

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

**LEANDRO PRATES FERREIRA DE ALMEIDA**

**ENSAIOS ACELERADOS PARA ESTUDO DE VIDA EM FADIGA DE  
LATERAIS FERROVIÁRIAS**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2019**

**LEANDRO PRATES FERREIRA DE ALMEIDA**

**ENSAIOS ACELERADOS PARA ESTUDO DE VIDA EM FADIGA DE  
LATERAIS FERROVIÁRIAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni

Co-orientador: Prof. Eng. Claudio Caiani Spanó

**CURITIBA**

**2019**



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

### ENSAIOS ACELERADOS PARA ESTUDO DE VIDA EM FADIGA DE LATERAIS FERROVIÁRIAS

por

LEANDRO PRATES FERREIRA DE ALMEIDA

Esta monografia foi apresentada em 04 de outubro de 2019, 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. Emerson Rigoni, Dr. Eng.  
Professor Orientador - UTFPR

---

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

---

Prof. Wanderson Stael Paris, MSc.  
Membro Titular da Banca - UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

## RESUMO

ALMEIDA, Leandro Prates Ferreira de. **Ensaio acelerados para estudo de vida em fadiga de laterais ferroviárias**. 2019. 78 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O trabalho consiste na definição de metodologia e realização de ensaios de fadiga acelerados para laterais de truques ferroviários, com o objetivo de comparar a vida média remanescente de laterais novas com laterais com recuperação de trincas em regiões críticas, de modo a gerar dados para auxiliar a tomada de decisão sobre a implantação ou não deste processo. Os dados de falha obtidos dos ensaios foram analisados através das metodologias de análise de dados de vida (LDA) e ensaios acelerados de vida quantitativos (QALT), com auxílio dos *softwares* Weibull++ e ALTA. Foi também realizada análise de viabilidade econômica (LCC) e análise de riscos com a recuperação das laterais, que permitiram concluir que a recuperação de trincas em laterais fabricadas após o ano 2000 é viável, ao contrário da recuperação de laterais fabricadas antes desta data.

**Palavras-chave:** Lateral de truque. Trinca. Confiabilidade. Análise de dados de vida (LDA). Ensaio acelerados de vida quantitativos (QALT).

## ABSTRACT

ALMEIDA, Leandro Prates Ferreira de. **Accelerated fatigue tests to study the remaining average life of truck side frames.** 2019. 78 pages. Monography (Specialization in Reliability Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

This work involves the definition of methodology and application of accelerated fatigue tests for truck side frames, aiming to compare the remaining average life of new and recovered sides frames (after the detection of cracks at the critical regions), in order to generate data to help the decision on whether to implement this process. Failure data obtained from the fatigue life tests were analyzed using the life data analysis (LDA) and the quantitative accelerated life tests (QALT) methodologies, with the aid of Weibull++ and ALTA softwares. Economic feasibility analysis (LCC) and risk analysis about the recovering of the side frames were also carried out, which lead to the conclusion that the recovery of cracked side frames which were manufactured after the 2000 year is feasible, but is not feasible for the side frames manufactured before this date.

**Keywords:** Side frame. Crack. Reliability. Life data analysis (LDA). Quantitative accelerated life tests (QALT).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Desenho esquemático de um truque ferroviário com rodeiros montados..	14
Figura 1.2 – Lateral ferroviária e suas partes.....	15
Figura 1.3 – Divisão da lateral em zonas de criticidade.....	15
Figura 1.4 – Lateral ferroviária com pedestal quebrado.....	16
Figura 2.1 – Tabela de composição química de aços fundidos.....	21
Figura 2.2 – Faixa de dureza Brinnell de laterais de truques ferroviários.....	22
Figura 2.3 – Propriedades mecânicas para aços de laterais de truques ferroviários.....	23
Figura 2.4 – Análise de dureza de laterais recuperadas.....	24
Figura 2.5 – Perfis de microdureza de laterais recuperadas.....	24
Figura 2.6 – Gráfico do intervalo de tensão residual de tração (MPa) esperada para as laterais.....	25
Figura 2.7 – Modo de aplicação de cargas vertical, transversal e torção.....	27
Figura 2.8 – Ciclos de carregamento para ensaios dinâmicos de laterais.....	27
Figura 3.1 – Metodologias da engenharia da confiabilidade.....	30
Figura 3.2 – Tipos de dados em LDA.....	32
Figura 3.3 – Principais distribuições de vida.....	33
Figura 3.4 – Variação da forma da curva <i>pdf</i> de acordo com valor de $\beta$ .....	35
Figura 3.5 – Variação da distribuição da curva <i>pdf</i> de acordo com valor de $\eta$ .....	35
Figura 3.6 – Deslocamento da curva <i>pdf</i> de acordo com valor de $\gamma$ .....	36
Figura 3.7 – Extrapolação de dados.....	42
Figura 3.8 – Comportamento do fator de estressamento ( $n$ ) na IPL.....	44
Figura 3.9 – Desenho esquemático de um fluxo de caixa.....	46
Figura 4.1 – Célula de ensaios com aplicação das 3 cargas (a) e apoios com rolamento, utilizados nos ensaios (b) .....	52
Figura 4.2 – Aplicação de extensômetro nas regiões do pedestal (a), da bolsa de molas (b) e do quadro da lateral (c) .....	53
Figura 4.3 – Trincas no pedestal detectadas por ensaio de PM e confirmadas com LP – lateral Tipo 1, carga vertical de 80,3 toneladas (a), lateral Tipo 2, carga vertical de 68 toneladas (b) .....	54

Figura 4.4 – Quebra na região do quadro – lateral Tipo 1, carga vertical de 80,3 toneladas (a) e trincas observadas na região próxima à bolsa de molas – lateral Tipo 3, carga vertical de 68 toneladas (b) .....	55
Figura 4.5 – Gráficos de contorno para as laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b), para os ensaios com cargas verticais de 68 tf e 80,3 tf .....	57
Figura 4.6 – Análise de distribuições e ranqueamento no <i>software</i> ALTA.....	58
Figura 4.7 – Inserção dos dados dos ensaios das laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b) no <i>software</i> ALTA.....	58
Figura 4.8 – Relatório de resultados – análise dos ensaios acelerados das laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b) .....	59
Figura 4.9 – Curvas da probabilidade de falha vs. quantidade de ciclos para as laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b) sob cargas verticais de 50 tf (uso normal), 68 tf e 80,3 tf .....	59
Figura 4.10 – Vida média remanescente das laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b) .....	60
Figura 4.11 – Inserção dos dados dos ensaios acelerados das laterais sob as cargas de 68 tf (a) e 80,3 tf (b) no <i>software</i> ALTA.....	62
Figura 4.12 – Relatório de resultados – análise dos ensaios acelerados das laterais sob as cargas de 68 tf (a) e 80,3 tf (b) .....	62
Figura 4.13 – Gráficos de contorno para as laterais tipo 1 e 2, considerando as cargas de 68 tf (a) e 80,3 tf (b).....	63
Figura 4.14 – Inserção dos parâmetros de $\beta$ e $\eta$ para a lateral tipo 3, sob as cargas de 68 tf (a) e 80,3 tf (b) .....	64
Figura 4.15 – Inserção dos dados simulados em Weibull <sup>++</sup> , para as laterais tipo 3, no <i>software</i> ALTA.....	64
Figura 4.16 – Relatório de resultados – análise da lateral tipo 3 sob carga de 50 tf.....	65
Figura 4.17 – Curvas da probabilidade de falha vs. quantidade de ciclos para a lateral tipo 3 sob cargas verticais de 50 tf (uso normal), 68 tf e 80,3 tf.....	65
Figura 4.18 – Vida média remanescente das laterais tipo 3.....	66
Figura 4.19 – Curvas de confiabilidade vs. Tempo, em ciclos (a), e <i>pdf</i> (b) para condição de uso.....	66
Figura 4.20 – Gráficos com as correlações de vida vs. estresse (a) e fator de aceleração vs. estresse (b) .....	67

## LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Resultados dos ensaios dinâmicos de fadiga nas laterais.....	56
Quadro 4.2 – Resultados dos ensaios dinâmicos de fadiga nas laterais.....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

AAR	<i>Association of American Railroads</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALTA	<i>Accelerated Life Test Analyzer</i>
CAE	Custo Anual Equivalente
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CE	Carbono Equivalente
CT	Custo Total
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
FV	<i>Future Value</i>
HALT	<i>Highly Accelerated Life Test</i>
HH	Homem-Hora
IPC	Índice de Preços ao Consumidor
IPL	<i>Inverse Power Law</i>
LAEDE	Laboratório de Acústica e Ensaios Dinâmicos e Estáticos
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LCC	<i>Life Cycle Cost</i>
LCCA	<i>Life Cycle Cost Analysis</i>
LDA	<i>Life Data Analysis</i>
LP	Líquido Penetrante
MIB	<i>Materials Institute of Brasil</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation</i>
MTTF	Mean Time to Failure
NBR	Norma Brasileira
NRCC	<i>National Research Council Canada</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
PM	Partícula Magnética
PV	<i>Present Value</i>
QALT	<i>Quantitative Accelerated Life Tests</i>
RRX	<i>Rank Regression on X</i>
RRY	<i>Rank Regression on Y</i>

TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TTAT	Tratamento Térmico de Alívio de Tensões
TTF	<i>Time to Failure</i>
URA	<i>Usage Rate Acceleration</i>
VAE	Valor Anual Equivalente
VPL	Valor Presente Líquido
ZTA	Zona Termicamente Afetada

## LISTA DE SÍMBOLOS

C – Carbono

Mn – Manganês

Si – Silício

Cr – Cromo

Mo – Molibdênio

V<sup>(1)</sup> – Vanádio

Ni – Níquel

Cu – Cobre

$\beta$  – Beta. Parâmetro de forma da *pdf* na distribuição de Weibull

$\eta$  – Eta. Parâmetro de escala da distribuição de Weibull, ou sua vida característica

$\gamma$  – Gamma. Parâmetro de localização da distribuição de Weibull (vida mínima)

$f(t)$  – Função densidade de probabilidade *pdf*

$R(t)$  – Confiabilidade até o tempo  $t$

$F(t)$  – Probabilidade acumulada de falha *cdf*, ou a “não confiabilidade”

$\lambda(t)$  – Taxa de falha no tempo  $t$

$R(t'|t)$  – Confiabilidade condicional

$R(t + t')$  – Confiabilidade até o tempo  $(t + t')$

$T_R$  – Vida confiável para a confiabilidade  $R$  desejada

$R(T)$  – Velocidade da reação na relação de Arrhenius

$A$  – Constante não térmica na relação de Arrhenius

$E_a$  – Energia de ativação na relação de Arrhenius

$K$  – Constante de Boltzman's na relação de Arrhenius

$T$  – Temperatura absoluta na relação de Arrhenius

$L(V)$  – Vida característica nas relações de vida vs. estresse

$V^{(2)}$  – Nível do estressamento nas relações de vida vs. estresse

$n$  – fator de estressamento na relação de potência inversa

$N$  – Número total de períodos de interesse, no cálculo do LCC

$i$  – Índice do período, no cálculo do LCC

$d$  – Taxa de desconto (%), no cálculo do LCC

$l$  – Taxa de juros (%), no cálculo de valor presente

$n$  – Período, no cálculo de valor presente

$FC_0$  – Fluxo de caixa na data zero

$FC_t$  – Fluxo de caixa no tempo  $t$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA .....	17
1.2	OBJETIVOS .....	18
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivos Específicos .....	18
1.3	JUSTIFICATIVA.....	18
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
<b>2</b>	<b>LATERAL FERROVIÁRIA .....</b>	<b>21</b>
2.1	RECUPERAÇÃO DE TRINCAS EM LATERAIS.....	23
2.2	ENSAIOS DE FADIGA EM LATERAIS FERROVIÁRIA.....	26
2.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	28
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>29</b>
3.1	CONFIABILIDADE.....	29
3.2	ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE .....	29
3.3	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA) .....	31
3.3.1	Distribuição de Weibull .....	33
3.3.2	Métodos de estimativas de parâmetros .....	37
3.4	ENSAIOS ACELERADOS DE VIDA .....	38
3.4.1	Testes qualitativos (HALT) .....	39
3.4.2	Testes quantitativos (QALT) .....	40
3.4.3	Formas de aceleração de testes .....	41
3.4.4	Relação vida vs. estressamento.....	41
3.5	CUSTO DO CICLO DE VIDA (LCC).....	44
3.5.1	Taxa mínima de atratividade (TMA).....	45
3.5.2	Fluxo de caixa .....	46
3.5.3	Valor presente e valor futuro .....	46
3.5.4	Período de retorno do capital investido (payback period).....	47
3.5.5	Valor presente líquido (VPL).....	47
3.5.6	Taxa interna de retorno (TIR) .....	48
3.5.7	Valor anual equivalente (VAE) e custo anual equivalente (CAE) .....	48
3.6	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	49
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>50</b>
4.1	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DOS ENSAIOS.....	50
4.2	EXECUÇÃO E RESULTADOS DOS ENSAIOS ACELERADOS.....	51
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS .....	56
4.4	ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA.....	68
4.5	ANÁLISE DE RISCOS COM A RECUPERAÇÃO.....	71
4.6	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	72
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>74</b>
<b>5.1</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>75</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>
-------------------------	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

A Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) é uma ferrovia brasileira com 905 quilômetros de extensão que conecta as cidades de Cariacica-ES, região metropolitana de Vitória-ES, e Belo Horizonte-MG. Segundo Barbosa (2017), são transportados na EFVM mais de 119 milhões de toneladas de minério de ferro por ano, além de produtos como: bobinas e placas de aço, soja, carvão, calcário, entre outros, representado aproximadamente 40% de toda carga ferroviária do país.

A EFVM pode ser classificada como uma ferrovia *Heavy Haul* (Barbosa, 2017), ou seja, ferrovia para transporte de cargas elevadas e em longas distâncias, como explica Gripp (2017), sendo essa uma característica comum às ferrovias brasileiras. O transporte ferroviário possui uma eficiência energética em média quatro vezes maior do que o rodoviário, segundo a *Association of American Railroads* – AAR (2017, *apud* GRIPP, 2017).

Silva *et al* (2011) definem que o material rodante ferroviário é todo veículo provido de rodas que se movimenta sobre os trilhos. Classificam as locomotivas como os materiais rodantes de tração, os equipamentos de manutenção de via permanente como carros automotores e os vagões como materiais rodantes de transporte. As características principais dos vagões projetados para operação em ferrovias *Heavy Haul* são (SILVA *et al*, 2011):

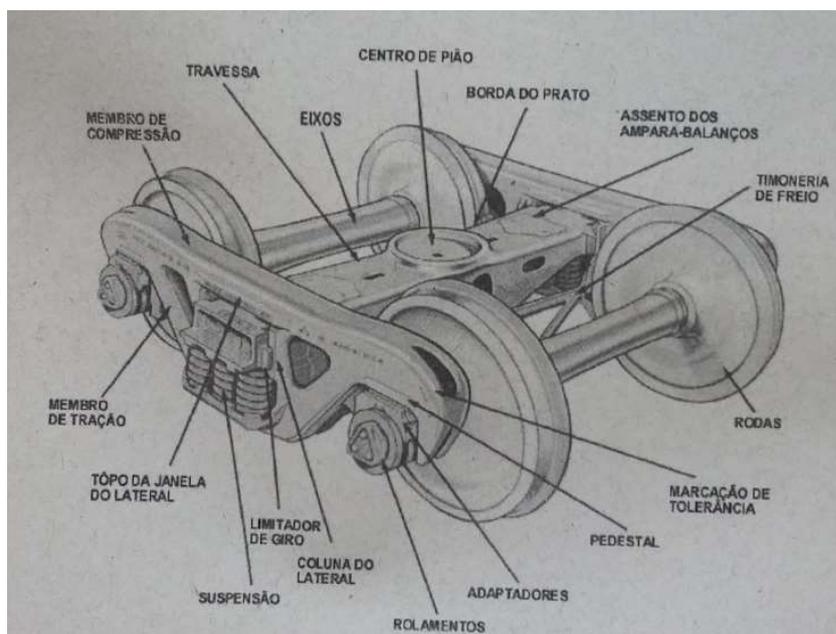
- Forças de tração e compressão nos engates centrais;
- Altas cargas por eixo (acima de 20 toneladas);
- Trens de grande comprimento (acima de 40 vagões);
- Velocidade baixa (em torno de 60 km/h).

Os vagões ferroviários são divididos nos seguintes subsistemas: superestrutura, choque e tração, freio, truques e rodeiros (GRIPP, 2017).

Truques ferroviários são os componentes cuja função é distribuir o peso do vagão para os trilhos, permitir sua movimentação sobre os mesmos, inscrevendo em curvas e amortecendo os impactos provenientes da via e do contato roda-trilho, evitando que estes impactos sejam transferidos totalmente para a estrutura da caixa do vagão. Esse amortecimento é feito através de seu sistema de molas e atrito entre

as superfícies (SILVA *et al*, 2011). A norma ABNT NBR 16440 (2015) define o truque ferroviário como o conjunto de três peças, geralmente fundidas, que recebe a estrutura do vagão e transmite as cargas para os rodeiros. Os truques utilizados nos vagões da EFVM são do modelo de três peças, sendo: 1 travessa e 2 laterais, além dos itens da suspensão, timoneria de freio e ampara-balanço, como pode ser visto na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Desenho esquemático de um truque ferroviário com rodeiros montados



Fonte: Silva *et al* (2011).

As laterais do truque são as vigas que recebem as cargas do vagão através da travessa e as transferem aos rodeiros. São ligadas pela travessa, acomodam as molas de suspensão e fixam os rodeiros pelos seus pedestais. Possuem também as corrediças, que servem de guia para o encaixe do triângulo de freio (SILVA *et al*, 2011). A Figura 1. 2 apresenta a imagem de uma lateral ferroviária e suas partes.

