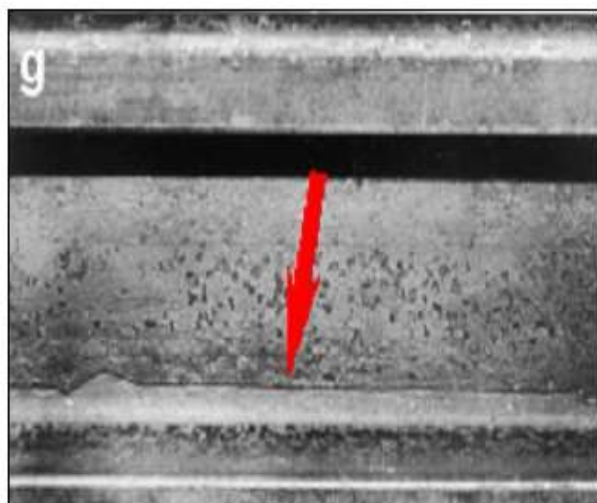


Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- SWO – Trinca na alma

Trinca no plano horizontal, se desenvolve de modo progressivo, rápido e longitudinalmente, no meio da alma.

Fotografia 5 – Trinca na alma



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- TDT – Trinca Transversal

Sua propagação acarreta rompimento repentino da seção transversal do trilho em forma de junta. Mais do que para outros defeitos, a detecção deste, torna imprescindível o reforço da dormentação, fixação e lastro no local.

Este é um defeito onde o entalamento pode ser considerado uma solução provisória.

Fotografia 6 – Trinca transversal



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- TDD – Trinca de Fragmentação

Trinca no plano transversal, progressiva, que se inicia em uma trinca interna junto ao canto de bitola do trilho externo. Possui ângulo reto em relação à superfície de rolamento, ocorre no canto do boleto.

Fotografia 7 – Trinca de fragmentação



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- PRJ/PRO – Trinca Vertical na Alma em Junta/Fora da Junta

Caracteriza-se pela descontinuidade na altura do corpo da alma que algumas vezes pode se propagar por vários metros do trilho.

Não é possível o entalamento deste defeito, devendo a solução de substituição ser aplicada.

Fotografia 8 – Trinca vertical na alma em junta/fora da junta



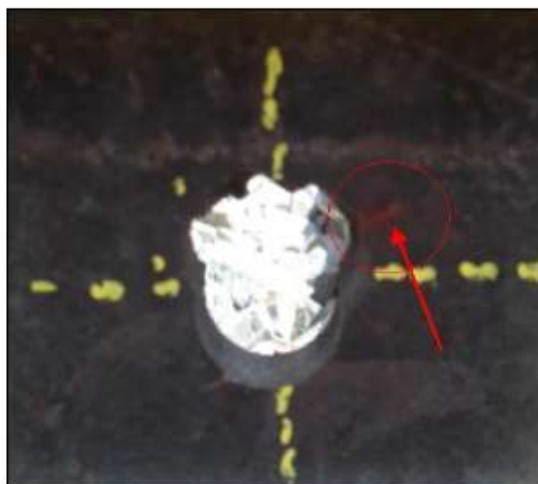
Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- BHJ – Trinca nos Furos da Junta

Por estar ligado através de tala, este tipo de defeito torna-se perigoso uma vez que o defeito encontrado está escondido, e sua avaliação visual poderá ser realizada somente quando da abertura das talas.

Todo defeito deste tipo deve ser desentalado para avaliação visual, independentemente da situação. Posterior à identificação do defeito, o mesmo deve ser retirado da linha através de substituição do trilho.

Figura 6 – Trinca nos furos da junta



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- BHO – Trinca nos Furos Fora da Junta

Este defeito caracteriza-se pela propagação de trincas ligando furos em diversas circunstâncias.

Não se deve realizar o entalamento deste tipo de defeito, pois a descontinuidade se propagaria de forma aleatória no restante do perfil. Deve ser retirado da linha através da substituição do trilho.

Fotografia 9 – Trinca nos furos fora da junta



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- TDC – Trinca Composta

A trinca composta forma normalmente fraturas de grandes proporções, com soltura de fragmentos com tamanhos consideráveis, tomando praticamente inevitável o acidente quando ocorrido em sua circunstância.

Trincas compostas tem como solução padrão, a substituição do trilho visto que devido a sua extensão e característica, seu crescimento não possui regra de direção.

O entalamento não é suficiente para acabar com o risco de evolução do problema.

Fotografia 10 – Trinca composta



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- TDF – Trinca no Patim

Defeito originado na região do patim, provavelmente gerado por problemas na superestrutura, como lastro colmatado e/ou falta de dormentes.

Fotografia 11 – Trinca no patim do trilho



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

2.5 NOMENCLATURA DOS DEFEITOS EXTERNOS E/OU SUPERFICIAIS

As nomenclaturas dos defeitos superficiais foram extraídas do manual de via permanente da Vale (2013) e serão apresentados a seguir. Os defeitos de fadiga por contato (*Rolling Contact Fatigue*) são considerados com defeitos superficiais e

geralmente provenientes de colapso ou fadiga de material. Os principais defeitos superficiais ou de Fadiga de Contato são:

- *Head Checks* – trincas capilares de pequena extensão que se apresentam transversalmente ao boleto, próximas ao canto superior de bitola. Ocorre à grande pressão das rodas sobre o trilho em ferrovias de alta carga por eixo.

Fotografia 12 – *Head check* leve



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

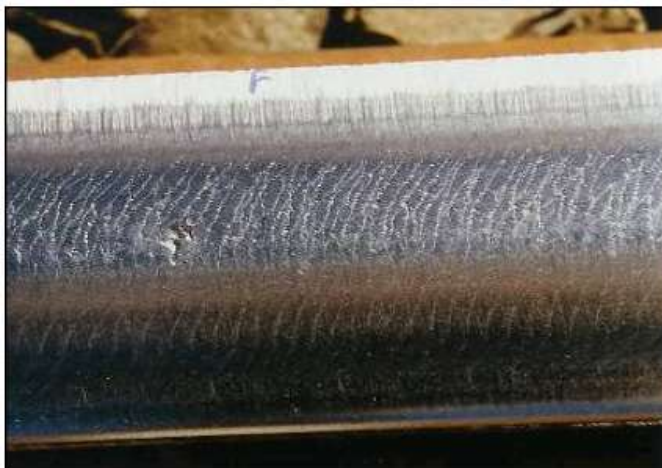
Fotografia 13 – *Head check* severo



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- *Cracking* – Cracks na superfície do trilho

Fotografia 14 - *Cracking*



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- *Shelling* – despedaçamento do canto de bitola. É um defeito causado pela perda de material iniciada pela fadiga subsuperficial. Ocorre normalmente, no canto da bitola dos trilhos externos, nas curvas. Quando estas rachaduras emergem na superfície, fazem com que o metal venha para fora da área da rachadura. Às vezes, estas rachaduras movem-se também em um sentido descendente, conduzindo a uma fratura transversal provável do trilho.