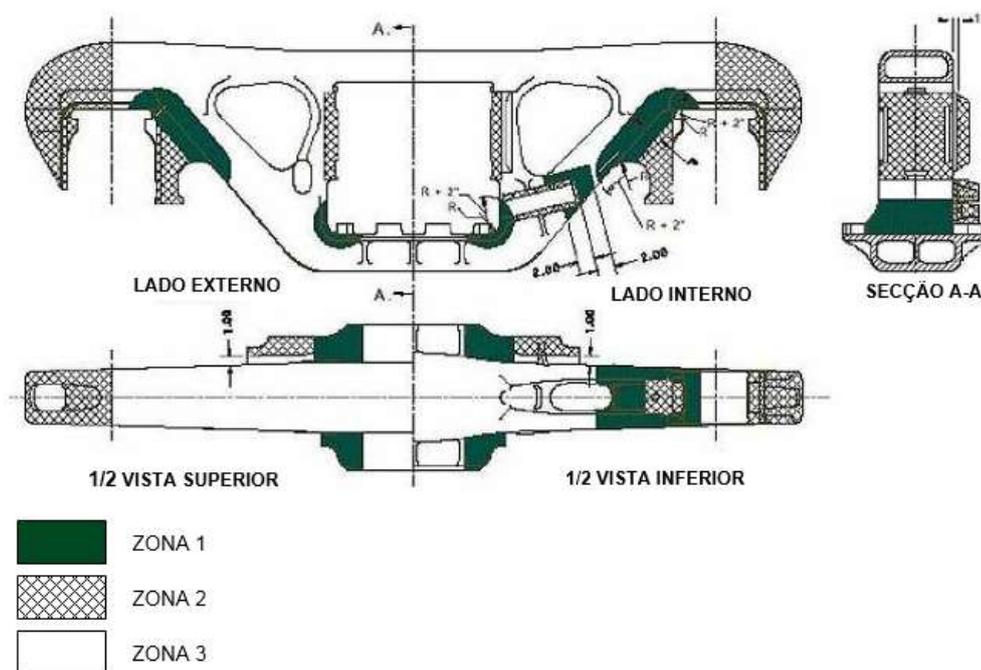
Figura 1.2 – Lateral ferroviária e suas partes



Fonte: Silva *et al* (2011).

O Manual Técnico de Vagões e Carros de Passageiros (2019) divide as laterais em três diferentes zonas, de acordo com a criticidade em relação à ocorrência de defeitos, principalmente trincas, como ilustrado na Figura 1.3. A zona 1 é a mais crítica, onde incidem as maiores tensões com os carregamentos, seguida pela 2 e por último a 3.

Figura 1.3 – Divisão da lateral em zonas de criticidade



Fonte: Altoé *et al* (2019).

Na prática ferroviária, as trincas geralmente ocorrem na região do pedestal das laterais. Quando ocorrem na zona 1, a nucleação acontece devido às tensões concentradas nesta região. Na zona 2, as trincas ocorrem geralmente a partir da região soldada, como indicam Almeida *et al* (2017).

A ocorrência de trincas nos pedestais, especialmente na zona crítica 1, pode provocar a quebra da lateral, conseqüentemente descarrilamento do vagão, conforme mostra a Figura 1.4 (LAMEF, 2006).

Figura 1.4 – Lateral ferroviária com pedestal quebrado



Fonte: LAMEF (2006).

Devido aos riscos de quebra da lateral, e conseqüente descarrilamento do vagão, as laterais ferroviárias são inspecionadas visualmente nos pátios de carregamento e descarregamento. Também sofrem inspeções pelo método de partículas magnéticas, sempre que os truques são desmontados para realização dos planos preventivos. Anualmente, cerca de 500 laterais de vagões da EFVM são identificadas com trinca na zona crítica 1. Em 2014, a equipe de manutenção de vagões desenvolveu um procedimento para recuperação de trincas na zona crítica 1, com a remoção da trinca e preenchimento com solda, conseguindo obter propriedades mecânicas e metalúrgicas na zona fundida e zona termicamente afetada similares às propriedades do metal base (ALMEIDA *et al*, 2017).

Com o desenvolvimento do procedimento de recuperação de trincas no pedestal, tornou-se possível reduzir os custos de manutenção de vagões, com a postergação do sucateamento de laterais que estariam em fim de vida. Faz-se necessário então determinar qual é a vida remanescente das laterais recuperadas, de modo que seja possível planejar adequadamente a renovação da frota e avaliar a viabilidade de realizar as recuperações.

## 1.1 PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA

Laterais ferroviárias são componentes dimensionados dentro dos conceitos de projeto de vida infinita, ou seja, espera-se que as tensões atuantes sejam menores que a tensão limite de fadiga do material. Há então nas ferrovias, de um modo geral, uma frota considerável de laterais de idade já elevada. No caso particular da EFVM, há uma grande quantidade de laterais fabricadas nas décadas de 1960 a 1980 e que continuam em operação.

Ocorre que as laterais estão sujeitas, especialmente na região do pedestal, a fatores concentradores de tensão, como: raios de adoçamento fechados, inclusões, vazios de fundição, etc., além de heterogeneidades na microestrutura do material, promovidas por soldagem inadequada de chapas de desgaste (formação de martensita não revenida) e altos impactos na operação (promovidos por calos e ovalização em rodas e defeitos da via), que podem favorecer a nucleação de trincas, especialmente na região crítica.

A elevada vida útil esperada para laterais, associada à falta ou perda de controles de manutenção das laterais fabricadas há mais de 20 anos, torna inviável a realização de um estudo baseado somente no monitoramento da vida útil destes componentes em campo.

A saída então é a realização de ensaios de fadiga em escala real, controlando as variáveis de modo que as falhas representem a realidade operacional (fadiga na região crítica 1), aumentando a degradação sob os conceitos da disciplina de Ensaios Acelerados de Vida.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Comparar a vida útil remanescente de laterais ferroviárias de diferentes modelos e estágios de vida, utilizando as técnicas de ensaios acelerados, a fim de avaliar a viabilidade da recuperação de trincas na região crítica 1.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a carga máxima que pode ser aplicada às laterais, sem que seja alterado o modo de falha típico de fadiga;
- Realizar ensaios de fadiga em laterais ferroviárias – escala real, com diferentes níveis de estresse;
- Comparar vida útil remanescente dos diferentes tipos de laterais estudados;
- Avaliar viabilidade financeira da recuperação de trincas em laterais e riscos envolvidos.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O custo de uma lateral ferroviária gira em torno de R\$7.000,00. Logo, há um potencial de redução imediata de R\$3.500.000,00 no ano, com a postergação de seu sucateamento.

Entretanto, sabe-se que quanto maior for o tempo de operação da lateral, maior será a probabilidade de ela apresentar danos acumulados de fadiga mecânica (provocada pelos carregamentos dos vagões e fatores dinâmicos inerentes à operação ferroviária) e térmica (tensões e deformações resultantes de ciclos térmicos, devido à soldagem de chapas de desgaste), além da possibilidade de apresentar heterogeneidades na microestrutura que podem favorecer a nucleação de trincas de fadiga.

Além disso, as laterais mais antigas (fabricadas antes de 2000) foram dimensionadas para menores cargas do que as praticadas atualmente.

Assim, é possível prever que a vida remanescente de laterais será maior para laterais novas ou fabricadas mais recentemente (após o ano 2000). Mas o quanto maior? Para se confirmar a suspeita inicial, e principalmente quantificar a diferença de vida remanescente, decidiu-se pela aplicação dos ensaios acelerados.

Essa informação permitirá avaliar se a recuperação é viável financeiramente. Além disso, é importante avaliar a necessidade de renovação da frota, baseada no risco da ferrovia e na capacidade da oficina em realizar as recuperações. Em tese, quanto mais laterais antigas e recuperadas existirem em operação, maior será a probabilidade de novas trincas aparecerem, aumentando também o risco de ocorrências ferroviárias em caso de não detecção. Ou ainda, terá a equipe de manutenção capacidade para recuperar todas novas trincas que aparecerem?

#### 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho se inicia com o estudo das normas aplicáveis para realização de ensaios de fadiga em laterais ferroviárias. Em seguida, deve-se determinar qual a maior carga que pode ser aplicada nas laterais, para acelerar a degradação das mesmas, porém sem alterar o modo de falha por fadiga. Conhecendo a maior carga possível de ser aplicada, é possível estabelecer o protocolo de ensaios acelerados.

O passo seguinte é a realização dos ensaios nos diferentes tipos de laterais que se deseja comparar a vida útil: laterais fabricadas antes de 2000 e com trincas recuperadas na região crítica 1; laterais fabricadas após 2000 e com trincas recuperadas na região crítica 1; laterais novas, ainda não colocadas em operação.

Os dados dos ensaios devem ser analisados nos *softwares* Weibull++ e ALTA, da Reliasoft, a fim de determinar as curvas de função probabilidade de falha (*pdf*) dos diferentes modelos de laterais estudados e comparar sua vida útil remanescente.

Com os dados de vida útil remanescente das laterais, deve-se analisar a viabilidade econômica de recuperá-las e os riscos envolvidos.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 deste trabalho contém os elementos pré-textuais, com a apresentação do tema e uma breve introdução, além das premissas e justificativa para realização do estudo.

O capítulo 2 abordará mais detalhadamente o objeto de pesquisa, sua aplicação na ferrovia, normas de referência e desenvolvimento do procedimento de recuperação de trincas.

No capítulo 3 será apresentado o referencial teórico da engenharia de confiabilidade aplicável ao trabalho: análise de vida, ensaios acelerados e análise do custo do ciclo de vida (LCC).

O capítulo 4 fará a ligação entre o referencial teórico (capítulo 3) com o tema da pesquisa (capítulo 2) e apresentará o desenvolvimento e resultados obtidos no estudo e as análises das curvas de confiabilidade, assim como as análises de custo do ciclo de vida remanescente das laterais.

O capítulo 5 resumirá os resultados obtidos no trabalho e apresentará as devidas conclusões quanto à aplicação ou não de recuperação de trincas nos diferentes modelos de laterais.

## 2 LATERAL FERROVIÁRIA

Laterais ferroviárias são fabricadas com aço fundido grau B ou B+ da norma AAR M-201, que são aços normalizados ou normalizados e revenidos e cuja composição química é especificada na Figura 2.1 (AAR M-201, 2005).

Figura 2.1 – Tabela de composição química de aços fundidos

### 6.0 CHEMICAL PROPERTIES AND TESTS

#### 6.1 Chemical Composition

The steel analysis shall meet the following:

	Grades A, B, and B+	Grades C, D, and E
Carbon, maximum percentage	0.32	0.32
Manganese, maximum percentage	0.90	1.85
Phosphorus, maximum percentage	0.04	0.04
Sulfur, maximum percentage	0.04	0.04
Silicon, maximum percentage	1.50	1.50

Fonte: AAR M-201 (2005).

A norma AAR M-201 (2005) determina ainda que o valor de carbono equivalente (CE) máximo permitido para aços grau B e B+ é de 0,72, calculado de acordo com a fórmula abaixo (% em peso dos elementos de liga):

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (2.1)$$

Onde:

C = carbono;

Mn = manganês;

Si = silício;

Cr = cromo;

Mo = molibdênio;

V = vanádio;

Ni = níquel;

Cu = cobre.

Quanto maior o valor do carbono equivalente, pior é a sua soldabilidade, pois aumenta a probabilidade de se obter uma estrutura martensítica não revenida. Um aço com  $CE > 0,60$  já pode ser considerado como de má soldabilidade (INFOSOLDA, 2019). Ainda de acordo com INFOSOLDA (2019): “Um carbono equivalente elevado não é indicador de que o aço não é soldável mas sim de que são necessários cuidados cada vez maiores”, a fim de evitar principalmente trincas a frio induzidas por hidrogênio, como por exemplo: realização de pré-aquecimento, controle da temperatura interpasse, utilização de consumível com baixo teor de hidrogênio, pós-aquecimento, tratamento térmico de alívio de tensões (após a soldagem), etc.

A norma AAR M-201 (2005), orienta sobre recuperação de defeitos em componentes fundidos durante o processo de fabricação (não há recomendação para recuperação de laterais em operação): é necessário pré-aquecimento quando a temperatura ambiente estiver abaixo de  $40\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e a temperatura de pré-aquecimento não deve superar  $600\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $315,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), para evitar empeno. Além disso, a norma determina que as propriedades mecânicas na região recuperada devem atender aos requisitos do material original, que são especificados nas Figuras 2.2 e 2.3.

Figura 2.2 – Faixa de dureza Brinnell de laterais de truques ferroviários

<b>Material Grade Identification</b>	<b>BHN Range</b>
Grade A	108–160
Grades B and B+	137–228
Grade C	179–241
Grade D	211–285
Grade E	241–311

Fonte: adaptado de AAR M-201 (2005).

Figura 2.3 – Propriedades mecânicas para aços de laterais de truques ferroviários

	Grade A		Grade B	Grade B+	Grade C	Grade D	Grade E
	Unannealed	Annealed or Normalized					
Tensile strength (ksi)	60	60	70	80	90	105	120
Yield point (ksi)	30	30	38	50	60	85	100
Elongation in 2 in. (percentage)	22	26	24	24	22	17	14
Reduction of area (percentage)	30	38	36	36	45	35	30

Fonte: adaptado de AAR M-201 (2005).

As laterais ferroviárias existentes na frota da EFVM são fabricadas tanto com aço grau B (laterais para classe de rolamento 6" x 11", dimensionadas para suportar cargas por eixo de até 25 t), quanto com aço grau B+ (laterais para classe de rolamento 6.1/2" x 9", dimensionadas, no caso da EFVM, para suportar cargas por eixo de até 27,5 t). Todas laterais 6" x 11" existentes na EFVM foram fabricadas antes de 2000, assim como todas 6.1/2" x 9" foram fabricadas após 2000.

Diante das considerações de norma e modelos de laterais existentes na EFVM, foi necessário desenvolver procedimento específico para recuperação de trincas na zona crítica das laterais, de modo que as propriedades mecânicas e metalúrgicas na região de solda e na zona termicamente afetada (ZTA) fossem similares às do metal base.

## 2.1 RECUPERAÇÃO DE TRINCAS EM LATERAIS

O processo de recuperação de trincas na região do pedestal de laterais ferroviárias foi desenvolvido em 2014, a partir de avaliações nos processos de soldagem e realização de ensaios de macrografia, micrografia e dureza, utilizando-se de corpos de prova com cordões de solda em materiais similares aos aços grau B e B+ da norma AAR M-201 (2005).

O estudo concluiu que as recuperações deveriam ser realizadas com pré-aquecimento a uma temperatura igual ou maior que 250 °C, pois assim foi possível obter uma microestrutura com grãos refinados de perlita e ferrita, além de durezas compatíveis com a do material original, características associadas a menores

tensões internas e, conseqüentemente, menor propensão a trincas por fadiga (ÉTICA, 2014).

Foram adotadas as recomendações do relatório, incluindo o controle de resfriamento das laterais após soldagem, com utilização de mantas térmicas. Foi realizada a recuperação de laterais por mão de obra interna e por empresa terceirizada contratada, ainda em caráter de teste. As laterais foram analisadas em laboratório especializado e os resultados de dureza e perfil de microdureza podem ser consultados nas Figuras 2.4 e 2.5 (MIB, 2015). Como pode ser observado, as laterais recuperadas internamente apresentaram melhores resultados, com dureza da região de solda similar à do metal base e dentro do especificado pela norma AAR M-201 (2005). As laterais recuperadas externamente foram reprovadas tecnicamente.

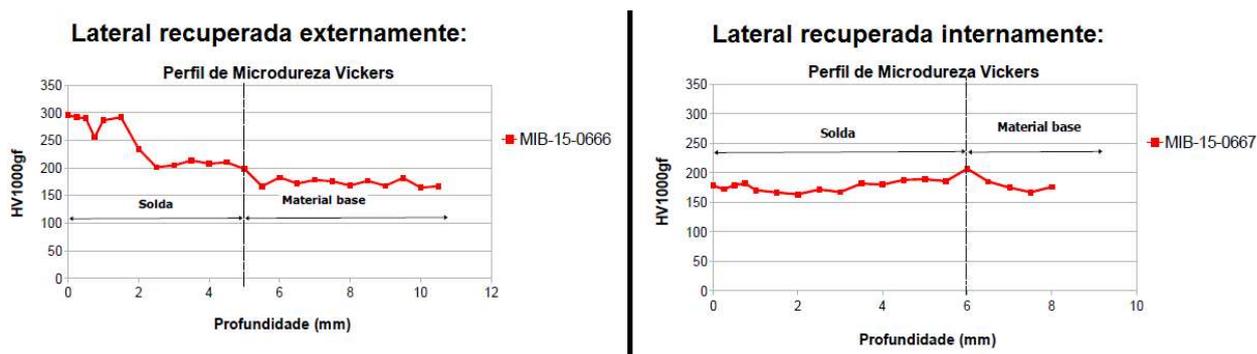
Figura 2.4 – Análise de dureza de laterais recuperadas

Amostra	Região	Tipo	Medidas					Média	Média (HB)
Lateral recuperada externamente	Material base	HRB	83	84	82	83	82	82,8	159
	Solda	HV	281	288	319	241	233	272	258
Lateral recuperada internamente	Material base	HRB	81	81	82	82	81	81,4	154
	Solda	HV	177	172	169	185	176	176	176

62%  
14%

Fonte: adaptado de MIB (2015).

Figura 2.5 – Perfis de microdureza de laterais recuperadas

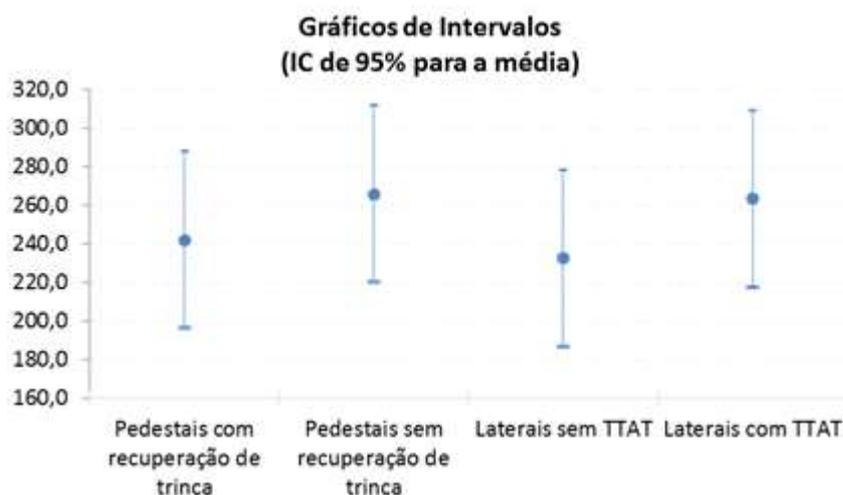


Fonte: adaptado de MIB (2015).