Fotografia 15 - *Shelling*



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- Corrugação

Fotografia 16 – Corrugação



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- *Dark spot/SQUAT* – apresenta-se como uma sombra escura devido a uma trinca superficial horizontal próxima à superfície de rolamento.

Fotografia 17 – *Dark spot*



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

Fotografia 18 - SQUAT



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- *Spalling* – estilhaçamento do canto de bitola. Quando o trajeto do desenvolvimento da rachadura é cruzado por outras rachaduras rasas similares na área da cabeça do trilho, uma microplaqueta rasa do material do trilho cai para fora. Este tipo de defeito é mais frequente em climas frios porque a rigidez do material do trilho aumenta.

Fotografia 19 - *Spalling*

Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- *Flaking* – escamação do boleto. Perda leve de material do boleto.

Fotografia 20 - Flaking



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

- Escoamento – o escoamento ocorre na área do topo do trilho, em uma profundidade que pode ser de até 15mm. O defeito ocorre no lado de bitola do trilho interno, devido à sobrecarga. O excesso de material escoado dá uma indicação do grau de deformação plástica sofrida pelo metal da camada superficial do boleto. Este defeito poderia ser eliminado esmerilhando o trilho, o que restauraria também o perfil original.

Fotografia 21 - Escoamento



Fonte: Manual via permanente Vale (2013).

Na EFVM os tipos de defeitos internos de trilhos mais comuns de serem encontrados são os do tipo transversal e trinca composta. Os defeitos internos de trilhos não podem ser eliminados com manutenção, sua substituição deve ser programada conforme tamanho da trinca antes que ocorra a ruptura do trilho. O prazo de substituição pode variar de 24 horas a 15 dias conforme tamanho.

Já os defeitos superficiais dependendo do tipo podem ser eliminados com o esmerilhamento de trilhos. Os tipos de defeitos superficiais mais comuns na EFVM são a corrugação e os *head checks*.

2.6 PREMISSAS DE SUBSTITUIÇÃO DE TRILHOS

Na EFVM os trilhos são substituídos conforme percentual de desgaste que podem variar conforme o trecho, grau de curva e perfil do trilho e em função das condições de degradação dos defeitos superficiais. Em alguns locais específicos são definidas premissas de substituição de acordo com a especificidade do local.

Além disso existe uma premissa que se no TLS (trilho longo soldado) houver 3 eventos (fraturas e/ou defeito detectado por ultrassom) no trilho e/ou na solda elétrica durante sua vida, o mesmo deverá ser substituído.

Devido aos orçamentos reduzidos na manutenção, os trilhos encontrados em tangentes são substituídos seguindo a premissa dos 3 eventos registrados e/ou devido a defeito superficial severo.

2.7 TÚNEL MONTE SECO L1

A análise da confiabilidade será realizada nos trilhos presentes no túnel Monte Seco L1. Para que fique mais fácil o entendimento, a seguir serão detalhadas algumas informações referentes ao local.

O túnel Monte Seco L1 (fotografia 22) é um túnel que possui 993 metros de extensão, dormentação de madeira e está presente na EH13/14 L1, cuja responsabilidade de manutenção da superestrutura é da supervisão de manutenção de via permanente de João Neiva.

Fotografia 22 – Entrada Túnel Monte Seco L1



Fonte: Vídeo da Inspeção Carro Controle.

No ano de 2013 este túnel passou por um serviço de desguarnecimento mecanizado de lastro. Conforme descrito no manual de via permanente da Vale (2013), o processo de desguarnecimento visa retornar o lastro ferroviário às características granulométricas adequadas para que as suas funções preconizadas sejam atendidas e seja retomada a espessura adequada da camada, plataforma uniforme, além de corte longitudinal reto e uniforme. Durante o processo de desguarnecimento também foi realizada a substituição de todos os dormentes do túnel, porém os trilhos por estarem em boas condições não foram substituídos. Os trilhos que se encontram no túnel Monte Seco L1, são todos trilhos do fabricante Nippon Steel e foram fabricados em 2010, sendo instalados no local em 2011.

Em função da ocorrência de fraturas de trilho no local em 2017, ficou claro a necessidade de uma análise mais detalhada da confiabilidade dos trilhos do local para determinação da substituição de todos eles.

2.8 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi abordado sobre a via permanente, seus principais elementos e funções. Além disso foram abordados também os tipos de defeitos existentes na via permanente para entendimento da caracterização de uma fratura de trilho a partir dos defeitos existentes. Foram apresentados os principais critérios

utilizados pela EFVM para substituição de seus trilhos e uma descrição rápida sobre o local e ativos que serão analisados neste trabalho.

Os itens apresentados neste capítulo são importantes para entendimento da importância da análise da confiabilidade de trilhos, pois os mesmos são responsáveis pelo consumo de maior parte de orçamento. Além disso em caso de fratura podem acarretar em ocorrências ferroviárias graves que podem gerar grandes prejuízos para a empresa.

No próximo capítulo é abordado o referencial teórico de análise de vida para aplicação no estudo de caso.

3 ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

Neste capítulo é apresentado o conceito de confiabilidade e distribuições de probabilidade que serão utilizados como referência para aplicação no estudo de caso do trabalho.

3.1 CONCEITO BÁSICO DE CONFIABILIDADE

Conforme definido na NBR 5462 (1994), a confiabilidade é a capacidade de um item de desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), em seu sentido mais amplo a confiabilidade está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas. Em análises de engenharia, todavia, é necessária uma definição quantitativa de confiabilidade, em termos de probabilidade. Tal definição, proposta por Leemis (1995) apud Fogliatto e Ribeiro (2009), define que a confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas.

Resumidamente, se a confiabilidade é uma probabilidade, então, ela pode variar de 0 a 1.

Para definir a confiabilidade de um item, precisamos definir o conceito de falha, que de acordo com a NBR 5462 (1994), é o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida.

Na EFVM é considerada falha de via permanente quando um equipamento de via permanente deixa de desempenhar a função para o qual foi projetado, gerando interdição de via validade pela via permanente.

3.1.1 Principais Conceitos Associados à Confiabilidade

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009), os principais conceitos associados à confiabilidade são: qualidade, disponibilidade, manutenibilidade, segurança e confiança. Abaixo estão descritos os conceitos acima citados conforme NBR 5462 (1994) e ISO-8402 (1994) apud Fogliatto e Ribeiro (2009).

Qualidade: pode ser definida como a totalidade de características e aspectos de um produto ou serviço que tornam possível a satisfação de necessidades implícitas e explícitas associadas ao produto ou serviço. De forma mais específica, a qualidade é definida como cumprimento a especificação de projeto e manufatura com menor variabilidade possível.