Quanto à microestrutura, nenhuma das amostras apresentou martensita não revenida, o que seria indesejável (ambas apresentaram uma microestrutura refinada de ferrita e perlita na zona fundida). A amostra retirada da lateral recuperada externamente ainda apresentou um defeito na região soldada.

Em 2017 foi realizado ainda um estudo para avaliar a necessidade de realização de tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) posterior à soldagem. Os resultados obtidos indicam que não houve diferença significativa nas tensões residuais de tração (prejudiciais à fadiga) medidas nas laterais com e sem TTAT. Além disso, foi detectada descarbonetação superficial nas laterais tratadas termicamente (LACTEC, 2016). Logo, concluiu-se que não deve ser realizado TTAT após a recuperação, pois além de não trazer benefícios quanto às tensões residuais das peças, traz o prejuízo da descarbonetação superficial, que reduziria a vida em fadiga das laterais (ALMEIDA *et al*, 2017). A Figura 2.6 apresenta os resultados de tensão residual, indicando que não houve diferença significativa também quando se comparam laterais com e sem recuperação de trinca.

Figura 2.6 – Gráfico do intervalo de tensão residual de tração (MPa) esperada para as laterais



Fonte: Almeida *et al* (2017).

Os resultados das análises em laboratório indicam que o procedimento de recuperação de trincas desenvolvido está adequado, baseando-se nos critérios de dureza, microestrutura e tensão residual da região recuperada. Inclusive, o procedimento interno gerou melhores resultados do que o procedimento utilizado em recuperação externa.

É necessário então estudar a expectativa de vida remanescente dessas laterais, a fim de avaliar a viabilidade de sua recuperação. Para isso, deve-se primeiro definir protocolo de ensaios de fadiga, com base nas normas vigentes.

## 2.2 ENSAIOS DE FADIGA EM LATERAIS FERROVIÁRIA

A norma AAR M-203 (2005) estabelece os critérios para aprovação das laterais ferroviárias quando submetidas a testes dinâmicos (ensaios de fadiga), para certificação pela norma. Quatro laterais, escolhidas aleatoriamente de um lote de 25, devem ser testadas e a nenhuma lateral pode trincar com menos de 50.000 ciclos de carga vertical, caso das laterais de grau B, ou 75.000 ciclos – laterais de grau B<sup>+</sup>. O valor médio de ciclos até a ocorrência de trinca deve ser de no mínimo 100.000 e 125.000 ciclos verticais para laterais de grau B e B<sup>+</sup>, respectivamente.

As cargas devem ser aplicadas em 3 sentidos:

- Vertical: aplicação de carga na região da bolsa de molas, nos valores de 56,7 tf e 68 tf, para laterais modelos 6" x 11" e 6.1/2" x 9", respectivamente. Mínimo de 50 carregamentos por minuto;
- Transversal: aplicação de carga nas bordas das colunas, próximo à região de contato com a travessa, nos valores de 7,5 tf e 8,9 tf, para laterais modelos 6" x 11" e 6.1/2" x 9", respectivamente. Mínimo de 100 carregamentos por minuto;
- Torção central: aplicação de carga na região central da lateral, gerando um momento torsor. Carga deve ser aplicada na extremidade de uma alavanca de 39 polegadas de comprimento, nos valores de 4,8 tf e 5,8 tf, para laterais modelos 6" x 11" e 6.1/2" x 9", respectivamente. Mínimo de 50 carregamentos por minuto.

As figuras 2.7 e 2.8 apresentam desenhos esquemáticos do modo de aplicação das cargas vertical, transversal e de torção, além dos ciclos de carregamento ao longo do tempo (AAR M-203, 2005).

Figura 2.7 – Modo de aplicação de cargas vertical, transversal e torção

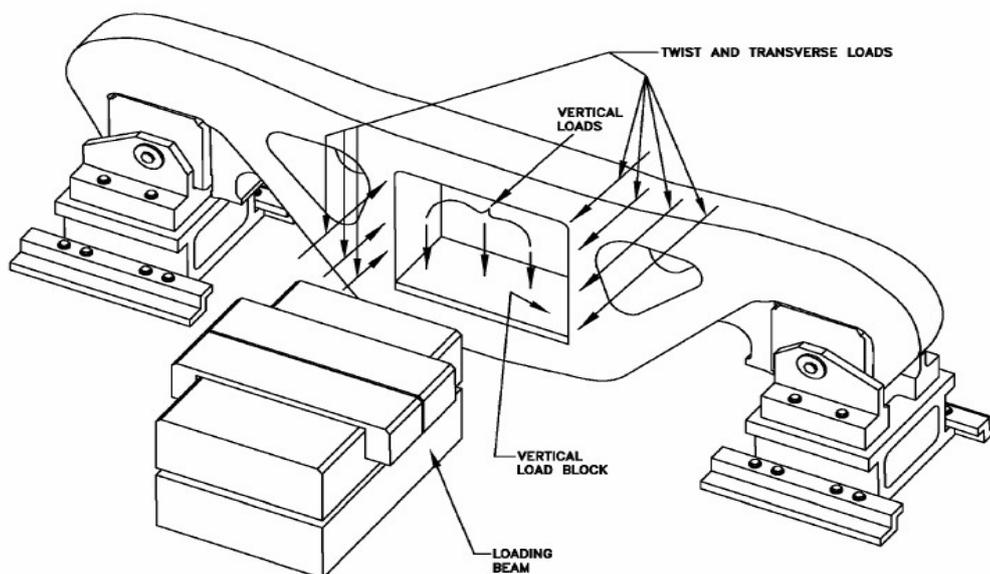


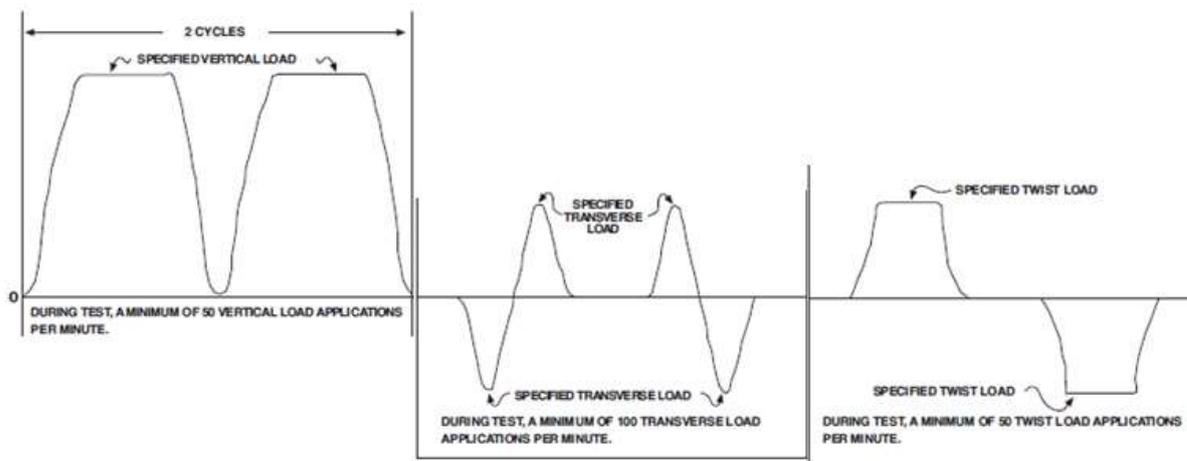
Fig. 6.1 Method of applying vertical, twist, and transverse loads to side frames

S [M-203] 70

10/2010

Fonte: AAR M-203 (2005).

Figura 2.8 – Ciclos de carregamento para ensaios dinâmicos de laterais



Fonte: adaptado de AAR M-203 (2005).

Como pode ser observado, a norma AAR M-203 (2005) define as frequências mínimas de aplicação de carga. Caso o equipamento tenha capacidade, a aplicação pode ocorrer a uma frequência maior que o estabelecido.

## 2.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a especificação técnica das laterais ferroviárias, o procedimento de recuperação de trincas e a especificação dos ensaios dinâmicos de fadiga em laterais, conforme indica a norma AAR.

É importante conhecer o contexto de recuperação das laterais para entender o histórico de desenvolvimento da atividade e da elaboração do protocolo de ensaios de fadiga, para que seja possível uma conexão com os objetivos do estudo em questão.

No próximo capítulo será apresentado o referencial teórico da engenharia de confiabilidade e como ela será aplicada na análise de resultados dos estudos de fadiga em laterais ferroviárias.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 CONFIABILIDADE

Segundo a norma ABNT NBR 5462 (1994), confiabilidade é “a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições específicas, durante um dado intervalo de tempo”. Ou seja, é a probabilidade de um item desempenhar sua função primária e/ou secundária sem falhar, por um intervalo de tempo qualquer e sob condições de uso determinadas.

Se a confiabilidade é uma probabilidade, ela assume valores entre 0 e 1 (BARBOSA, 2017).

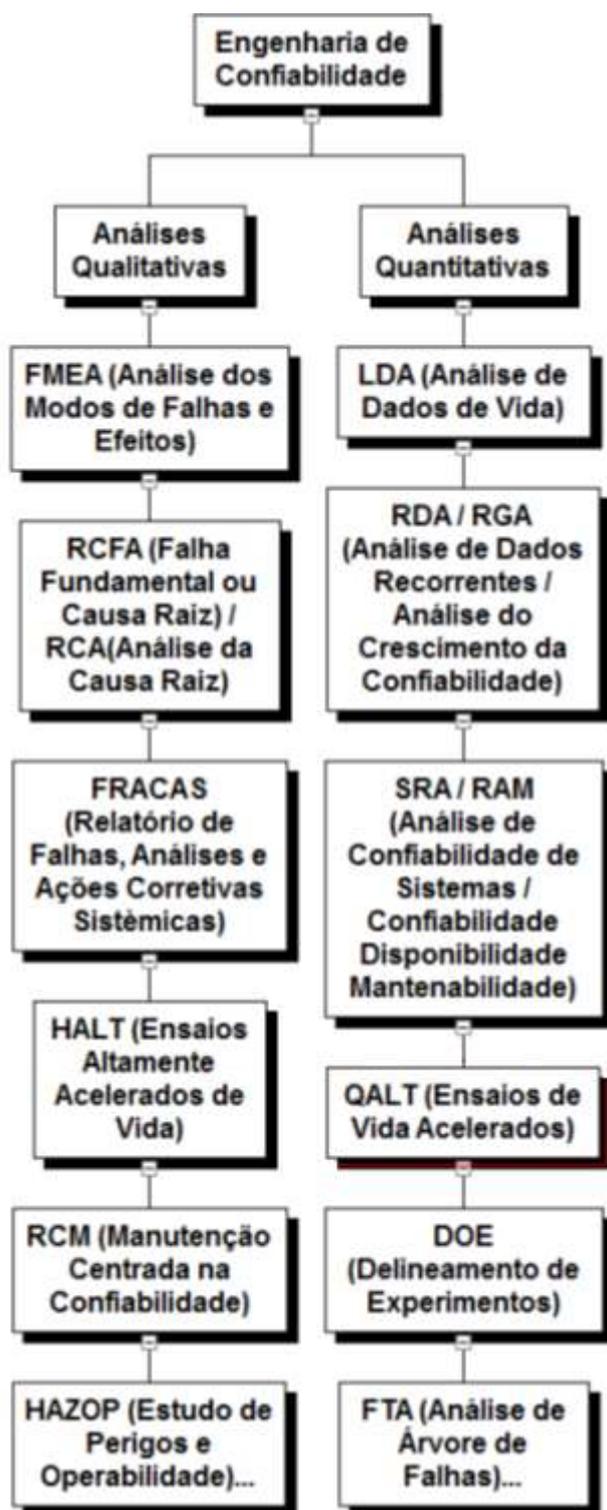
Por sua vez, falha é definida como o término da capacidade de um item desempenhar sua função requerida (ABNT NBR 5462, 1994). Para o caso das laterais ferroviárias, a principal forma de isso acontecer é com a ocorrência de trincas de fadiga, podendo ocorrer a fratura da lateral. Este pode ser considerado então seu principal modo de falha.

#### 3.2 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

As definições de engenharia de confiabilidade encontradas na literatura são as mais diversas possíveis: a engenharia que enfatiza a confiabilidade no gerenciamento de ciclo de vida de um produto (ADESIDA, 2019); o conjunto de princípios e práticas associados a requisitos de confiabilidade (como predição de falhas) e sua transformação em especificações incorporadas ao design de produtos e à produção (BUSINESS DICTIONARY, 2019) ou a aplicação sistemática de princípios e técnicas de engenharia consagrados durante a vida útil de um produto, portanto essencial para um bom gerenciamento do ciclo de vida deste produto (PRENSCIA, 2019).

Já para Mazzei (2014, *apud* KISHIMOTO, 2015), a engenharia de confiabilidade é “o ramo da engenharia voltado para o estudo da confiabilidade de sistemas de forma geral, durante seu ciclo de vida”. Ela envolve diversas análises e ferramentas (qualitativas e quantitativas), como mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1 – Metodologias da engenharia da confiabilidade



Fonte: adaptado de Mazzei (2014, *apud* KISHIMOTO, 2015).

No presente trabalho, as metodologias a serem aplicadas serão as seguintes análises quantitativas: LDA (*Life Data Analysis* ou Análise de Dados de Vida), QALT

(*Quantitative Accelerated Life Tests* ou Ensaaios de Vida Acelerados) e LCC (*Life Cycle Cost* ou Custos do Ciclo de Vida).

### 3.3 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA)

A análise de dados de vida (LDA) trata do estudo e modelagem dos dados de vida útil observados para os produtos ou equipamentos. Os dados de vida podem ser o tempo que o produto operou com sucesso ou o tempo que o produto operou até falhar. A vida pode ser medida em horas, milhas, ciclos ou qualquer métrica com a qual a vida ou exposição do produto possa ser medida (MAZZEI, 2018(a)).

Na análise de dados da vida são feitas previsões sobre a vida de todos os produtos na população, a partir do ajuste de uma distribuição estatística aos dados de vida de uma amostra representativa de unidades. A distribuição parametrizada para o conjunto de dados pode então ser usada para estimar características importantes da vida do produto, como confiabilidade ou probabilidade de falha em um tempo específico, a vida média e a taxa de falha (PRENSCIA, 2019).

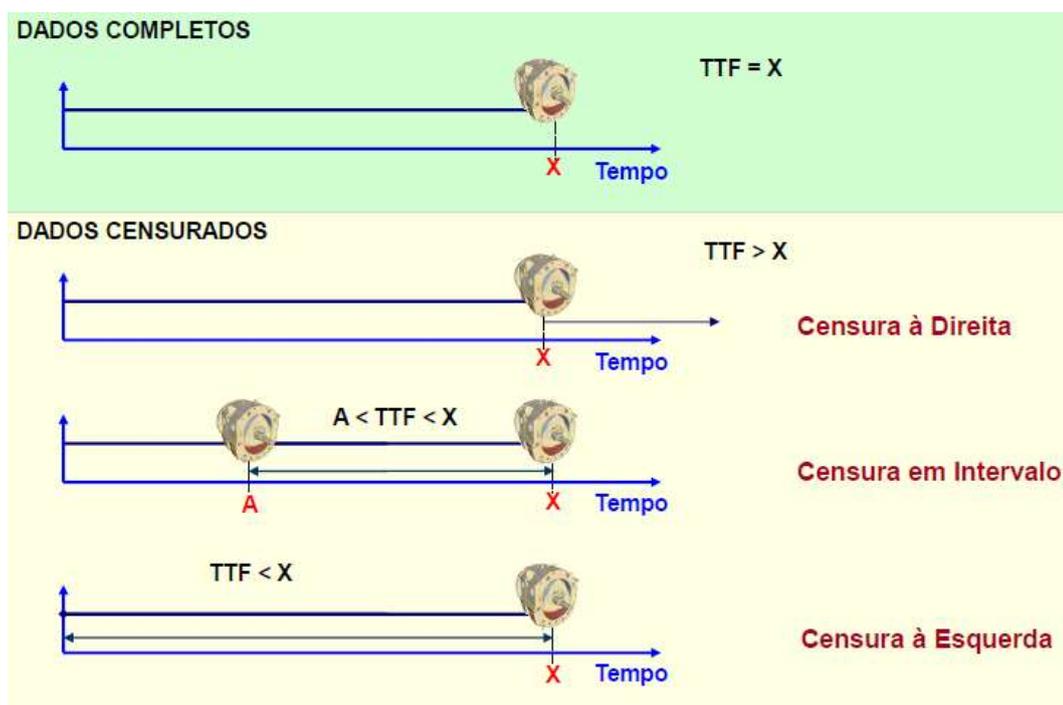
De acordo com Mazzei (2018(a)), existem dois tipos de dados em LDA: completos e censurados. Dados completos são aqueles em que a vida do ativo é controlada desde o início de sua operação até sua falha, ou seja, é possível determinar com precisão a duração completa da vida do equipamento até a falha (TTF – *Time to Failure*). Já os dados censurados podem ser:

- Censurados à direita: são também conhecidos por dados em suspensão. São aqueles em que é possível saber somente que o TTF é maior que um determinado tempo 'X' de observação do equipamento. Pode ser um dado de um equipamento que ainda não falhou (e o início de operação é conhecido) ou um equipamento que falhou após um determinado período de observação, mas cujo início de operação não é conhecido (observação iniciada com o equipamento já em operação);
- Censurados em intervalo: é conhecido uma duração 'A' mínima em que se sabe que o equipamento operou sem falhar (geralmente através de uma inspeção anterior) e é conhecido um tempo 'X' em que se sabe que o equipamento já estava em falha. Ou seja, não se conhece exatamente a duração até a falha, mas sabe-se que o TTF está entre 'A' e 'X';

- Censurados à esquerda: na primeira observação do produto (período de tempo 'X'), detecta que já estava em falha. Ou seja, não se conhece a duração exata da vida, mas sabe-se que é menor que o tempo 'X'.

A Figura 3.2 ilustra de forma resumida os tipos de dados de vida (MAZZEI, 2018(a)).

Figura 3.2 – Tipos de dados em LDA



Fonte: Mazzei (2018(a)).

Santana (2016) explica que as funções de confiabilidade são modelos que estimam a taxa de falha de um equipamento em função do tempo e sua probabilidade de falha para uma certa idade, ou um dado período de tempo. Os modelos são baseados em distribuições estatísticas, ou distribuições de vida.

Macedo (2018) comenta que “A distribuição de probabilidade de vida pode ser também chamada de distribuição de vida ou de função densidade de probabilidade *pdf* (*Probability Density Function*)”. A *pdf* de  $X$  é a função  $f(X)$  para dois valores  $a$  e  $b$ , sendo  $a < b$  (MAZZEI, 2018(a)):

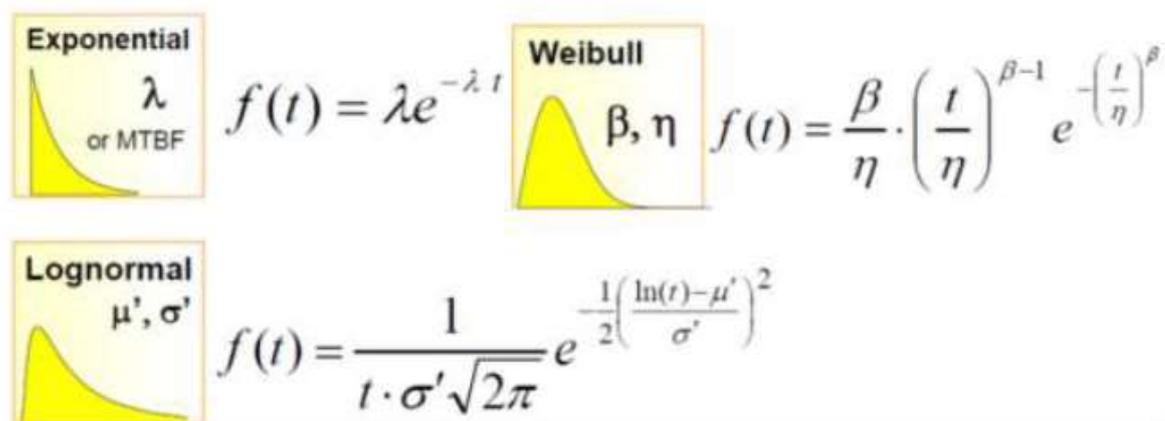
$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad (3.1)$$

Ainda de acordo com Mazzei (2018(a)), a função distribuição acumulada (*cdf*) fornece a probabilidade acumulada diretamente e até o  $X$  desejado:

$$F(a) = P(X \leq a) = \int_{0, -\infty}^a f(X) dX \quad (3.2)$$

As principais distribuições de vida são apresentadas na Figura 3.3 (SPANÓ, 2019).

Figura 3.3 – Principais distribuições de vida



Fonte: adaptado de Spanó (2019).

Para o atual trabalho, será dada ênfase à distribuição de Weibull, que é uma distribuição estatística que se aplica à grande maioria dos casos, para os diferentes modos de falha.

### 3.3.1 Distribuição de Weibull

É a mais utilizada em estudos de confiabilidade, por ser muito flexível. É considerada uma proposta geral para a análise de confiabilidade. Pode ter taxa de falha crescente, constante ou decrescente (MAZZEI, 2018(a)). A distribuição de Weibull permite a análise de falhas em todas fases de vida de um equipamento (RIGONI, 2013).

A distribuição de Weibull tem 3 possíveis parâmetros (MAZZEI, 2018(a)):

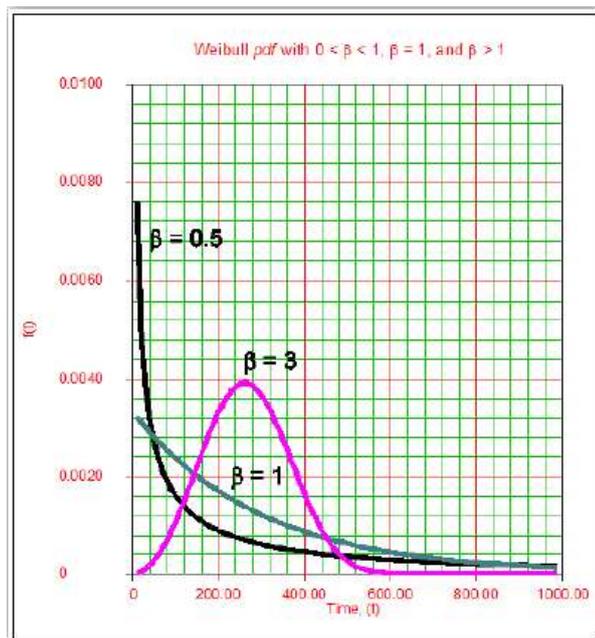
- $\beta$  (Beta): parâmetro de forma da *pdf* (ou inclinação da *cdf*) da distribuição. Para  $\beta < 1$ , a taxa de falhas é decrescente (falhas prematuras); Para  $\beta = 1$ , a taxa de falhas é constante (falhas aleatórias); Para  $\beta > 1$ , a

taxa de falhas é crescente (falhas por degradação: desgaste, fadiga, corrosão ou fluência). Rigoni e Mariano (2016) definem  $\beta$  como o parâmetro que dá a aparência da distribuição e explicam que é pouco provável que assuma valores menores que 0,2 ou maiores que 10, apesar de, na teoria, seja possível assumir valores entre zero e infinito. Para  $\beta$  entre 3 e 4, tem-se uma distribuição normal, sendo que para  $\beta = 3,44$ , a distribuição é normal simétrica (MACEDO, 2018);

- $\eta$  (Eta): parâmetro de escala da distribuição, ou sua vida característica. O valor de  $\eta$  representa a duração (em anos, quilômetros, ciclos, etc.) na qual se estima que a quantidade de falhas acumulada será de 63,2%. Rigoni (2013) explica que neste ponto  $\eta = (x - \gamma)$ ;
- $\gamma$  (Gamma): parâmetro de localização, também conhecido por vida mínima (deslocamento no eixo X da *pdf*). Até a duração  $\gamma$ , a confiabilidade é de 100%. Para um  $\gamma$  positivo, necessariamente as falhas ocorrem por degradação. Se  $\gamma$  for negativo, o ativo já inicia a operação (tempo zero) com confiabilidade inferior a 100%. Pode ocorrer devido ao método utilizado para registrar o tempo ou por modo de falha que ocorre devido ao transporte, degradação do item no estoque, erro de fabricação, entre outros (MAZZEI, 2018(a)).

A Figura 3.4 apresenta a forma característica da curva *pdf*, de acordo com os valores de  $\beta$ . É possível notar a distribuição próxima da normal para um valor de  $\beta$  igual a 3, a função exponencial negativa para  $\beta$  menor que 1 e a mortalidade infantil para  $\beta$  menor que 1 (SUCENA, 2008).

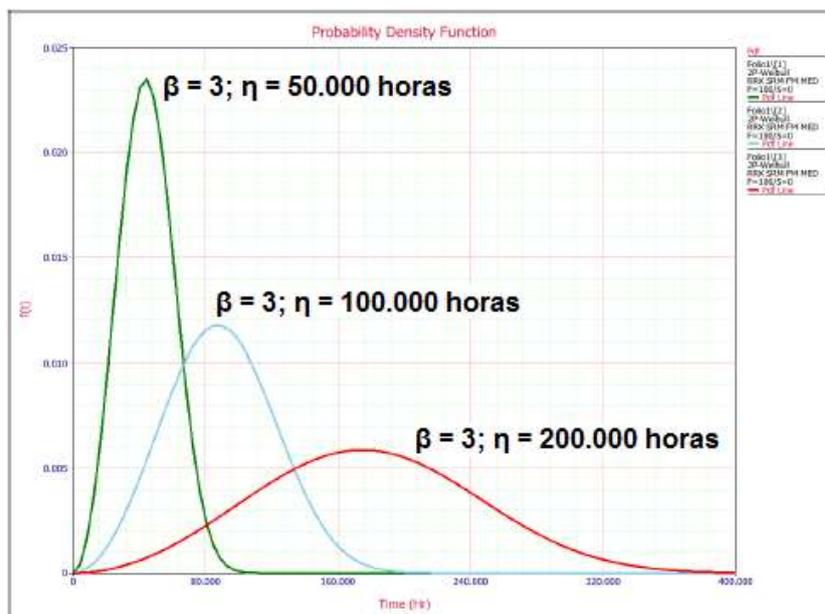
Figura 3.4 – Variação da forma da curva *pdf* de acordo com valor de  $\beta$



Fonte: Mazzei (2018(a)).

Já na Figura 3.5 podem ser observadas as distribuições características da curva *pdf* de acordo com os valores de  $\eta$ . Conforme explica Tavares (2005), “uma variação no parâmetro da escala,  $\eta$ , tem o mesmo efeito na distribuição que uma mudança de escala na abscissa”. Ou seja, para maiores valores de  $\eta$ , mantendo  $\beta$  constante, maior a dispersão da curva *pdf*.

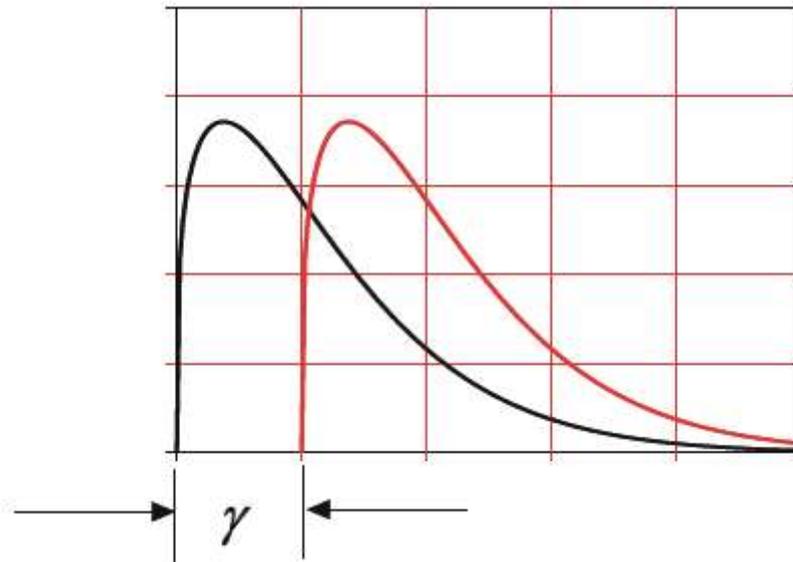
Figura 3.5 – Variação da distribuição da curva *pdf* de acordo com valor de  $\eta$



Fonte: adaptado de Mazzei (2018(a)).

A Figura 3.6 ilustra o deslocamento da curva *pdf* no eixo X, de acordo com o valor de  $\gamma$  (MAZZEI, 2018(a)).

Figura 3.6 – Deslocamento da curva *pdf* de acordo com valor de  $\gamma$



Fonte: Mazzei (2018(a)).

Macedo (2018) explica que a distribuição de Weibull se adequa muito bem a diferentes comportamentos de vida e apresenta as equações que descrevem as estatísticas obtidas a partir de sua *pdf* de 3 parâmetros:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (3.3)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (3.4)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (3.5)$$

$$MTTF = \gamma + \eta \Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (3.6)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (3.7)$$

$$R(t'|t) = \frac{R(t+t')}{R(t)} = e^{-\left( \left( \frac{t+t'-\gamma}{\eta} \right)^\beta - \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right)} \quad (3.8)$$

$$Vida BX = 1 - (T_R) = 1 - \left( \gamma + \eta(\ln(R))^{1/\beta} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

$f(t)$  é a função densidade de probabilidade *pdf*;

$R(t)$  é a confiabilidade até o tempo  $t$ ;

$F(t)$  é a probabilidade acumulada de falha *cdf*, ou a “não confiabilidade”;

MTTF (*mean time to failure*) é o tempo médio até a primeira falha;

$\lambda(t)$  é a taxa de falha no tempo  $t$ ;

$R(t'|t)$  é a confiabilidade condicional – conforme explica Mazzei (2018(a)), é a probabilidade do item sobreviver a uma nova missão incremental de duração  $t'$ , dado que já operou sem falha por um tempo  $t$ ;

$R(t+t')$  é a confiabilidade até o tempo  $(t+t')$ . Assim, como probabilidades são sempre valores entre 0 e 1, considerando a divisão de  $R(t+t')$  por  $R(t)$ , sempre o valor de  $R(t'|t)$  será maior ou igual a  $R(t+t')$ ;

$T_R$  é a vida confiável para a confiabilidade  $R$  desejada;

Vida  $BX$  é o percentil ou tempo no qual se espera que  $X\%$  dos itens falhem.

### 3.3.2 Métodos de estimativas de parâmetros

Mazzei (2018(a)) comenta que há dois métodos de estimativas de parâmetros comumente utilizados. O método de plotagem de probabilidades é o mais simples e usa as técnicas dos mínimos quadrados ou regressão linear. É um

método gráfico que se utiliza da plotagem de dados em um gráfico e permite a linearização da *cdf* da distribuição.

Já o método da máxima verossimilhança (MLE) é o mais complexo, matematicamente falando. Ele consiste em “estimar os parâmetros de um modelo utilizando as estimativas que tornam máximo o valor da função de verossimilhança” (BATISTA, 2009). Este método encontra um determinado valor  $X$ , que é o mais verossímil, tendo em vista os dados à mão. Não necessariamente  $X$  é o valor mais provável, mas sim aquele cuja probabilidade de gerar os dados conhecidos é máxima (ASSUNÇÃO, 2013).

Mazzei (2018(a)) explica ainda que o método MLE pode enviesar o que está sendo calculado (subestimar ou superestimar). Assim, sugere regras práticas para a escolha dos métodos de análise:

- Método de plotagem de probabilidades – regressão linear em  $X$  ou  $Y$  (RRX ou RRY): utilizar quando se tem dados completos e pequenas amostragens;
- Método da máxima verossimilhança (MLE): utilizar quando se tem dados misturados (completos e censurados), dados agrupados e grandes amostragens.

### 3.4 ENSAIOS ACELERADOS DE VIDA

Os ensaios acelerados utilizam diferentes métodos para diminuir a vida útil de um produto, acelerando sua degradação (NELSON, 2004).

A norma ABNT NBR 5462 (1994) define ensaios acelerados de vida como:

Ensaio no qual os níveis das solicitações aplicados são escolhidos de modo a exceder aqueles especificados nas condições de referência, a fim de reduzir o tempo necessário para se observar a reação do item, ou para ampliar esta reação durante um intervalo de tempo. Para ser válido, o ensaio acelerado não deve alterar os modos de falhas básicos e os mecanismos de falhas ou suas prevalências relativas.

Já para Branco Filho (2006, *apud* KISHIMOTO, 2015), a definição é:

Ensaio no qual o nível de solicitações aplicadas no item ultrapassa o nível das condições de referência, para reduzir a duração necessária, visando observar as respostas do item à estas solicitações ou acentuar estas respostas dentro de um período de testes desejado. É usada quando não se pode aguardar o tempo necessário, dentro de condições de uso normais.

Ou seja, a utilização de ensaios acelerados para estimativa de vida de laterais ferroviárias é muito útil, pois sua vida esperada em condições normais de operação é muito extensa. Assim, como explica Macedo (2018), na prática a coleta de dados de vida é muito difícil e muitas vezes não ocorrem, até por desconhecimento da importância dos conceitos de engenharia de confiabilidade, ou são coletados dados não confiáveis (erros de apropriação).

Deve-se, porém, garantir que as falhas decorrentes dos ensaios acelerados de vida ocorram por fadiga, pois este é o principal modo de falha para o sucateamento das laterais. Felix (2006) explica que, em ensaios acelerados, deve-se tomar cuidado na escolha do fator de aceleração, de forma a reduzir o período para ocorrência de um modo de falha específico, evitando a ocorrência de outro modo de falha que não seja objeto do estudo.

Para desenvolvimento de produto, o tempo entre a fase de projeto e liberação para produção é geralmente curto e inviabiliza a utilização de LDA (em condições normais de uso) para se obter a confiabilidade. Sendo assim, a utilização de ensaios acelerados de vida é altamente recomendável (MACEDO, 2018).

Existem dois tipos básicos de ensaios acelerados de vida: qualitativos e quantitativos (SPANÓ, 2019), e eles são apresentados a seguir.

#### 3.4.1 Testes qualitativos (HALT)

Os testes qualitativos (HALT) visam “identificar os maiores modos de falhas e mecanismos de um produto”. Inicialmente, são utilizados para descobrir os modos de falha possíveis e realizar melhorias de modo a eliminar possíveis defeitos inerentes do produto (NETO, 2014).

Segundo Spanó (2019), “são delineados para estressar produtos com o objetivo de se obter somente informações sobre a falha (ou modo de falha)”. Sasseron e Abackerli (2005) explicam que os ensaios qualitativos fornecem

resultado para averiguar se o produto atingiu ou não um desempenho pré-determinado.

Spanó (2019) cita alguns dos nomes diversos utilizados para estes ensaios: teste de tortura, teste do elefante, *shake & bake tests*, entre outros. Sasseron e Abackerli (2005) lembram outros, como por exemplo: *burn-in*, teste limite, experimento de projeto robusto e *environmental stress screening*. A nomenclatura mais utilizada é HALT (*Highly Accelerated Life Test*).

Geralmente se utiliza uma pequena amostra, submetida a condições muito severas (por exemplo, altos níveis de estressamento). Os resultados obtidos são (SPANÓ, 2019):

- Se o item sobrevive, ele está aprovado pelo teste (passa - não passa);
- Os modos de falha, inicialmente ocultos, são revelados, permitindo assim sua pesquisa e correção;
- Pode-se então aumentar a confiabilidade do produto pela revelação da falha oculta.

Entretanto, dados provenientes de testes qualitativos não podem ser utilizados para estimar a confiabilidade do produto, nem se pode afirmar que serão os mesmos modos de falha observados no uso normal (SPANÓ, 2019).