Disponibilidade: é definida como a capacidade de um item, mediante manutenção, apropriada, desempenhar sua função requerida em um determinado instante de tempo ou em um período de tempo predeterminado. O conceito de disponibilidade varia conforme a capacidade de reparo de uma unidade. Em unidades não reparáveis, os possíveis estados de unidade em um tempo t de análise são funcionando ou em manutenção (isto é, sofrendo reparo). Nestes casos costuma-se supor que reparos devolvam a unidade à condição de nova e trabalhasse com um valor médio de disponibilidade para a unidade dado por (1):

$$A = \frac{MTTF}{MTTF+MTTR} \quad (1)$$

Onde:

A= disponibilidade média da unidade

MTTF = tempo médio entre falhas (ou seja, tempo médio de funcionamento da unidade)

MTTR = tempo médio até a conclusão de reparos feitos na unidade.

Mantenabilidade: é definida como a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, mediante condições preestabelecidas de uso, quando submetido à manutenção sob condições predeterminadas e usando recursos e procedimentos padrão. A mantenabilidade é um fator essencial no estabelecimento da disponibilidade de uma unidade.

Segurança: é definida como ausência de condições que possam causar morte, dano ou doenças ocupacionais a pessoas, bem como dano ou perda de equipamentos ou de propriedade. Uma definição alternativa de segurança substitui o termo “ausência” por “nível aceitável de risco”, já que em muitas atividades é impossível chegar-se a uma condição isenta de risco.

Confiança (ou dependabilidade): é o desempenho da confiabilidade, da mantenabilidade e do suporte técnico. Pode-se considerar os conceitos de confiança

e confiabilidade como análogos; o termo confiança, todavia, estaria associado a uma definição mais ampla, não estritamente probabilística de confiabilidade.

Estes conceitos precisam ser bem entendidos para que possam ser aplicados e calculados de organização para organização.

3.2 ESTATÍSTICA DA ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

A estatística da engenharia de confiabilidade ou análise de dados de vida utiliza metodologias estatísticas para construir modelos probabilísticos a partir dos dados de vida dos itens. Estes modelos são utilizados para realizar previsões sobre os itens como sua confiabilidade ou probabilidade de falha em um momento específico, a sua vida média e a taxa de falha.

Conforme Reliasoft, para a análise de dados de vida seja realizada é necessário que sejam seguidos alguns passos:

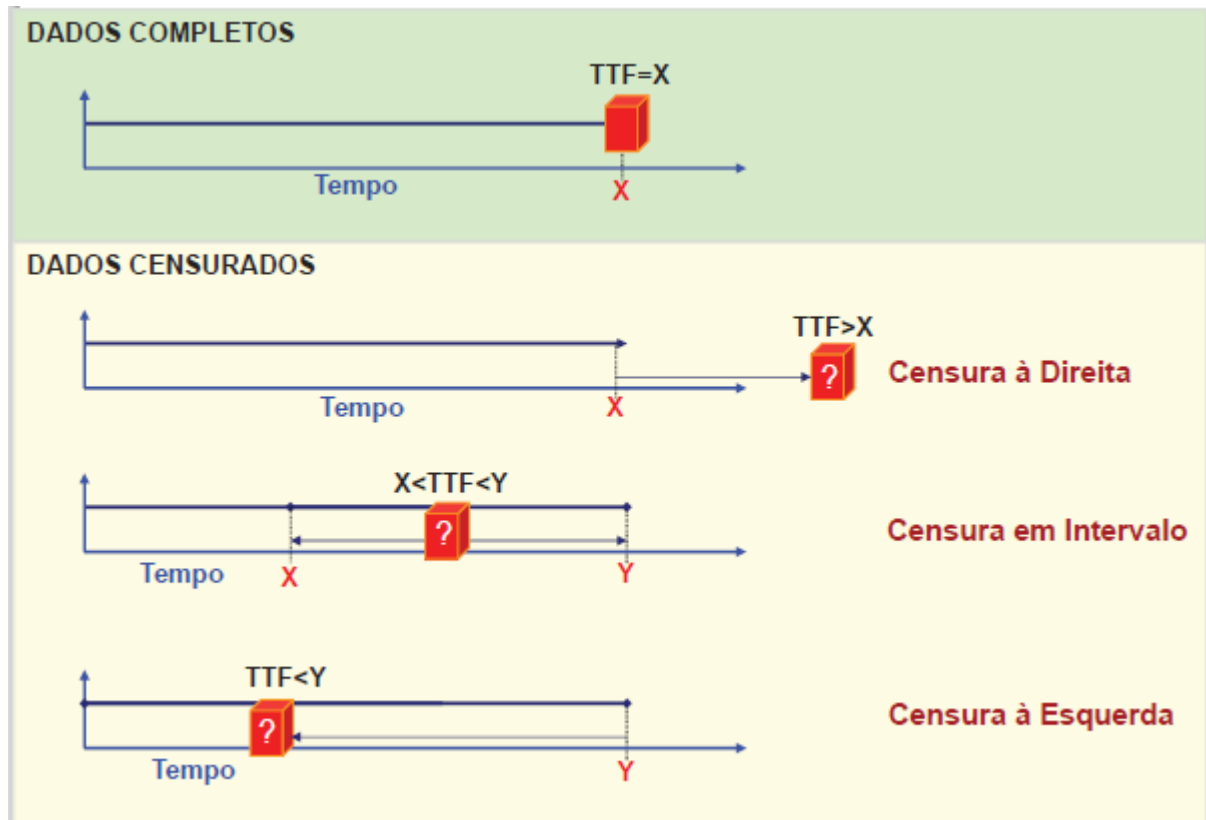
- Reunir os dados de vida do item que se deseja analisar;
- Selecionar uma distribuição de vida que corresponda com os dados levantados e modelar a vida útil do item;
- Estimar os parâmetros que irão ajustar a distribuição dos dados;
- Gerar gráficos e resultados que estimem as características de vida do item, como a confiabilidade ou a vida média.

3.2.1 Tipos de Dados de Confiabilidade

Conforme Reliasoft (2014), o tipo de dado afeta o processo de estimativa da confiabilidade, portanto, é muito importante a correta classificação pelo tipo de dado. Como a maioria dos dados em confiabilidade contém censuras (informação incompleta), os modelos e análises devem tratar estes dados.

A figura 7 demonstra os tipos de dados existentes de forma clara e objetiva:

Figura 7 – Dados de Confiabilidade



Fonte: Apostila G400 Reliasoft (2014).

Conforme figura acima, os dados são considerados completos quando o tempo até a falha de todos os itens é conhecido. Já em dados censurados, temos três tipos de situação:

- Censura à direita: utilizado quando até o momento da análise de falha alguns itens ainda não falharam;
- Censura em intervalo: utilizado quando a falha ocorreu em um intervalo de tempo conhecido entre uma análise e outra;
- Censura à esquerda: utilizado quando a falha ocorreu em um momento desconhecido antes da análise.

3.2.2 Estatística Básica

Antes de falarmos sobre os modelos de distribuição de dados de vida, serão abordados alguns conceitos de estatística básica considerados importantes para o trabalho, como: variáveis aleatórias, função densidade de probabilidade, função distribuição acumulada, taxa de falhas e confiabilidade condicional.

3.2.2.1 Variáveis Aleatórias

Segundo Montgomery e Runger (2016), uma variável aleatória é uma função que confere um número real a cada resultado no espaço amostral de um experimento aleatório, podendo esta variável ser discreta ou contínua.

Uma variável aleatória discreta é uma variável com uma faixa finita ou infinita contável, enquanto que uma variável aleatória contínua é uma variável com um intervalo tanto finito quanto infinito de números reais para a sua faixa.

Exemplos de variáveis aleatórias discretas: número de arranhões em uma superfície, proporção de partes defeituosas entre 1000 testadas, número de bits transmitidos que foram recebidos com erro.

Exemplos de variáveis aleatórias contínuas: corrente elétrica, comprimento, pressão, temperatura, tempo, voltagem, peso.

3.2.2.2 Função Densidade de Probabilidade e Função Distribuição Acumulada

De acordo com a Reliasoft (2014), a partir de probabilidade e estatística, para uma variável aleatória contínua X , descrevemos:

- A função densidade de probabilidade, *pdf*, como $f(x)$;
- A função distribuição acumulada, *cdf*, como $F(x)$.

A *pdf* e a *cdf* descrevem a distribuição das probabilidades da variável aleatória.

Para Montgomery e Runger (2016), uma função densidade de probabilidade $f(x)$ pode ser usada para descrever a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória contínua X . A probabilidade de X estar entre a e b é determinada pela integral de $f(x)$ de a e b conforme figura 8:

Figura 8 – Função densidade de probabilidade

Função Densidade de Probabilidade

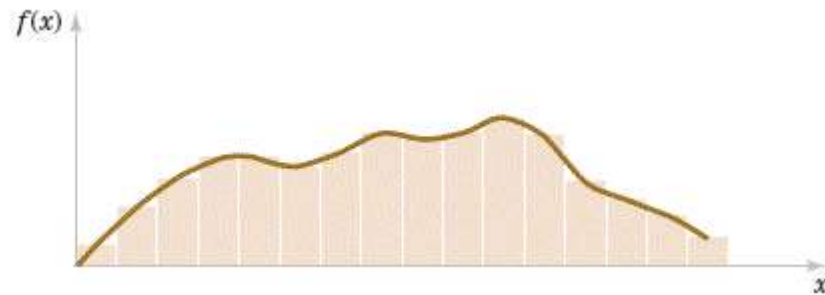
Para uma variável aleatória contínua X , uma **função densidade de probabilidade** é uma função tal que

- (1) $f(x) \geq 0$
- (2) $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$
- (3) $P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx = \text{área sob } f(x) \text{ de } a \text{ a } b \text{ para qualquer } a \text{ e } b$ (4-1)

Fonte: Montgomery e Runger (2016).

Um histograma é uma aproximação da função densidade de probabilidade, conforme podemos observar no gráfico 1 abaixo:

Gráfico 1 – Histograma aproxima a função densidade de probabilidade



Fonte: Montgomery e Runger (2016).

Para se obter a probabilidade a partir da *pdf*, é necessário calcular a área abaixo da curva.

Já quando utilizamos a função distribuição acumulada, *cdf*, a probabilidade é fornecida diretamente. A função de distribuição cumulativa é definida para todos os números reais. Abaixo podemos verificar na figura 9 a função da *cdf*.

Figura 9 – Função de distribuição cumulativa

Função de Distribuição Cumulativa

A função de distribuição cumulativa de uma variável aleatória contínua X é

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(u) du \quad (4-3)$$

para $-\infty < x < \infty$.

Fonte: Montgomery e Runger (2016).

A função densidade de probabilidade de uma variável aleatória contínua por ser determinada a partir de uma diferenciação da função distribuição cumulativa como pode ser observado na figura 10:

Figura 10 – Relação matemática entre *pdf* e *cdf*

Função Densidade de Probabilidade a Partir da Função de Distribuição Cumulativa

$$\frac{d}{dx} \int_{-\infty}^x f(u) du = f(x)$$

Então, dado $F(x)$,

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$$

desde que a derivada exista.

Fonte: Montgomery e Runger (2016).

Simplificando, a *cdf* é a área formada pela função densidade de probabilidade, até um valor x desejado.

3.2.2.3 Função Taxa de Falha

De acordo com Reliasoft (2014), a taxa de falhas nos dá o número de falhas por unidade de tempo, podendo a variável tempo ser qualquer medida quantificável, como: minutos, horas, ciclos, atuações, etc.

Matematicamente falando (2):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2)$$

A taxa de falha de um item pode ser decrescente, constante ou crescente. Ela vai variar de acordo com a distribuição dos dados analisados.

3.2.2.4 Função Confiabilidade Condicional

A Reliasoft (2014) define a função confiabilidade condicional como a probabilidade de um item sobreviver a uma nova missão de duração t , dado que ele já completou com sucesso uma missão de duração T .

Em outras palavras (3):

$$R(T, t) = \frac{R(T+t)}{R(T)} \quad (3)$$

3.2.3 Distribuições de Probabilidade

De acordo com a Reliasoft (2014), existem diferentes distribuições de probabilidade como: Normal, Exponencial, Weibull, Lognormal, Gama Generalizada, etc. Cada uma delas tem um $f(t)$ pré-definido e podem ser encontradas em muitas referências estatísticas.

Estas distribuições foram formuladas por estatísticos, matemáticos ou engenheiros com o intuito de modelar matematicamente ou representar determinado comportamento. Algumas destas distribuições tendem a representar melhor os dados de vida e por isso, são mais frequentemente chamadas de “distribuições de vida”.

Os modelos de distribuição mais comumente utilizados são:

- Exponencial: taxa de falha constante;
- Weibull: taxa de falha pode ser decrescente, constante ou crescente;
- Lognormal: crescente e decrescente assintoticamente para o zero;
- Normal: taxa de falha crescente
- Outras:
 - Gama;
 - Gama Generalizada;
 - Logística;
 - Loglogística;
 - Gumbel;
 - Modelos Mistos (Ex.: Weibull Mista)
 - Modelos Competitivos (CFM)

Existem algumas métricas que são bastante utilizadas nas distribuições de confiabilidade, sendo elas:

- Confiabilidade $R(t)$: probabilidade de que a falha não ocorrerá até o tempo t ;
- Desconfiabilidade $Q(t)$: probabilidade de que a falha será observada no tempo t ;
- Vida BX: tempo em que a não confiabilidade é igual a X% (Ex.: B10 é o tempo no qual 10% das falhas ocorrerão);
- Vida Média (MTTF): tempo médio até a falha;
- Vida Mediana: tempo no qual 50% das falhas são esperadas;
- Confiabilidade Condicional $R(T,t)$: probabilidade de que uma falha não ocorrerá num tempo adicional t , dado que o item funcionou com sucesso por um tempo T .