### 3.4.2 Testes quantitativos (QALT)

Testes quantitativos “são delineados para fornecer informações sobre a confiabilidade do produto, componente ou sistema, através da obtenção de dados durante os ensaios acelerados”. Nestes tipos de ensaios, é necessário produzir falhas e correlacioná-las às condições de uso (SPANÓ, 2019).

Neto (2014) explica que o principal objetivo ao realizar testes acelerados quantitativos é obter a “predição do tempo de vida de um produto”. Macedo (2018) explica que em ensaios acelerados de vida QALT o “parâmetro de locação Gamma é raramente utilizado e por questões práticas pode ser considerado igual a 0”.

Antes de iniciar os ensaios, deve ser elaborado um plano de teste, de modo a “estabelecer meios planejados e organizados para acelerar a falha do produto”. É durante este planejamento que os principais parâmetros do ensaio acelerado são determinados, incluindo: níveis de estresse, tamanho e número de amostras, modo de falha esperado, entre outros (PAPA *et al*, 2007).

### 3.4.3 Formas de aceleração de testes

As formas de aceleração geralmente utilizadas em teste acelerados são listadas a seguir:

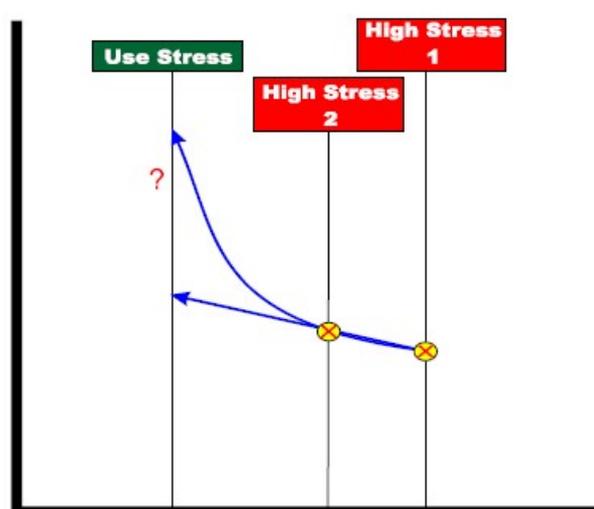
- Aceleração por uso contínuo (URA – Usage Rate Acceleration): forma mais fácil e comum de se utilizar ensaios acelerados (SPANÓ, 2019), considera o uso contínuo como forma de estressamento, associado à redução do tempo de descanso, caracterizando o uso em condições diferentes das normais (KISHIMOTO, 2015). Os dados obtidos pela aceleração do uso podem ser analisados por LDA (MACEDO, 2018). Essa forma de aceleração é pouco útil para casos em que os equipamentos possuem altas taxas de utilização;
- Aceleração pelo aumento do nível de estresse: elevam-se um ou mais fatores de estressamento (carga, temperatura, tensão elétrica, vibração, umidade, etc.) para acelerar o mecanismo de falha que se deseja estudar. Não se deve determinar níveis de estressamento que promovam modos de falha que não ocorreriam em condições normais de uso (SPANÓ, 2019). Apesar de ser menos comum, é possível abaixar os níveis de estresse nesses tipos de ensaio (KISHIMOTO, 2015). A certeza na extrapolação diminui com o aumento da distância entre os níveis de estressamento e a condição normal de uso (SPANÓ, 2019), portanto o estresse deve ser alto o suficiente para acelerar a falha até um tempo adequado para a análise, porém baixo o suficiente para manter o mesmo modo de falha, com a menor incerteza possível.

### 3.4.4 Relação vida vs. estressamento

As análises dos resultados de testes acelerados consistem em determinar a distribuição de vida adequada (por exemplo, Weibull) e na seleção de modelos que descrevam o comportamento das características da distribuição escolhida, de acordo com os diferentes níveis de estresse (relação vida vs. estressamento). Na adequação do modelo, quantos mais pontos forem determinados, maior será a precisão da relação vida vs. estressamento. Conforme indica a Figura 3.7, quando

se tem dados somente em duas condições de maior estresse (quantidade mínima necessária), não se pode determinar com precisão o “caminho” da extrapolação para a condição de uso (SPANÓ, 2019). Além disso, em um experimento real, muitas vezes não se consegue manter exato o valor da variável de estresse durante todo o ensaio, fazendo com que o estresse efetivamente aplicado não seja exatamente igual ao nominal determinado, o que acaba gerando incertezas na extrapolação (ABACKERLI *et al*, 2007).

Figura 3.7 – Extrapolação de dados



Fonte: Spanó (2019).

A característica de vida apresentada extrapolada pode ser qualquer parâmetro da distribuição (média, mediana,  $\eta$ , etc.). Para uma distribuição de vida Weibull, por exemplo, o parâmetro de forma ( $\beta$ ) geralmente é assumido como constante e o parâmetro de escala ( $\eta$ ) é modelado. Este parâmetro determina o comportamento da taxa de falha, do qual se espera similaridade entre as observações do teste e as condições de uso, porém com diferentes tempos até falha, desde que o teste seja bem planejado e conduzido (SPANÓ, 2019).

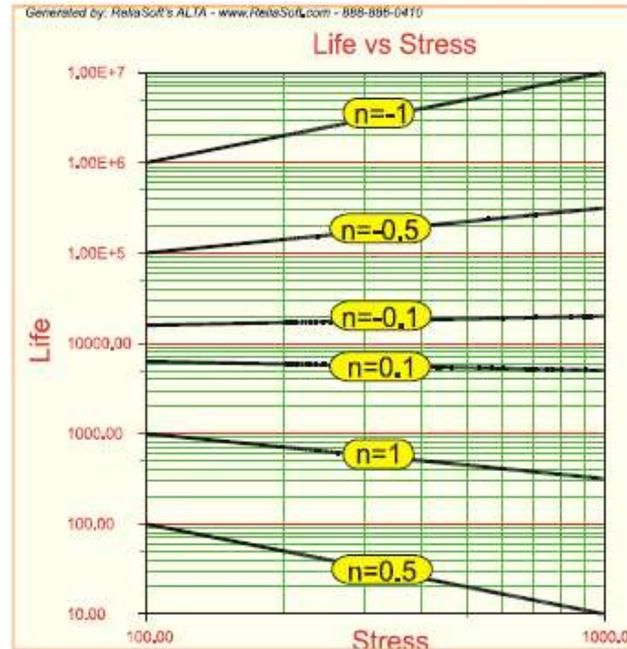
Freitas e Colosimo (1997) relacionam o tempo até falha (resposta) com a variável de estresse, segundo o modelo: Tempo =  $f$ (estresse) + erro, sendo que geralmente  $f$  é uma função com tendência decrescente, podendo ter diferentes formas, como por exemplo: Tempo = (estresse)<sup>-3</sup> ou Tempo = exp(-estresse).

Na prática, modelos químicos ou físicos são utilizados para correlacionar estresse e vida, sendo que os mais utilizados em ensaios acelerados quantitativos são (KISHIMOTO, 2015):

- Relação de Arrhenius: geralmente utilizada quando a temperatura é o fator de estressamento. A relação original determina que  $R(T) = A.e^{-(E_a/K.T)}$ , onde: R é a velocidade da reação, A é a constante não térmica,  $E_a$  é a energia de ativação, K é a constante de Boltzman's e T é a temperatura absoluta (K) (SPANÓ, 2019). Kishimoto (2015) explica que: “Equivalente ao efeito da temperatura sobre uma reação, num ensaio acelerado (QALT), a energia de ativação pode nos informar o efeito da temperatura sobre dados de vida”. Spanó (2019) indica que, em ensaios acelerados, a relação de Arrhenius pode ser generalizada por  $L(V) = C.e^{B/V}$ , ou seja, para um determinado estressamento (V), a vida característica (L(V)), estará em função dele, de acordo com uma relação exponencial inversamente proporcional à taxa de reação do processo;
- Relação de Eyring: geralmente utilizada quando temperatura ou umidade são os fatores de estressamento dos testes. Muito similar à relação de Arrhenius, sua formulação ( $L(V) = 1/V.e^{-(A-B/V)}$ ) difere desta última apenas no termo 1/V (SPANÓ, 2019);
- Relação de Potência Inversa: geralmente utilizada para fatores de estressamento físicos, e não térmicos (SPANÓ, 2019). Macedo (2018) explica que sua formulação é:  $L(V) = 1 / (K.V^n)$ , onde L(V) é uma medida de vida quantificável (média, mediana ou vida característica), V é o nível do estressamento (tensão e corrente elétricas, carga, pressão, etc.) em valores unitários e positivos, K é uma constante e n é o fator de estressamento.

A Figura 3.8 ilustra o comportamento do fator de estressamento (n) para a Relação de Potência Inversa (Inverse Power Law – IPL).

Figura 3.8 – Comportamento do fator de estressamento ( $n$ ) na IPL



Fonte: Spanó (2019).

Observa-se que para  $n > 0$ , o estressamento reduz a vida  $L(V)$ . Quanto maior o  $n$ , maior a redução de vida. Para  $n = 0$ , não há qualquer interferência na vida. Para  $n < 0$ , o estressamento aumenta a vida  $L(V)$ . Quanto mais negativo for o valor de  $n$ , maior será o acréscimo de vida (MACEDO, 2018).

Sobre os três modelos apresentados para correlacionar vida e estresse, Kishimoto (2015) menciona que:

Em resumo, em estressamentos constantes podemos usar o Arrhenius para estresse de temperatura. Eyring para temperatura, umidade e salinidade. Potência Inversa para potências, vibração, tensão mecânica, tensão elétrica, rotação, pressão, cargas, fadiga, entre outros. Também a combinação de relações pode ser outra solução.

### 3.5 CUSTO DO CICLO DE VIDA (LCC)

O custo do ciclo de vida (LCC - life cycle cost) de um ativo é o somatório dos seus custos com: projeto (idealização, engenharia detalhada, construção e instalação), utilização (operação e manutenção) e substituição ao final da vida do ativo (SKF, 2019). A LCCA (*Life Cycle Cost Analysis*) é o processo de avaliação econômica do custo total de um ativo, considerando também descontos praticados e

outros custos efetivados durante a vida útil do ativo, além dos outros custos já citados. Ela pode ser utilizada como ferramenta de apoio à tomada de decisão de engenheiros e gestores, para seleção das melhores alternativas, baseadas em custo, para manutenção, renovação e projetos de investimento (NRCC-46774, 2004 *apud* MAZZEI, 2018).

A fórmula geral do custo do ciclo de vida (LCC) de um ativo ou sistema, que se refere a um determinado período de interesse, é fornecida pela apostila de LCCA do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade (MAZZEI, 2018(b)):

$$LCC = \sum_{i=0}^N [CT_i / (1 + d)^i] \quad (3.10)$$

Onde:

LCC = custo do ciclo de vida em valor presente (R\$, US\$, etc.);

CT = custo total no período  $i$  (ano, mês, etc.);

N = número total de períodos de interesse;

$i$  = índice do período;

$d$  = taxa de desconto (%).

O entendimento dos conceitos de TMA, fluxo de caixa, valor presente e futuro, entre outros, faz-se necessário para a realização de uma adequada análise de custo do ciclo de vida de um ativo.

### 3.5.1 Taxa mínima de atratividade (TMA)

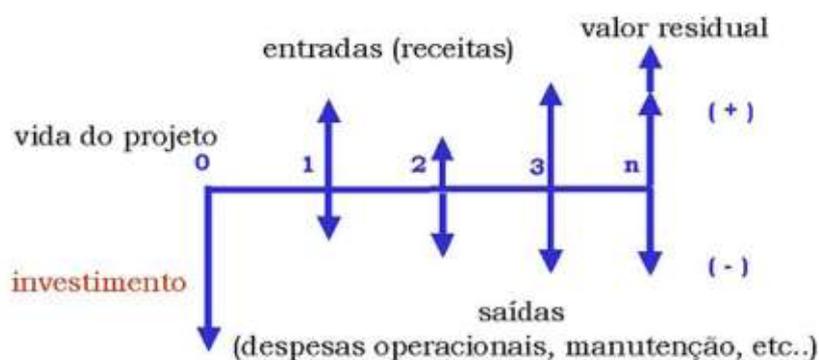
É a “a menor taxa de juros considerada atraente por um aplicador”, segundo Faustini (2011). De acordo com Mazzei (2018(b)), também pode ser “o máximo que uma pessoa se propõe a pagar quando faz um financiamento”.

Almeida (2012) menciona que, a longo prazo, a empresa determina sua TMA de acordo com metas estratégicas. Mazzei (2018(b)) explica que cada investidor define sua TMA, não existindo qualquer fórmula matemática para calculá-la. Inclusive, pode variar com o tempo, dependendo do custo de oportunidade, do risco e da liquidez do negócio.

### 3.5.2 Fluxo de caixa

“É a representação linear da série de pagamentos (saídas) e/ou recebimentos (entradas) em espécie que estão previstos ocorrerem no tempo de operação do projeto” (MAZZEI, 2018(b)), como mostra a Figura 3.9.

Figura 3.9 – Desenho esquemático de um fluxo de caixa



Fonte: Mazzei (2018(b)).

O fluxo de caixa é uma ferramenta útil para controlar a movimentação financeira de uma empresa ou investidor, dado um determinado período (SIGNIFICADOS, 2019).

### 3.5.3 Valor presente e valor futuro

Valor presente é o valor no início do fluxo de caixa (data zero). Geralmente, trata-se do investimento realizado, em valores monetários. Pode sofrer variação, em espécie, em um período futuro, dependendo dos juros correntes nesse período. Valor futuro é o “valor equivalente após a data zero quando incididos do juro a ser aplicado no valor presente (atual) ocorrido no prazo de interesse”. As avaliações financeiras devem ser feitas na data atual (data zero) (MAZZEI, 2018(b)).

De forma resumida, pode-se afirmar que “receber uma quantia hoje, equivale a receber uma quantia maior amanhã (valor futuro)”, ou ainda que “receber uma quantia amanhã, equivale a receber uma quantia menor hoje (valor presente)” (FAZACONTA, 2019).

Os valores presente e futuro são correlacionados pelas equações 3.11 e 3.12, para capitalizações simples e compostas, respectivamente (MAZZEI, 2018(b)):

$$FV = PV(1 + i \times n) \quad (3.11)$$

$$FV = PV(1 + i)^n \quad (3.12)$$

Onde:

FV = valor futuro;

PV = valor presente;

$i$  = taxa de juros;

$n$  = período.

#### 3.5.4 Período de retorno do capital investido (*payback period*)

É o tempo necessário para que as receitas futuras geradas pelo capital investido se igualem ao valor do investimento inicial (FAUSTINI, 2011).

São divididos em dois tipos: *payback* simples, que ignora a taxa de juros ou a TMA, e o *payback* descontado, que considera essas taxas (MAZZEI, 2018(b)).

#### 3.5.5 Valor presente líquido (VPL)

É uma função utilizada para analisar se um investimento é viável financeiramente. Define-se como a soma dos valores presentes do fluxo de caixa (entradas e saídas), calculados de acordo com a TMA e em um período de tempo determinado (TOBIAS, 2011 *apud* ALMEIDA, 2012).

O projeto será atrativo se o VPL for positivo, pois significa que houve retorno sobre os recursos aplicados (amortização mais juros), de acordo com a TMA, e ainda há um ganho adicional. Mas se o VPL for negativo, o projeto não será atrativo, já que os gastos, em valores presentes, superam os ganhos. Para um VPL nulo, diz-se que tem atratividade mínima, ou seja, não faz diferença investir no projeto ou

aplicar numa instituição com taxa de retorno igual à TMA escolhida (FAUSTINI, 2011).

### 3.5.6 Taxa interna de retorno (TIR)

Pela definição de Stieler (2019), “é a taxa que zera o VPL. Em outras palavras, a TIR representa a taxa máxima que o projeto aguenta antes de se tornar negativo”.

Já Mazzei (2018(b)) explica que a TIR “equaliza o valor presente de 1 ou mais pagamentos (saídas) com o valor presente de 1 ou mais recebimentos (entradas) considerando a saída na data zero (inicial)”. A TIR deve satisfazer a equação 3.13.

$$FC_0 = \sum_{t=1}^n \left( \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} \right) \quad (3.13)$$

Onde:

$FC_0$  = fluxo de caixa na data zero;

$FC_t$  = fluxo de caixa no tempo  $t$ .

A facilidade de interpretar seu resultado (percentual de rentabilidade do projeto que está sendo analisado) faz com que a TIR seja muito utilizada em análises de viabilidade econômica de investimentos (PRATES, 2019). Se  $TIR > TMA$ , o projeto é atrativo; se  $TIR = TMA$ , o projeto tem retorno econômico, mas é indiferente ao que se espera pela empresa ou investidor; se  $TIR < TMA$ , o projeto é economicamente inviável (MAZZEI, 2018(b)).

### 3.5.7 Valor anual equivalente (VAE) e custo anual equivalente (CAE)

O VAE é “o valor constante que representa a receita que determinado fluxo de caixa pode oferecer periodicamente”. O CAE é “o valor constante que representa o custo que determinado fluxo de caixa pode oferecer periodicamente”, ou seja, é o

VAE com valores negativos (MAZZEI, 2018(b)). Logo, a formulação para VAE e CAE é a mesma, mudando apenas o nome do indicador:

$$\frac{VAE}{CAE} = VPL \cdot \frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1} \quad (3.14)$$

### 3.6 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os conceitos de confiabilidade e engenharia de confiabilidade, além das metodologias para análise de dados de vida (LDA), realização de ensaios acelerados e análise do custo do ciclo de vida do ativo.

O conhecimento destes conceitos e metodologias é fundamental para o objetivo fim deste estudo, que é utilizar de ferramentas estatísticas da engenharia de confiabilidade para auxiliar na tomada de decisão sobre a continuidade ou não da recuperação de trincas em laterais de truques ferroviários.

No próximo capítulo serão apresentados o desenvolvimento do estudo, desde o planejamento da realização dos ensaios acelerados até os resultados obtidos e avaliações de viabilidade de implantação da recuperação de trincas por solda em laterais ferroviárias.

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DOS ENSAIOS

Antes de definir os parâmetros dos ensaios, foram listados os tipos de laterais que seriam testadas, com o objetivo de avaliar comparativamente as falhas (surgimento de trincas) em laterais de vagões, sob condições padronizadas, permitindo a análise de viabilidade de recuperação em detrimento da compra de laterais novas:

- Lateral tipo 1: modelo para truque 6" x 11", fabricadas antes do ano 2000 e com recuperação de trinca na zona crítica 1 do pedestal;
- Lateral tipo 2: modelo para truque 6.1/2" x 9", fabricadas após o ano 2000 e com recuperação de trinca na zona crítica 1 do pedestal;
- Lateral tipo 3: modelo para truque 6.1/2" x 9", peças novas (sem uso).

O protocolo de testes foi baseado na norma AAR, seção M-203 (2005), conforme indica o capítulo 2.2 deste trabalho.

Como o objetivo do estudo era comparar a vida remanescente dos diferentes tipos de laterais – e não apenas determinar se atenderiam a um possível teste de certificação – foram feitas para este trabalho alterações em relação ao protocolo de testes da norma AAR, de maneira que fosse possível acelerar a ocorrência das falhas, garantindo que o modo de falha por fadiga fosse mantido. Para isso, determinou-se que os testes deveriam ser realizados com maiores cargas do que as determinadas por norma.

A fim de determinar as cargas que deveriam ser utilizadas nos ensaios, foi realizada uma avaliação estrutural pelo método de elementos finitos, com aplicação de cargas nas posições determinadas pela norma AAR M-203 (2005), para estipular a máxima carga que poderia ser utilizada nos ensaios para que o surgimento de trincas por fadiga continuasse como o modo de falha das laterais. Como referência, determinou-se que a tensão observada deveria ser menor que o limite de escoamento do material. As cargas transversais e para torção deveriam manter a proporção em relação à carga vertical (13% e 8,5%, respectivamente).

Na simulação, os apoios nos pedestais das laterais foram tratados de modo a permitir o livre movimento da região do pedestal durante as aplicações das cargas, simulando o apoio sobre os rolamentos dos rodeiros, que ocorre na prática. O resultado da simulação indicou que a maior carga vertical possível para o ensaio era de 80,3 toneladas. As cargas transversais e de torção ficaram em 10,4 t e 6,8 t, respectivamente (LAEDE, 2019). Definiu-se então que estas seriam as cargas aplicadas para a condição de maior nível de estressamento dos ensaios. Como condição intermediária, foi definida a aplicação das cargas indicadas pela norma AAR M-203 (2005) – 68 t, 8,9 t e 5,8 t.

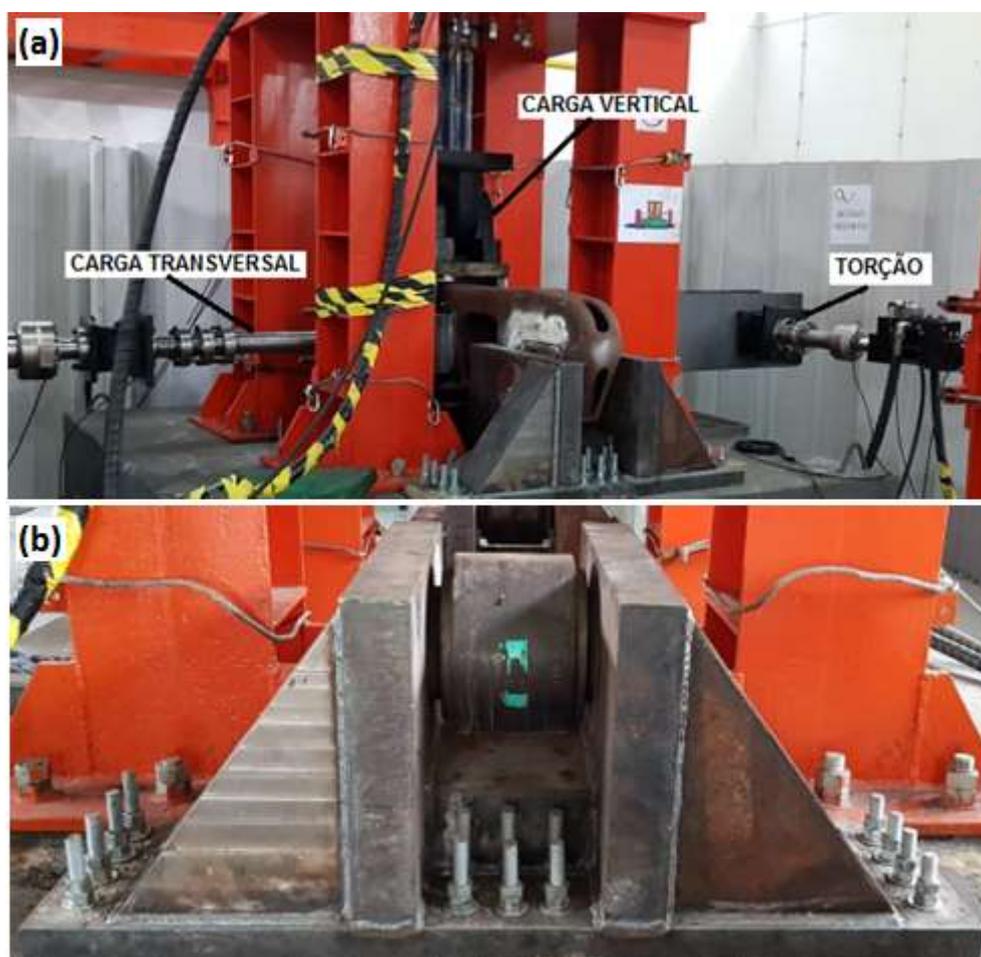
O peso bruto médio dos vagões de minério da EFVM, quando carregados, fica em aproximadamente 100 t, ou seja, 25 t de carga estática por lateral de truque ferroviário. Para que se considerem os efeitos de dinâmica inerentes à operação ferroviária, o valor da carga estática deve ser multiplicado por 2, conforme indica a norma AAR S-660 (2009): “*The mechanical load magnitudes are currently twice the maximum static rail load for a vertical load (...)*”. A carga vertical de 50 toneladas foi então definida como a condição de uso padrão para essas laterais.

Para inspeção das laterais quanto à ocorrência de trincas, além das observações visuais durante monitoramento, definiu-se pela realização de ensaios de partícula magnética (PM) a cada intervalo de 25.000 ciclos de carga vertical. Estabeleceu-se que cada lateral deveria ser ensaiada até apresentar trinca na região crítica ou até a aplicação de 1.000.000 de ciclos, o que ocorresse primeiro.

## 4.2 EXECUÇÃO E RESULTADOS DOS ENSAIOS ACELERADOS

Para execução dos ensaios acelerados nas laterais, foi realizada a montagem de uma célula com os dispositivos de fixação das laterais, além de cilindros hidráulicos para efetuar a aplicação dos carregamentos dinâmicos, conforme ilustrado na Figuras 4.1.

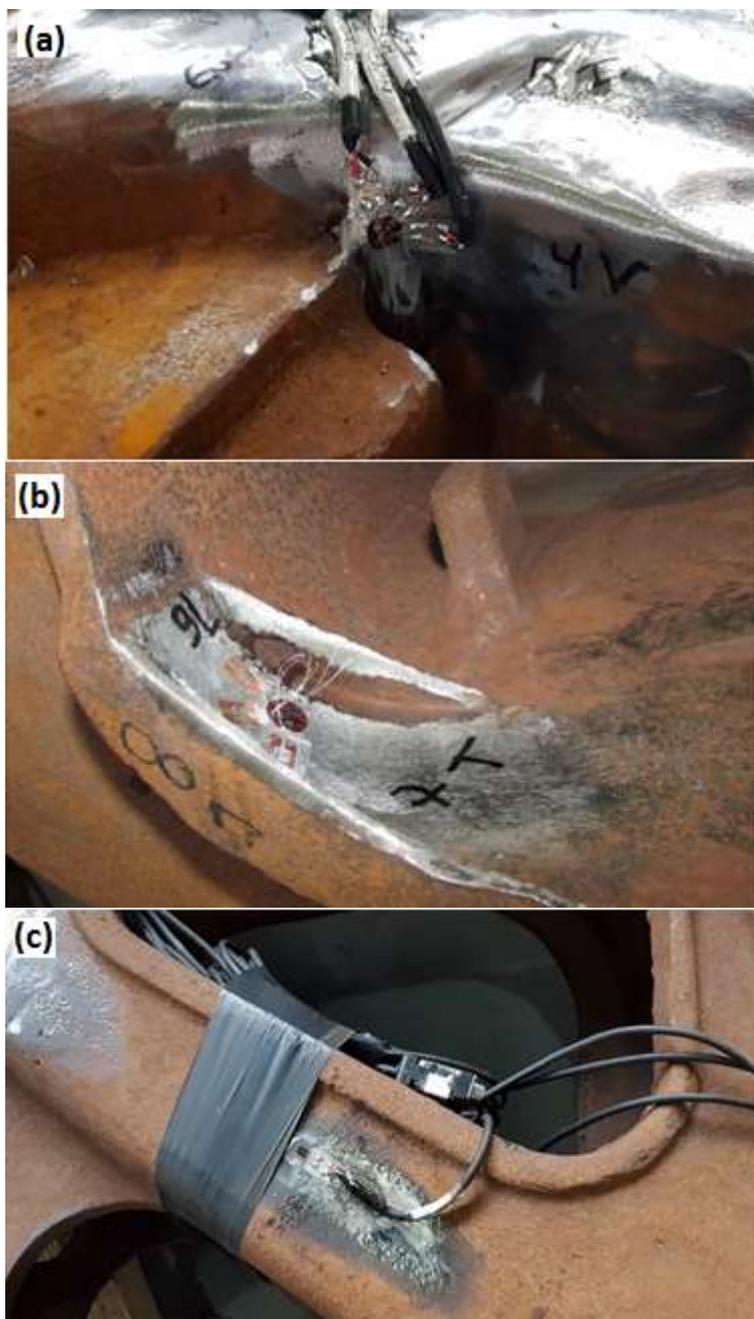
Figura 4.1 – Célula de ensaios com aplicação das 3 cargas (a) e apoios com rolamento, utilizados nos ensaios (b)



Fonte: adaptado de LAEDE (2019).

Para validar os resultados da simulação de tensões pelo método de elementos finitos, uma lateral foi instrumentada com extensômetros (*strain gages*), permitindo que fossem medidas as tensões atuantes nas regiões críticas, como pode ser visto na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Aplicação de extensômetro nas regiões do pedestal (a), da bolsa de molas (b) e do quadro da lateral (c)



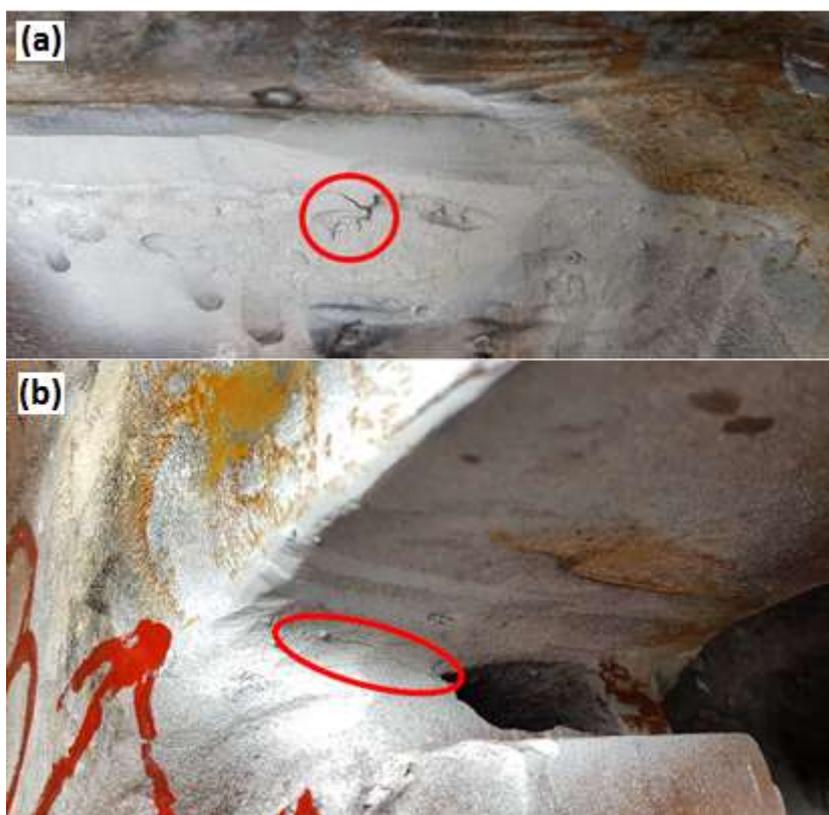
Fonte: adaptado de LAEDE (2019).

As maiores tensões observadas ocorreram na região dos pedestais das laterais, com valores encontrados de 268 MPa e 240 MPa. De fato, é nestas regiões que geralmente são observadas as trincas nas laterais, ocasionando seu sucateamento ou a necessidade de recuperação. Na bolsa de molas e no quadro da lateral as tensões máximas observadas foram de 130 MPa e 108 MPa, respectivamente. Todos os valores de tensão verificados ficaram abaixo da tensão

limite de escoamento dos aços grau B e B<sup>+</sup>, sendo possível então validar a configuração dos ensaios e prosseguir com os testes (LAEDE, 2019).

A Figura 4.3 apresenta exemplos de inspeções realizadas durante os ensaios, com a detecção de trincas nas laterais através do ensaio de partícula magnética (PM) e confirmação com ensaio de líquido penetrante (LP). Na maioria dos casos, as trincas foram observadas na região do pedestal.

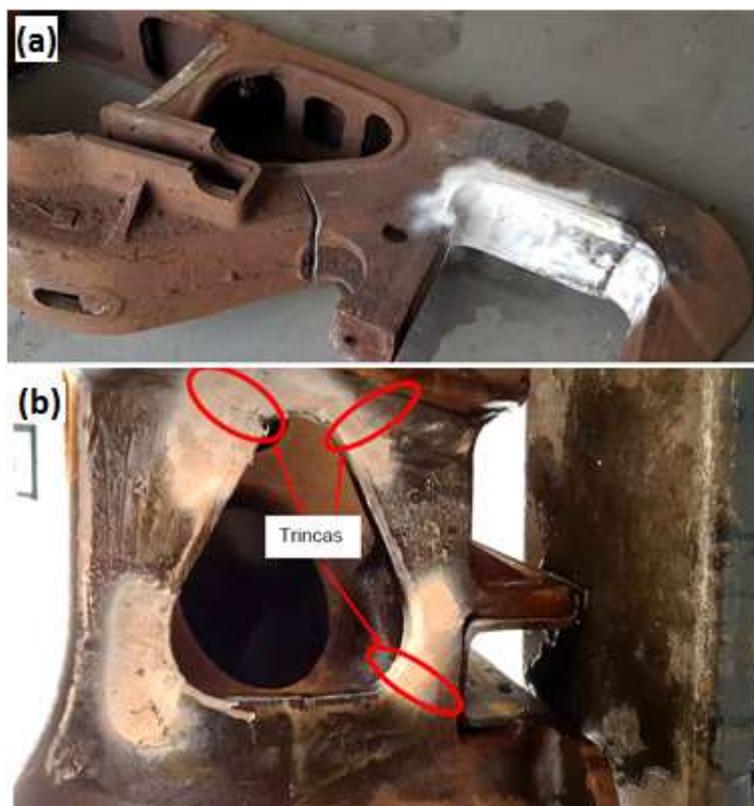
Figura 4.3 – Trincas no pedestal detectadas por ensaio de PM e confirmadas com LP – lateral Tipo 1, carga vertical de 80,3 toneladas (a), lateral Tipo 2, carga vertical de 68 toneladas (b)



Fonte: adaptado de LAEDE (2019).

Algumas laterais apresentaram também trincas ou quebras na região do quadro ou na bolsa de molas (Figura 4.4). As laterais novas (tipo 3) não apresentaram trincas na região do pedestal e seus ensaios foram realizados até que fossem atingidos os 1.000.000 de ciclos. Porém, após remoção da célula de ensaios, foram observadas trincas em outras partes da sua estrutura (próximas à bolsa de molas). Pelo tamanho e abertura das trincas e observação de outras similares nos outros ensaios, foi possível estimar a quantidade de ciclos.

Figura 4.4 – Quebra na região do quadro – lateral Tipo 1, carga vertical de 80,3 toneladas (a) e trincas observadas na região próxima à bolsa de molas – lateral Tipo 3, carga vertical de 68 toneladas (b)



Fonte: adaptado de LAEDE (2019).

No total, foram realizados 10 ensaios válidos para posterior análise comparativa de vida remanescente. A quantidade de ensaios foi limitada pela verba disponível para contratação e prazo para execução dos serviços, que restringiram a quantidade de ciclos de carregamento contratados. Os resultados dos ensaios são apresentados no Quadro 4.1, separados por tipo de lateral.

Quadro 4.1 – Resultados dos ensaios dinâmicos de fadiga nas laterais

Modelo de lateral	Carga vertical (tf)	Número de ciclos	Falha ou suspensão
Tipo 1	68	150.000-175.000	FALHA
Tipo 1	68	300.000-326.040	FALHA
Tipo 1	80,3	100.000-125.000	FALHA
Tipo 1	80,3	225.000-250.000	FALHA
Tipo 2	68	475.000-484.122	FALHA
Tipo 2	68	600.000-625.000	FALHA
Tipo 2	80,3	175.000-200.000	FALHA
Tipo 2	80,3	325.000-350.000	FALHA
Tipo 3	68	900.000-1.000.000	FALHA
Tipo 3	80,3	750.000-850.000	FALHA

Fonte: Autor.

Os dados dos ensaios foram utilizados para construção das curvas de vida remanescente dos 3 tipos de laterais ensaiadas, com auxílio dos *softwares* ALTA e Weibull++ da Reliasoft, conforme será apresentado no próximo capítulo.