A seguir será realizada uma explanação sucinta sobre as principais distribuições de probabilidade.

3.2.3.1 Distribuição Exponencial

Para Fogliatto e Ribeiro (2009) a distribuição exponencial é importante em estudos de confiabilidade por ser a única distribuição contínua com função de risco constante.

De acordo com a Reliasoft a distribuição exponencial é comumente usada para componentes ou sistemas que exibem uma taxa de falha constante. Devido à sua simplicidade, tem sido amplamente empregada, mesmo nos casos em que não se aplica. Em seu caso mais geral, a distribuição exponencial de dois parâmetros é definida por (4):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)} \quad (4)$$

Onde:

λ – taxa de falha constante em falhas por unidade de medida (falhas por hora, por ciclo, etc.)

γ – parâmetro de localização.

Além disso, $\lambda = \frac{1}{m}$ onde m é o tempo médio entre falhas (ou falha).

Se o parâmetro de localização, γ é assumido como zero, então a distribuição se torna exponencial de 1 parâmetro ou (5):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (5)$$

3.2.3.2 Distribuição Weibull

De acordo com Montgomery e Runger (2016), a distribuição de Weibull é frequentemente usada para modelar o tempo até a falha de muitos sistemas físicos diferentes. Os parâmetros na distribuição fornecem uma grande flexibilidade para modelar sistemas em que o número de falhas aumenta com o tempo, diminui com o tempo ou permanecem constantes com o tempo.

De acordo com a Reliasoft, em seu caso mais geral, a *pdf* de Weibull de 3 parâmetros é definida pela equação (6):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (6)$$

Onde:

β – parâmetro de forma

η – parâmetro de escala

γ – parâmetro de localização.

Se o parâmetro de localização γ é assumido como zero, então a distribuição se torna de 2 parâmetros ou (7):

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta} \quad (7)$$

Uma forma adicional é a distribuição de Weibull de 1 parâmetro, que pressupõe que o parâmetro de localização γ é zero e o parâmetro de forma é uma constante conhecida, ou $\beta = \text{constante} = C$, então (8):

$$f(t) = \frac{c}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^c} \quad (8)$$

3.2.3.3 Distribuição Normal

Segundo Montgomery e Runger (2016) a distribuição normal ou distribuição Gaussiana, é o modelo mais largamente utilizado.

A Reliasoft relata que a distribuição normal é comumente usada para análise de confiabilidade geral, tempos de falha de componentes, equipamentos ou sistemas eletrônicos e mecânicos simples. A *pdf* da distribuição normal é dada pela equação (9):

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (9)$$

Onde:

μ – é a média dos tempos normais para a falha e σ é o desvio padrão dos tempos até a falha.

3.2.3.4 Distribuição Lognormal

De acordo com Montgomery e Runger (2016), variáveis em um sistema seguem, algumas vezes, uma relação exponencial. Se o expoente for uma variável aleatória W , então $X=\exp(W)$ será uma variável aleatória com uma distribuição de interesse. Um importante caso especial ocorre quando W tem uma distribuição normal. Neste caso, a distribuição de X é chamada de uma distribuição lognormal.

Segundo a Reliasoft a distribuição lognormal é comumente usada para a análise de confiabilidade geral, ciclos de falha na fadiga, força de material e variáveis de carregamento em design probabilístico. Quando os logaritmos naturais dos tempos de falha são normalmente distribuídos, então dizemos que os dados seguem a distribuição normal. A *pdf* da distribuição lognormal é dada pela equação (10):

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

$$f(t) \geq 0, t > 0, \sigma' > 0 \quad (10)$$
$$t' = \ln(t)$$

Onde:

μ' – é a média dos logaritmos naturais dos tempos de falha;

σ' – é o desvio padrão dos logaritmos naturais dos tempos até a falha.

3.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o conceito de confiabilidade, tipos de dados de confiabilidade e distribuições de probabilidade mais comumente utilizadas para análise de dados de vida. Estes conceitos serão importantes para definição de qual modelo de distribuição de probabilidade adotar em função dos dados disponíveis para o estudo de caso que será abordado no próximo capítulo.

4 ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS TRILHOS DO TÚNEL MONTE SECO L1

Este capítulo trata da aplicação do referencial teórico de análise de confiabilidade abordado no capítulo 3, nos trilhos do túnel Monte Seco L1.

4.1 COLETA DE DADOS

Conforme informado no capítulo 2 deste trabalho, os trilhos do túnel Monte Seco L1 vem apresentando registros de fraturas a partir de 2017, tornando-se importante a análise da confiabilidade dos trilhos do local.

Foram levantados através de relatórios extraídos do sistema informatizado de manutenção, a data de instalação dos trilhos no Túnel Monte Seco L1, sendo apresentadas no quadro 1 abaixo:

Quadro 1 – Instalação dos trilhos no túnel Monte Seco L1

Trilho	Data de Instalação	Extensão	Fabricante
Trilho 1	19/09/2011 a 23/09/2011	993 metros	Nippon Steel 2010
Trilho 2	19/09/2011 a 23/09/2011	993 metros	Nippon Steel 2010

Fonte: a autora (2017).

Após instalação dos trilhos e já mencionado no capítulo 2 deste trabalho foi realizado desguarnecimento de lastro no túnel e substituição de todos os dormentes do local em 2013, porém os trilhos permaneceram os mesmos por estarem dentro da sua vida útil e em boas condições.

Em julho de 2017, ocorreu a primeira fratura dos trilhos do túnel Monte Seco L1 e após esta data foram registradas mais 3 fraturas, somando-se 4 no total. As datas das fraturas foram extraídas do relatório de falhas da área de confiabilidade de via permanente da EFVM e estão relacionadas abaixo conforme tabela 1.

Tabela 1 – Registro de fraturas de trilho (túnel Monte Seco L1)

Data Fratura	Dias até a falha	Tempo de Interdição de Linha
03/07/2017	2110	18 horas
21/07/2017	2128	9 horas e 40 minutos
07/09/2017	2176	9 horas e 45 minutos
20/09/2017	2189	17 horas e 34 minutos

Fonte: a autora (2017).

A tabela 1, mostra os registros de falhas do local até 20/09/2017. Após esta data, os trilhos foram observados até a data de 30/09/2017 e não houveram mais registros de fratura no local.

Para que fique mais fácil o entendimento, com relação a falha de fratura de trilho, será explicado no próximo parágrafo.

A fratura de trilho conforme definido na NBR 7640 (2014), é a condição em que há rompimento da estrutura do trilho, com separação de partes.

Quando a fratura ocorre, o pedaço fraturado é retirado e substituído por um novo pedaço de trilho. São realizadas duas soldas aluminotérmicas ou colocadas juntas metálicas para unir os trilhos.