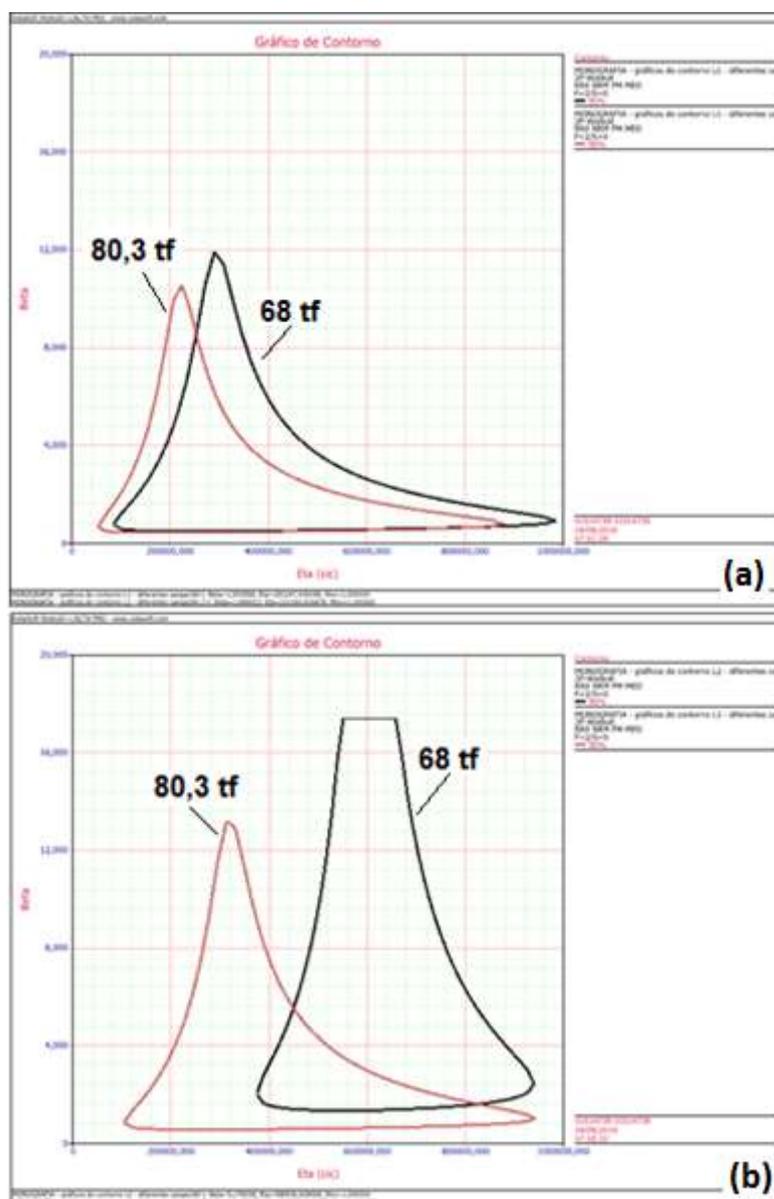
#### 4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Antes de estimar a vida remanescente das laterais ensaiadas, na condição de uso estipulada, foram analisados os gráficos de contorno dos parâmetros para os diferentes tipos de laterais, com o objetivo de verificar se os diferentes valores de carga provocaram de fato diferentes níveis de estressamento e também para confirmar que os modos de falha característicos se mantiveram os mesmos – para o caso das laterais, modo de falha por fadiga.

Essa análise é feita com o uso do *software* Weibull++, na ferramenta de Análise de Dados de Vida (LDA). Em duas análises distintas, foram inseridos os dados de falha para as laterais tipo 1 e 2, ensaiadas a 68 tf e 80,3 tf, considerando a censura em intervalo. Foi escolhida a distribuição de Weibull com 2 parâmetros e o método da plotagem de probabilidades, com regressão linear em X (RRX), devido à pouca amostragem.

Os gráficos de contorno dos parâmetros das curvas de vida das laterais tipo 1 e 2 são apresentados na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Gráficos de contorno para as laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b), para os ensaios com cargas verticais de 68 tf e 80,3 tf



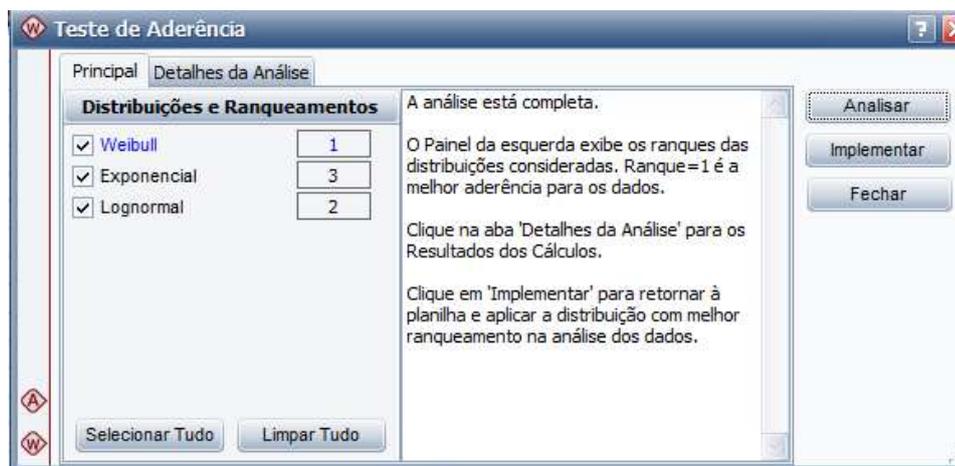
Fonte: Autor.

Analisando a variação dos parâmetros  $\beta$  (Beta) e  $\eta$  (Eta) dos gráficos da Figuras 4.5, é possível interpretar que para ambos o estresse à carga de 80,3 tf foi maior que à carga de 68 tf (menores valores de  $\eta$ ) e que os equipamentos são iguais e apresentam mesmo modo de falha (valores similares de  $\beta$ ), como já era esperado.

Com a confirmação estatística de que os ensaios conseguem representar bem a vida em fadiga das laterais, foi possível então realizar as análises no *software* ALTA, com o objetivo de estimar as curvas de vida das laterais tipo 1 e 2 na condição operacional (carga vertical de 50 tf).

Considerando que a aplicação de maiores cargas verticais nas laterais é um fator de estressamento físico, foi escolhida a Relação de Potência Inversa (IPL) para correlacionar a vida vs. estresse, conforme indicado no capítulo 3.4.4. Tanto para a lateral tipo 1 quanto para a lateral tipo 2 foi realizada a análise das melhores distribuições, com a distribuição de Weibull sendo sempre a mais indicada, conforme mostra a Figura 4.6.

Figura 4.6 – Análise de distribuições e ranqueamento no *software* ALTA



Fonte: Autor.

Os dados censurados em intervalo das falhas dos ensaios foram então inseridos no ALTA (Figura 4.7).

Figura 4.7 – Inserção dos dados dos ensaios das laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b) no *software* ALTA

(a)				LIFE-STRESS DATA	
	Última Inspeção (cic)	Tempo Operação (cic)	Carga vertical tf	Subset ID 1	Modelo
1.	150000	175000	68	L1 - 68 tf	pk-weibull
2.	300000	326040	68	L1 - 68 tf	
3.	100000	125000	80,3	L1 - 80,3 tf	
4.	225000	250000	80,3	L1 - 80,3 tf	
5.					
6.					

(b)				LIFE-STRESS DATA	
	Última Inspeção (cic)	Tempo Operação (cic)	Carga vertical tf	Subset ID 1	Modelo
1.	475000	484122	68	L2 - 68 tf	pk-weibull
2.	600000	625000	68	L2 - 68 tf	
3.	175000	200000	80,3	L2 - 80,3 tf	
4.	325000	350000	80,3	L2 - 80,3 tf	
5.					
6.					

Fonte: Autor.

Com os dados, foram gerando as curvas de vida para a condição de uso (50 tf), com os parâmetros  $\beta = 3,437189$  e  $\eta = 445.276$  ciclos para a lateral tipo 1 e  $\beta =$

5,766785 e  $\eta = 1.806.044$  ciclos para a lateral tipo 2, conforme mostrado na Figura 4.8.

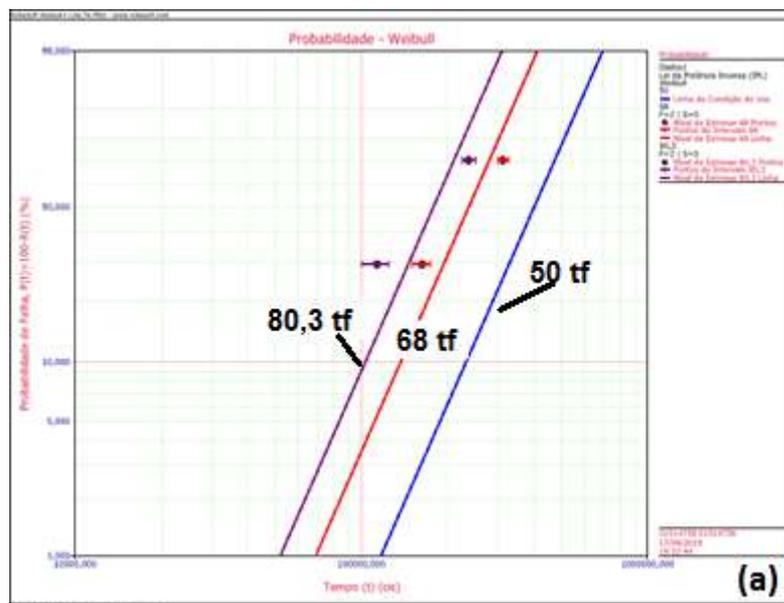
Figura 4.8 – Relatório de resultados – análise dos ensaios acelerados das laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b)

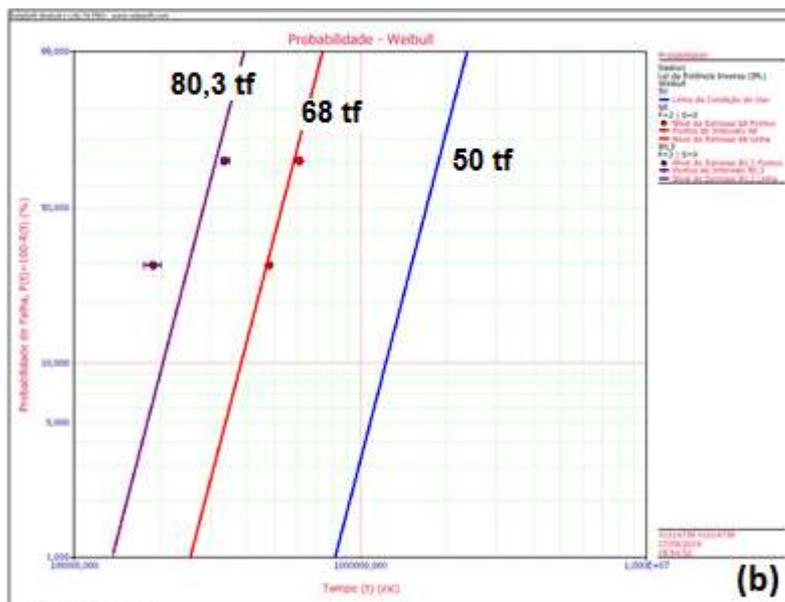
Relatório de Resultados			
Tipo de Relatório		Resultados ALTA	
<b>Informações do Usuário</b>			
Nome	01514739 01514739		
Empresa			
Data	17/09/2019		
<b>Parâmetros</b>			
Modelo	Lei da Potência Inversa (PI)		
Distribuição	Weibull		
Análise	MLE		
Beta	3,437189		
K	2,799126E-9		
n	1,710024		
Eta (cic)	445276,0441		
Valor de LK	-9,574384		
F \ S	4 \ 0		
<b>LOCAL VAR/COV MATRIX</b>			
VarBeta=2,093015	CovBetaK=4,732087E-10	CovBetan=-0,055834	
CovKBeta=4,732087E-10	VarK=4,493238E-16	CovKn=-3,738072E-08	
CovnBeta=-0,055834	CovnK=-3,738072E-08	Varn=3,111115	
<b>Dados Brutos</b>			
Número do Item	Última Inspeção (cic)	Tempo Operação (cic)	Carga vertical (tf)
1	150000	175000	68
2	300000	326040	68
3	100000	125000	80,3
4	225000	250000	80,3

Fonte: Autor.

A Figura 4.9 apresenta as curvas da probabilidade de falha vs. quantidade de ciclos para as laterais tipo 1 e 2. As curvas são apresentadas para as condições de estresse 68 tf e 80,3 tf e uso normal.

Figura 4.9 – Curvas da probabilidade de falha vs. quantidade de ciclos para as laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b) sob cargas verticais de 50 tf (uso normal), 68 tf e 80,3 tf





Fonte: Autor.

As laterais tipo 1 apresentaram uma vida média remanescente calculada em 400.253 ciclos, na condição de uso. Já para as laterais tipo 2 a vida remanescente média foi de 1.671.801 ciclos, conforme mostrado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Vida média remanescente das laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b)





Fonte: Autor.

Ou seja, a vida remanescente esperada para uma lateral 6.1/2" x 9" (fabricada após o ano 2000) com recuperação de trinca na zona crítica 1, na condição de uso, é cerca de 4,18 vezes maior que a de uma lateral 6" x 11" (fabricada antes do ano 2000), considerando as premissas deste estudo.

Para estimar a vida das laterais tipo 3 foi gerado apenas 1 dado de falha para cada nível de estresse, o que impossibilita uma análise direta (são necessários no mínimo 2 dados de falha). Sendo assim, foi realizada uma análise considerando a idade das laterais como o fator de estressamento, para cada condição de aplicação de carga). Como premissa foram adotadas as idades de 50, 15 e 1 ano, respectivamente para as laterais tipo 1, 2 e 3.

Novamente, foi escolhida a Relação de Potência Inversa (IPL) para correlacionar a vida vs. estresse, pois considera-se que a idade de cada lateral está diretamente ligada ao acúmulo de estresse do material, considerando o histórico de aplicação (ciclos mecânicos acumulados durante sua vida, impactando em acúmulo de discordâncias que podem favorecer a nucleação de trincas). Logo, este é um fator físico. A distribuição Weibull foi a mais indicada tanto para a carga vertical de 68 tf quanto para 80,3 tf.

Os dados censurados em intervalo das falhas dos ensaios foram então inseridos no ALTA (Figura 4.11), considerando a idade da lateral como fator de estressamento.

Figura 4.11 – Inserção dos dados dos ensaios acelerados das laterais sob as cargas de 68 tf (a) e 80,3 tf (b) no *software* ALTA

(a)				LIFE-STRESS DATA			
	Última Inspeção (cic)	Tempo Operação (cic)	Idade aproximada da lateral (anos)	Subset ID 1			
1.	150000	175000	50	L1 - 68 tf			
2.	300000	326040	50	L1 - 68 tf			
3.	475000	484122	15	L2 - 68 tf			
4.	600000	625000	15	L2 - 68 tf			
5.	900000	1000000	1	L3 - 68 tf			

(b)				LIFE-STRESS DATA			
	Última Inspeção (cic)	Tempo Operação (cic)	Idade aproximada da lateral (anos)	Subset ID 1			
1.	100000	125000	50	L1 - 80,3 tf			
2.	225000	250000	50	L1 - 80,3 tf			
3.	175000	200000	15	L2 - 80,3 tf			
4.	325000	350000	15	L2 - 80,3 tf			
5.	750000	850000	1	L3 - 80,3 tf			

Fonte: Autor.

Assim, foi possível gerar as curvas de vida para a condição de uso adotada (lateral tipo 3, com 1 ano de uso), com os parâmetros  $\beta = 4,230739$  e  $\eta = 1.130.632$  ciclos para a carga de 68 tf e  $\beta = 4,209372$  e  $\eta = 784.160$  ciclos para a carga de 80,3 tf, conforme mostrado na Figura 4.12.