Na fotografia 23, podemos observar as fotos das fraturas ocorridas nos trilhos do túnel Monte Seco L1:

Fotografia 23 – Fraturas trilho túnel Monte Seco L1

Data fratura: 03/07/2017
Tipo: TDT - Transversal



Data fratura: 21/07/2017
Tipo: TDT - Transversal



Data fratura: 07/09/2017
Tipo: TDT - Transversal



Data fratura: 21/09/2017
Tipo: TDC - Composta



Fonte: a autora (2017)

Conforme pode-se observar na figura 23, 3 das 4 fraturas ocorridas no túnel são do tipo TDT – Transversal e 1 fratura do tipo TDC – Composta.

Foram realizadas as análises dos dados pelo GAF, e identificado que as fraturas ocorreram em um local exposto a constante umidade devido a deficiência de drenagem do túnel. Essa exposição iniciou um processo de corrosão do trilho formando pites e microfissuras nas faces externas do mesmo. A penetração da umidade, gerou fenômenos eletroquímicos nos átomos, culminando na ruptura do trilho.

Estão previstos serviços de desguarnecimento mecanizado do lastro no túnel para o início de outubro, porém os trilhos restantes já foram expostos a mesma umidade dos trilhos fraturados e mesmo após o desguarnecimento encontram-se fragilizados.

4.2 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS

Para realização da análise dos dados de vida dos trilhos do túnel Monte Seco L1, será utilizado o software Weibul++.

Para os lançamentos dos dados no software os trilhos do túnel foram divididos em 10 partes, sendo que destas 10, 4 já apresentaram falha e as outras 6 não apresentaram registros de falha até 30/09/2017.

A figura 11 mostra a entrada dos dados que serão analisados pelo Weibull++.

Figura 11 – Entrada de dados no Weibull++

	Quantidade	Condição F ou S	Tempo Operação (dia)	Subconjunto ID 1
1	1	F	2110	Trilhos Túnel Monte Seco L1
2	1	F	2128	Trilhos Túnel Monte Seco L1
3	1	F	2176	Trilhos Túnel Monte Seco L1
4	1	F	2189	Trilhos Túnel Monte Seco L1
5	6	S	2199	Trilhos Túnel Monte Seco L1

Fonte: a autora (2017) – aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Conforme figura 11, foram inseridos no Weibull++ os dados de falha e os dados de suspensão.

Para cálculo da distribuição de probabilidade foi escolhido como método estimativo, o método da Máxima Verossimilhança (MLE), pois apesar da amostra ser pequena, possuímos tanto dados censurados à direita quanto dados agrupados, que para estes casos é o mais indicado, pois considera o tempo até a falha e/ou suspensão ao invés do número de ordem.

Com os dados lançados no sistema, é utilizado o assistente de distribuição para realização do teste de aderência e escolha do melhor modelo de distribuição de acordo com os dados.

A figura 12 mostra o resultado do teste de aderência:

Figura 12 – Resultado do teste de aderência

Matriz dos Resultados Atuais	
Ordem da Matriz:	
Distribuição	Ranqueando
Exponencial-2P	1
Weibull-3P	2
Loglogística	2
Logística	3
Normal	3
Gama	3
Gama-G	3
Gumbel	4
Lognormal	4
Exponencial-1P	5
Parâmetros calculados para cada Distribuição:	
Início Exponencial-1P	
Lambda=0,000183511492407212	
Terminado Exponencial-1P	
Início Exponencial-2P	
Lambda=0,00573888091822095	
Gama=2110	
Terminado Exponencial-2P	
Início Normal	
Média=2213,90016080334	
DesvioP=64,1613805672416	
Terminado Normal	
Início Lognormal	
LMédia=7,70268634322665	
LDesvioP=0,0297214432854556	
Terminado Lognormal	
Início Weibull-2P	
Erro: Erro crítico no cálculo dos parâmetros. Os parâmetros para a distribuição selecionada, o número de parâmetros e o método não podem ser calculados com esta amostra. Troque a distribuição, número de parâmetros ou o método e recalcule.	
Início Weibull-3P	
Beta=1,16791763762589	
Eta=179,937897903922	
Gama=2098,9	
Terminado Weibull-3P	
Início Gama	
Mu=0,654826786364839	

Fonte: a autora (2017) – aplicação do software Weibull++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

O resultado do teste de aderência indica que a melhor distribuição a ser utilizada é a Exponencial-2P, porém uma vez que os trilhos são itens que se degradam com o tempo, optou-se por utilizar a segunda opção do teste de aderência que foi a Weibull-3P.

A distribuição Weibull-3P foi implementada e os resultados estão descritos na figura 13:

Figura 13 – Relatório de resultado simplificado

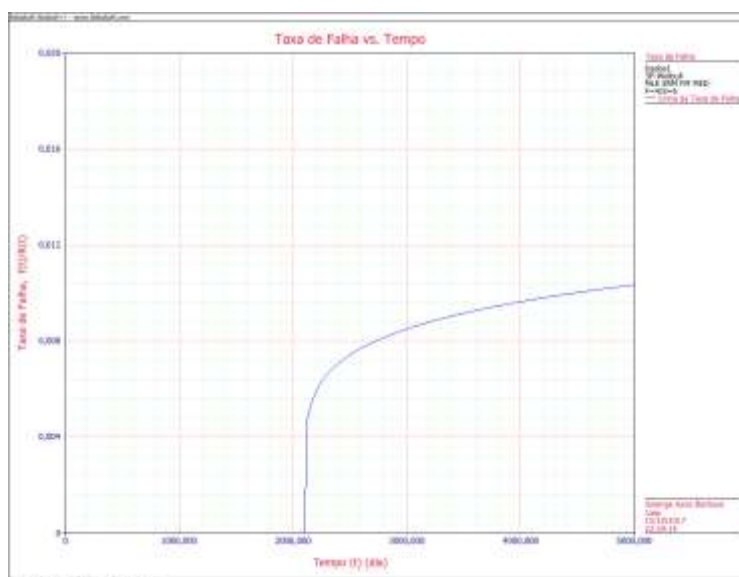
Relatório de Resultados Simplificado	
Tipo de Relatório:	Resultados do Gráfico
Informações do Usuário	
Nome:	Solange Ássis Barbosa
Empresa:	Vale
Data:	15/10/2017
Análise Trilhos Túnel Monte Seco L1 Dados1	
Código de Peça:	
Versão:	
Aplicativo:	
Descrição:	
Parâmetros	
Distribuição:	Weibull-3P
Análises:	MLE
Método do IC:	FM
Ranqueando:	MED
Beta	1,167918
Eta (dia)	179,937898
Gama (dia)	2098,9
Valor da LK	-25,181704
F/S	4/6
LOCAL VAR/COV MATRIX	
Var-Beta=0,303392	CV Eta Beta=-31,806508
CV Eta Beta=-31,806508	Var-Eta=9268,662332

Dados Brutos				
Número do Item	Quantidade	Condição F ou S	Tempo Operação (dia)	Subconjunto ID 1
1	1	F	2110	Trilhos Túnel Monte Seco L1
2	1	F	2128	Trilhos Túnel Monte Seco L1
3	1	F	2176	Trilhos Túnel Monte Seco L1
4	1	F	2189	Trilhos Túnel Monte Seco L1
5	6	S	2199	Trilhos Túnel Monte Seco L1

Fonte: a autora (2017) – aplicação do software Weibull++. Versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

O resultado dos dados demonstra pelo valor de $\beta \approx 1,16$ que se trata de uma distribuição com taxa de falhas crescente, que é característica de itens que degradam com o passar do tempo. Isso pode ser comprovado com a figura 16 que mostra o gráfico da taxa de falhas x tempo (dia):

Gráfico 2 – Gráfico taxa de falhas x tempo dos trilhos do túnel Monte Seco L1

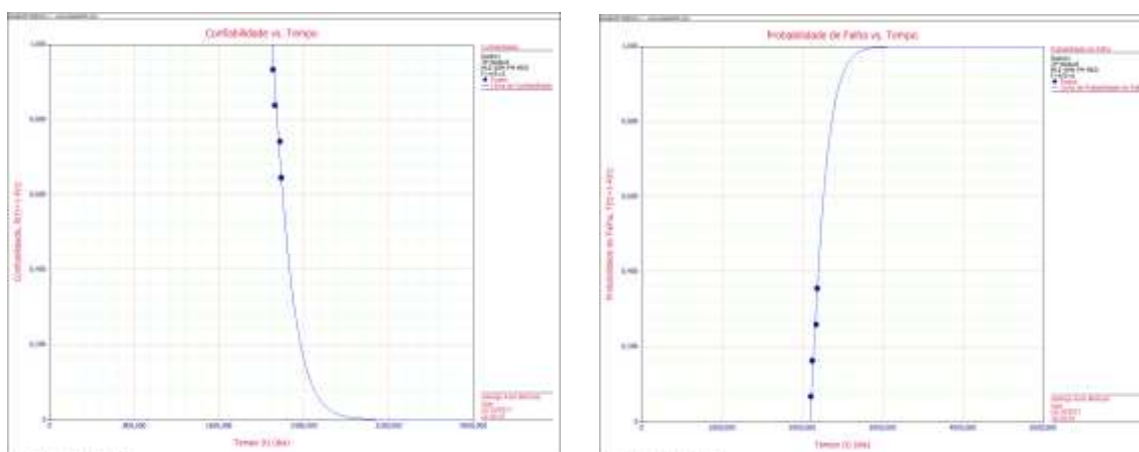


Fonte: a autora (2017) – aplicação do software Weibull++. Versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

O gráfico 2, confirma taxa de falhas crescente para os trilhos do túnel Monte Seco L1.

No gráfico 3, temos os gráficos da confiabilidade x tempo e probabilidade de falhas x tempo dos trilhos do túnel Monte Seco L1.

Gráfico 3 – Gráfico confiabilidade x tempo dos trilhos do túnel Monte Seco L1



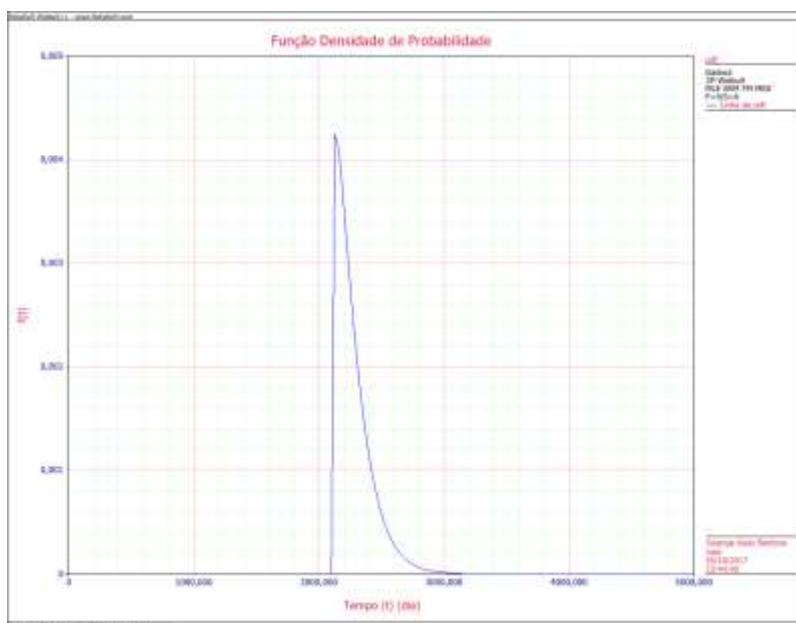
Fonte: a autora (2017) – aplicação do software Weibull++. Versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

O gráfico 3, mostra uma confiabilidade com tendência de redução rápida em um curto intervalo de tempo e conseqüentemente a probabilidade de falha é alta. O

que indica que é necessário realizar a substituição dos demais trilhos o quanto antes para evitar que estas falhas ocorram e gerem mais interdições de linha.

O gráfico 4 mostra a pdf dos trilhos do túnel Monte Seco L1.

Gráfico 4 – Função densidade de probabilidade de falhas dos trilhos do túnel Monte Seco L1

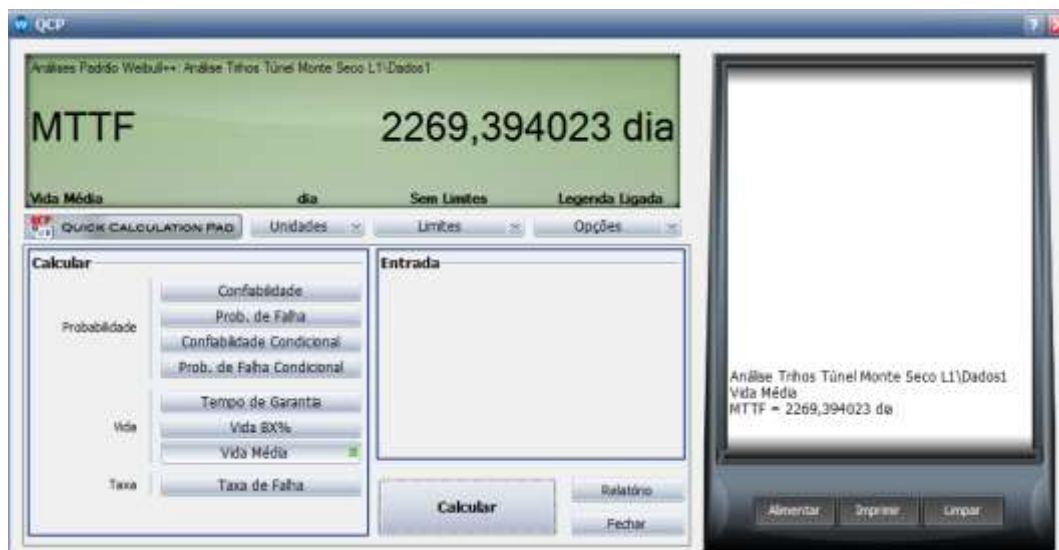


Fonte: a autora (2017) – aplicação do software Weibull++. Versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

O gráfico 4, trata-se da pdf dos trilhos do túnel Monte Seco L1, esta pdf demonstra que os trilhos vivem um período sem a ocorrência de falhas, porém a partir do primeiro registro que ocorreu com 2110 dias, os registros se tornam constantes e que as próximas falhas tendem a ocorrer em um intervalo curto de tempo.

A figura 14, mostra a vida média dos trilhos do túnel.

Figura 14 – Vida média trilhos túnel Monte Seco L1



Fonte: a autora (2017) – aplicação do software Weibull++. Versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

A figura 14, indica que a vida média dos trilhos do túnel Monte Seco L1 é de 2.269 dias, ou seja, isso significa o tempo médio de vida até a falha.

A tabela 2, mostra a probabilidade de falha no local para os próximos meses em até um ano com um nível de confiança bilateral de 0,9.

Tabela 2 – Probabilidade de falha até setembro de 2018

Probabilidade de Fratura de Trilho Túnel Monte Seco L1													
Mês/ano	set/17	out/17	nov/17	dez/17	jan/18	fev/18	mar/18	abr/18	mai/18	jun/18	jul/18	ago/18	set/18
Dias	2199	2230	2260	2291	2322	2350	2381	2411	2442	2472	2503	2534	2564
Probabilidade Falha	40%	50%	58%	66%	72%	77%	82%	85%	88%	90%	92%	94%	95%

Fonte: a autora (2017)

Conforme a tabela 2, foi inserida a probabilidade de falha no local para os próximos meses em até um ano após a suspensão dos dados. O resultado mostra que até setembro de 2018, 95% dos trilhos do local já terão falhado. Dos registros das 4 fraturas de trilho que já ocorreram no local, foi gerado um total de aproximadamente 55 horas de interdição de linha, que dá uma média aproximada de 14 horas de interdição por fratura.

4.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi abordado sobre a coleta dos dados para realização do estudo de caso, além da escolha da distribuição a ser utilizada e análise dos dados e resultados.

Após análise dos dados foi possível observar que a vida média dos trilhos no túnel Monte Seco L1 é em torno de 6 anos, e que após este período as fraturas de trilho começam a ser tornar mais frequentes. No capítulo seguinte será descrita a conclusão do trabalho e dadas sugestões para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÃO

A partir dos dados analisados no capítulo 4 deste trabalho chegamos à conclusão de que os trilhos do túnel Monte Seco L1 apresentam uma vida média em torno de 6 anos e que após esta data as fraturas se tornam mais frequentes.

Pode-se verificar também pelos gráficos de confiabilidade, probabilidade de falhas e pdf, que aproximadamente 100% dos trilhos irão falhar até o próximo ano.

Conforme informado no capítulo 2 deste trabalho, a estratégia de manutenção da via permanente orienta que após o registro de 3 eventos de falha em um TLS, que este seja substituído.

Até a data de análise deste trabalho, foram detectados 4 registros de falhas nos trilhos do túnel Monte Seco L1, sendo 2 registros em fila de trilho.

Conforme tabela 2, a probabilidade de falhas dos trilhos é de 66% podendo chegar a aproximadamente 95% para um limite de confiança bilateral de 0,9.

Portanto, é orientado que todos os trilhos do túnel sejam substituídos até dezembro de 2018, dado o risco de acidente ferroviário no local e pelo fato da estratégia de manutenção definir que a partir da 3ª fratura no mesmo TLS, ele deve ser substituído.

Além disso, com a substituição programada dos trilhos, seriam necessárias em torno de 40 horas de manutenção, número este 26% menor do que o tempo de interdição de via gerado nas 4 fraturas ocorridas.

Este tempo 26% menor de interrupção do tráfego geraria uma economia de aproximadamente R\$ 10.000,00 de redução no custo do trem hora parado.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilizando a análise de dados de vida para cálculo da confiabilidade dos trilhos do túnel Monte Seco L1, foi possível avaliar o tempo médio de vida dos trilhos no local dados as suas condições. Este trabalho pode ser replicado para os demais túneis da EFVM que se encontrem na mesma condição dos trilhos do túnel Monte Seco e após esta análise definir o tempo ótimo de substituição dos trilhos dos túneis da EFVM gerando o menor custo de manutenção.

6 REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Jorge Augusto Diniz. **Manual técnico de manutenção da superestrutura da via permanente**. Vale S/A. Documento Técnico 1698. Vitória. 2008.

BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estradas de Ferro Vol. 1**. 2ª ed. 1983.

DURVAL FILHO, Ernani; SILVA, Mario Wenceslau P.; MAGALHÃES, Paulo C. Barroso. **Via permanente**. Apostila do curso de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária – Vale/Faculdade Brasileira. Vitória, 2010.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro. Editora Elsevier, 2009.

IHHA. **Internacional Heavy Haul Association**. Disponível em: <<https://www.ihha.net/about-ihha/by-laws>>. Acesso em: 27/08/2017.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 6ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016.

NBR 5462:1994. **Confiabilidade e Manutenibilidade**. ABNT/CB-03 – Eletricidade – Publicada em 30/11/1994.

NBR 7640:2014. **Defeitos de trilhos utilizados para via férrea**. ABNT/CB-006 – Metroferroviário – Publicada em 06/10/2014.

RELIASOFT. **G400 – Fundamentos dos Modelos e Análise de Dados de Engenharia da Confiabilidade**. Tucson, AZ, USA, 2014

RELIAWIKI. **Life Data Analysis Reference Book**. Disponível em: <http://www.reliawiki.org/index.php/Life_Data_Analysis_Reference_Book>. Acesso em: 10/10/2017

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat., **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4ª ed. Florianópolis, Departamento de Ciência da Informação da UFSC, 2005.

VALE S/A. **Matéria – Estrada de Ferro Vitória a Minas completa 111 anos sobre os trilhos**. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/estrada-ferro-vitoria-minas-completa-111-anos-sobre-trilhos.aspx>>. Acesso em: 27/08/2017.

VALE S/A. **Manual Técnico de Via Permanente**. Departamento de Engenharia e Desenvolvimento Logístico. Belo Horizonte, 2013.

VALE S/A. **Vídeo carro controle**. Departamento de Operações EFVM. Vitória.

VALE S/A. **Documento Técnico 13673: Estratégia de Manutenção 2017-2021 para superestrutura EFVM**. Departamento de Engenharia e Desenvolvimento Logístico. Vitória, 2016