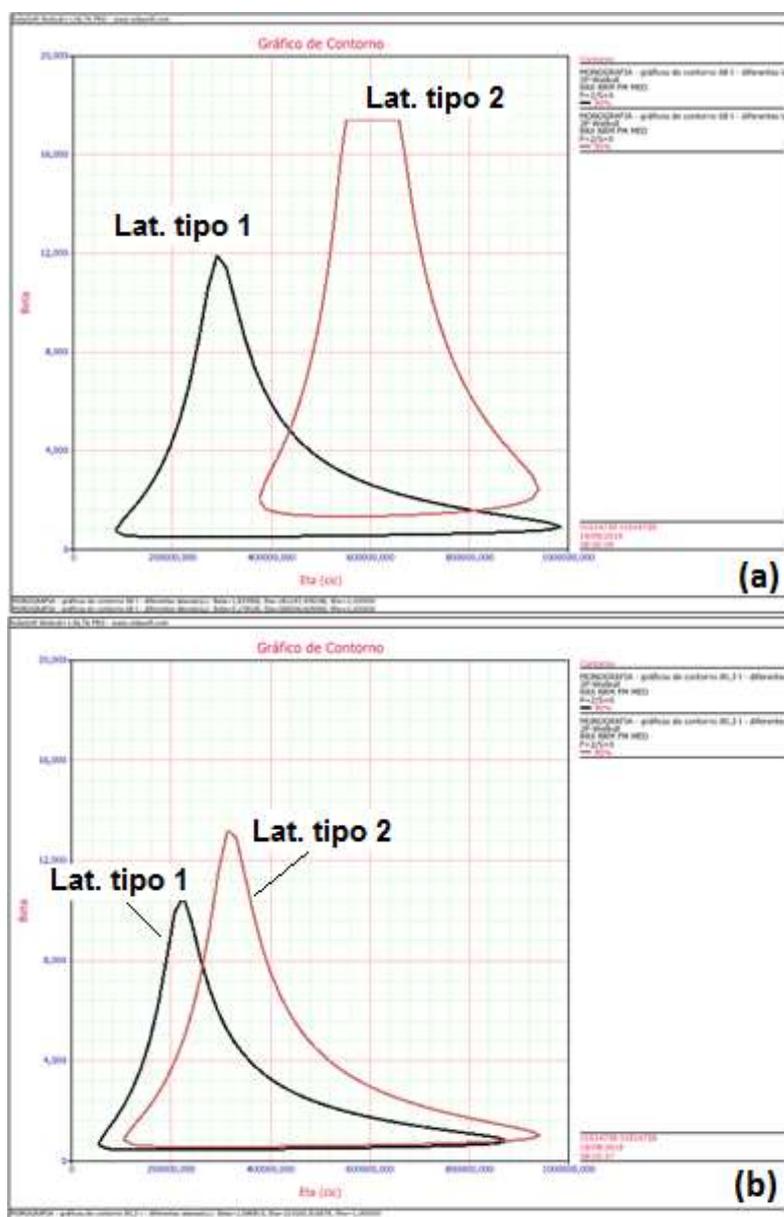
Figura 4.12 – Relatório de resultados – análise dos ensaios acelerados das laterais sob as cargas de 68 tf (a) e 80,3 tf (b)

Relatório de Resultados			(a)	Relatório de Resultados			(b)
Tipo de Relatório	Resultados ALTA			Tipo de Relatório	Resultados ALTA		
<b>Informações do Usuário</b>							
Nome	01514739 01514739			Nome	01514739 01514739		
Empresa				Empresa			
Data	17/09/2019			Data	17/09/2019		
<b>Parâmetros</b>							
Modelo	Lei de Potência Inversa (PL)			Modelo	Lei de Potência Inversa (PL)		
Distribuição	Weibull			Distribuição	Weibull		
Análise	MLE			Análise	MLE		
Beta	4,230739			Beta	4,209372		
K	8,844611E-7			K	0,000001		
n	0,313713			n	0,351462		
Eta (cic)	1,130632E+6			Eta (cic)	784159,6359		
Valor de LA	-14,586077			Valor de LA	-11,401332		
F \ S	S \ O			F \ S	S \ O		
<b>LOCAL VAR/COV MATRIX</b>							
VarBeta=2,390270	CovBetaK=-4,141240E-09	CovBeta=0,018249		VarBeta=2,702746	CovBetaK=-7,077324E-09	CovBeta=0,019241	
CovBeta=-4,141240E-09	VarK=7,384683E-14	CovKn=-2,774026E-08		CovBeta=-7,077324E-09	VarK=7,793262E-14	CovKn=-1,746123E-08	
CovBeta=0,018249	CovKn=-2,774026E-08	Var=0,011996		CovBeta=0,019241	CovKn=-1,746123E-08	Var=0,005337	
<b>Dados Brutos</b>							
Número do Item	Última Inspeção (cic)	Tempo Operação (cic)	Idade aproximada da lateral (anos)	Número do Item	Última Inspeção (cic)	Tempo Operação (cic)	Idade aproximada da lateral (anos)
1	150000	175000	50	1	100000	125000	50
2	300000	326040	50	2	225000	250000	50
3	475000	484122	15	3	175000	200000	15
4	600000	625000	15	4	325000	350000	15
5	900000	1000000	1	5	750000	850000	1

Fonte: Autor.

Os novos gráficos de contorno gerados foram também analisados, agora para as cargas verticais aplicadas de 68 tf e 80,3 tf, conforme apresentado na Figuras 4.13.

Figura 4.13 – Gráficos de contorno para as laterais tipo 1 e 2, considerando as cargas de 68 tf (a) e 80,3 tf (b)



Fonte: Autor.

Analisando a variação dos parâmetros  $\beta$  (Beta) e  $\eta$  (Eta) dos gráficos da Figura 4.13, interpreta-se que, para ambas as cargas, o estresse com o uso da lateral tipo 1 foi maior que com o uso da lateral tipo 2 (menores valores de  $\eta$ ) e que os equipamentos são iguais e apresentam mesmo modo de falha (valores similares de  $\beta$ ).

Assim, valida-se a consideração da idade como fator de estressamento, sendo possível gerar então os dados para a lateral tipo 3. Essa geração de dados foi realizada através de simulação no *software* Weibull++, com a inserção dos valores

dos parâmetros  $\beta$  e  $\eta$ , retirados das curvas geradas para a lateral tipo 3 (idade de 1 ano, condição de uso), na análise que considera a idade como fator de estresse. Os valores inseridos foram  $\beta = 4,230739$  e  $\eta = 1.130.632$  ciclos para a lateral tipo 3 sob carga de 68 tf e  $\beta = 4,209372$  e  $\eta = 784.160$  ciclos para a lateral tipo 3 sob carga de 80,3 tf, conforme apresentado na Figura 4.14. Foram gerados somente 2 dados para cada condição, de modo a manter o mesmo tamanho de amostra das laterais tipo 1 e 2.

Figura 4.14 – Inserção dos parâmetros de  $\beta$  e  $\eta$  para a lateral tipo 3, sob as cargas de 68 tf (a) e 80,3 tf (b)



Fonte: Autor.

Os valores gerados para as laterais tipo 3, a partir da simulação no Weibull++, foram inseridos no ALTA (Figura 4.15).

Figura 4.15 – Inserção dos dados simulados em Weibull++, para as laterais tipo 3, no software ALTA

	Tempo Falha (cic)	Carga vertical tf	Subset ID 1
1	880125,9451	68	L3 - 68 tf
2	1186862,239	68	L3 - 68 tf
3	609643,4036	80,3	L3 - 80,3 tf
4	823361,4334	80,3	L3 - 80,3 tf
5			
6			

Fonte: Autor.

Analogamente aos casos anteriores, foi escolhida a Relação de Potência Inversa (IPL). A curva de vida da lateral tipo 3 foi obtida também para a carga vertical de 50 tf (condição de uso), com os parâmetros  $\beta = 8,004119$  e  $\eta = 2.164.399$  ciclos, conforme mostrado na Figura 4.16.

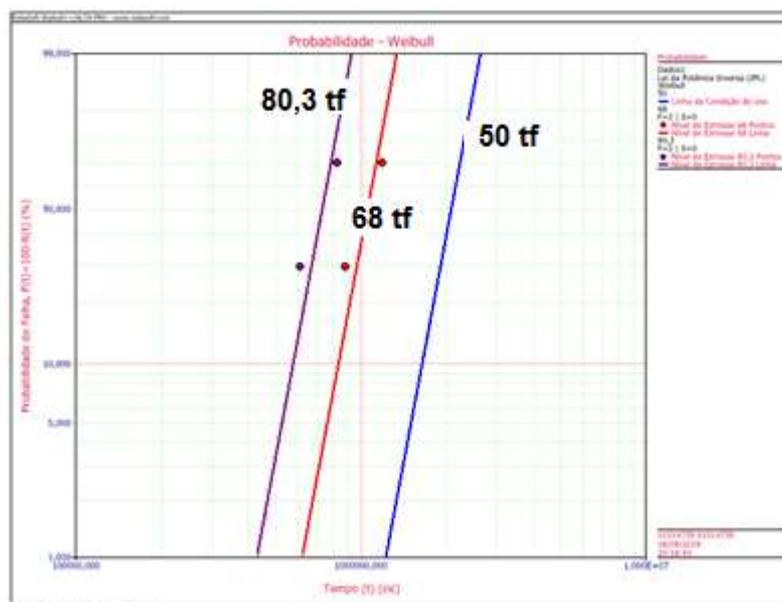
Figura 4.16 – Relatório de resultados – análise da lateral tipo 3 sob carga de 50 tf

Relatório de Resultados		
Tipo de Relatório	Resultados ALTA	
<b>Informações do Usuário</b>		
Nome	01514739 01514739	
Empresa		
Data	18/09/2019	
<b>Parâmetros</b>		
Modelo	Lei da Potência Inversa (IPL)	
Distribuição	Weibull	
Análises	MLE	
Beta	8,004119	
K	8,446798E-11	
n	2,200139	
Eta (cic)	2,164399E+6	
Valor da LK	-52,670247	
F \ S	4 \ 0	
<b>LOCAL VAR/COV MATRIX</b>		
VarBeta=11,128546	CovBetaK=-5,121007E-12	CovBetan=-0,002323
CovKBeta=-5,121007E-12	VarK=7,461346E-20	CovKn=-2,052164E-10
CovnBeta=-0,002323	CovnK=-2,052164E-10	Varn=0,564661
<b>Dados Brutos</b>		
<b>Número do Item</b>	<b>Tempo Falha (cic)</b>	<b>Carga vertical (tf)</b>
1	880125,9451	<Valor do Estresse = 68>
2	1186862,239	<Valor do Estresse = 68>
3	609643,4036	<Valor do Estresse = 80,3>
4	823361,4354	<Valor do Estresse = 80,3>

Fonte: Autor.

A Figura 4.17 apresenta a curva da probabilidade de falha vs. quantidade de ciclos para a lateral tipo 3, para as condições de estresse 68 tf e 80,3 tf e uso normal (50 tf).

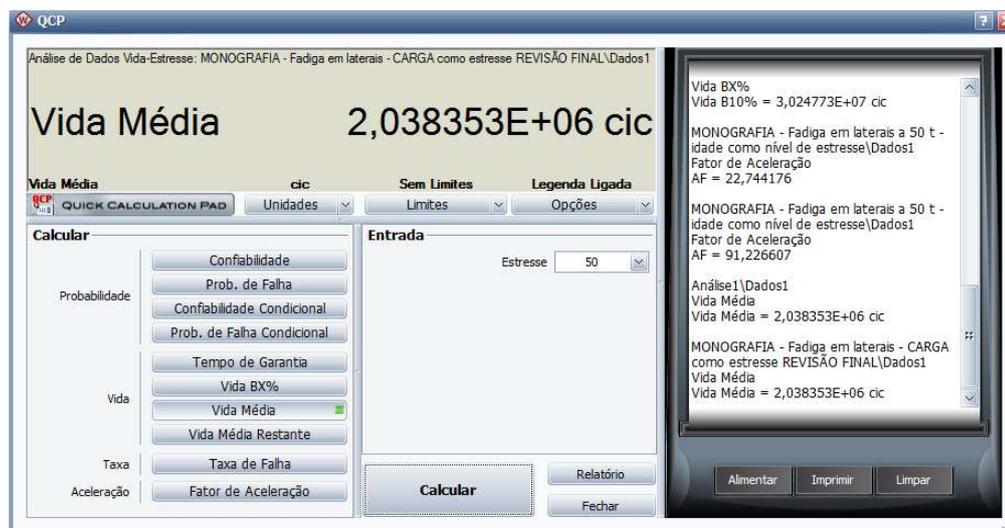
Figura 4.17 – Curvas da probabilidade de falha vs. quantidade de ciclos para a lateral tipo 3 sob cargas verticais de 50 tf (uso normal), 68 tf e 80,3 tf



Fonte: Autor.

As laterais tipo 3 apresentaram uma vida média remanescente calculada em 2.038.353 ciclos, na condição de uso, como mostra a Figura 4.18.

Figura 4.18 – Vida média remanescente das laterais tipo 3

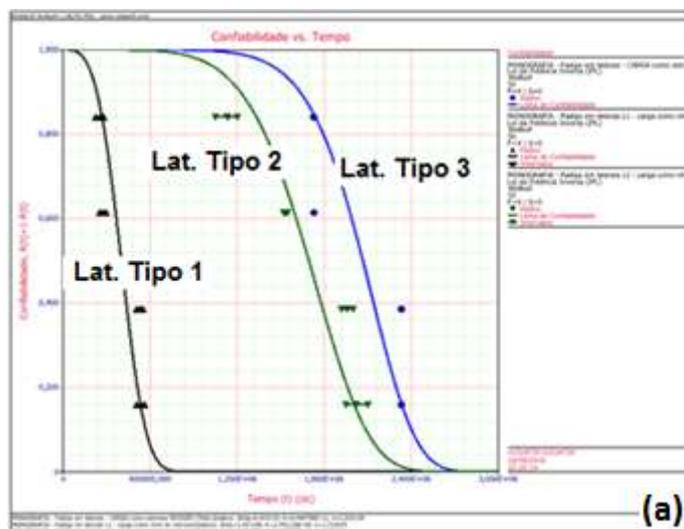


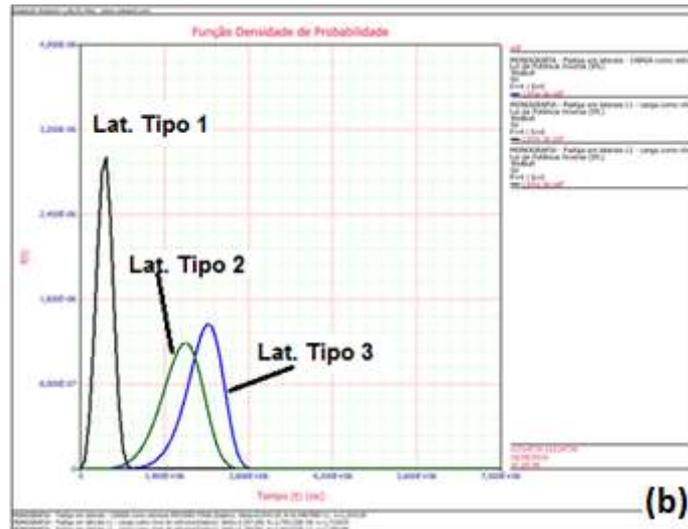
Fonte: Autor.

Ou seja, a vida remanescente esperada para uma lateral 6.1/2" x 9" nova, na condição de uso, é cerca de 5,09 vezes maior que a de uma lateral 6" x 11" (fabricada antes do ano 2000) com recuperação de trinca na zona crítica 1 e 1,22 vezes maior que uma lateral 6.1/2" x 9" (fabricada após o ano 2000) com recuperação de trinca na zona crítica 1, considerando as premissas deste estudo.

Os gráficos com as curvas combinadas da confiabilidade vs. tempo (em ciclos) e da função densidade de probabilidade de falhas (*pdf*) são apresentadas na Figuras 4.19.

Figura 4.19 – Curvas de confiabilidade vs. Tempo, em ciclos (a), e *pdf* (b) para condição de uso



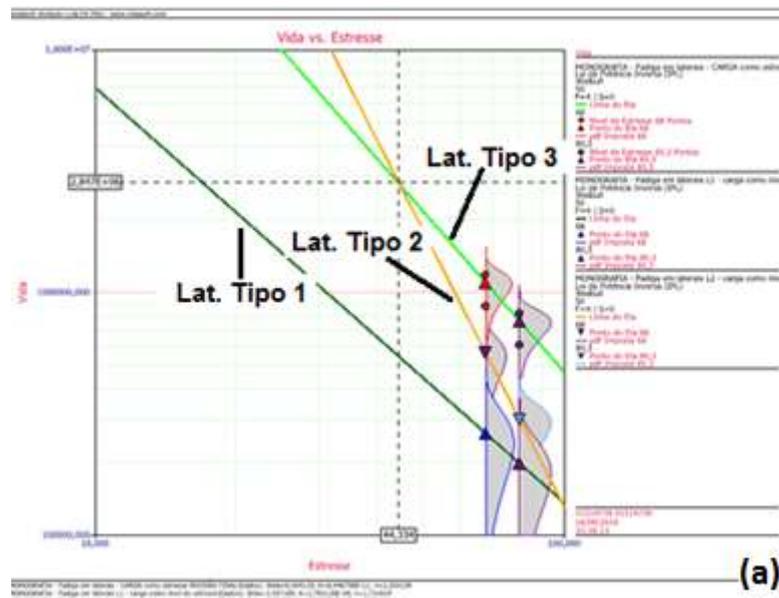


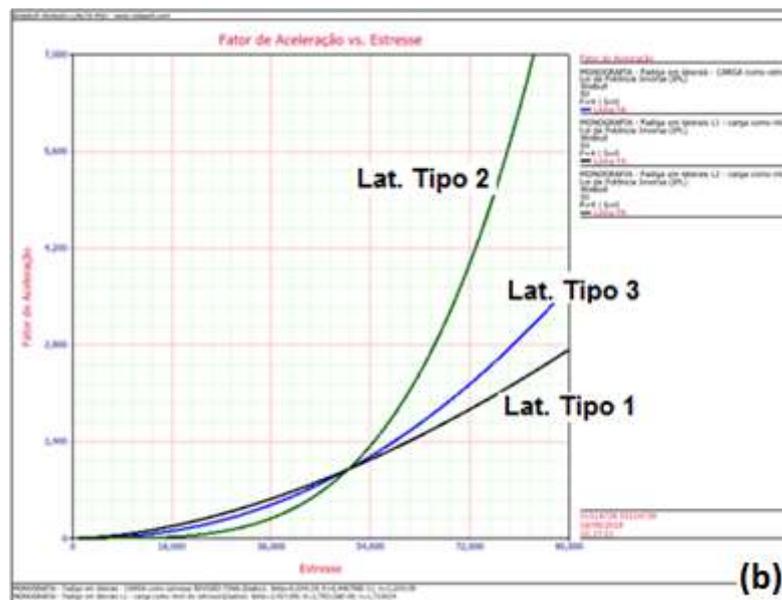
Fonte: Autor.

Analisando os gráficos, é possível verificar que as laterais tipo 2 e tipo 3 apresentam níveis de confiabilidade próximos, enquanto que a lateral tipo 1 apresenta um nível de confiabilidade muito reduzido em relação às anteriores.

A Figura 4.20 apresenta os gráficos com as correlações de vida vs. estresse e fator de aceleração vs. estresse.

Figura 4.20 – Gráficos com as correlações de vida vs. estresse (a) e fator de aceleração vs. estresse (b)





Fonte: Autor.

Analisando os gráficos, é possível verificar que o fator de aceleração da lateral tipo 2 cresce de maneira muito mais acelerada do que das laterais tipo 1 e 3, especialmente a partir do estresse de 50 tf, aproximadamente. Observando a Figura 4.29, nota-se que, caso fosse considerada uma condição de uso inferior a 44,334 tf, a expectativa de vida remanescente da lateral tipo 2 teria sido maior que a da lateral tipo 3, o que não faz sentido em termos práticos. Esses resultados são certamente devido à pequena quantidade de amostras dos ensaios e da necessidade de simular dados para a lateral tipo 3.

Vale lembrar também que não foram considerados os intervalos de confiança nas análises. Isso porque, como há apenas 2 amostras para cada condição de ensaio, os intervalos de confiança ficam muito abertos, inviabilizando qualquer análise. Por isso, adotou-se como premissa considerar somente a mediana destes intervalos para a análise comparativa de vida remanescente das laterais.

#### 4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA

Dada a comparação de vida útil remanescente para os diferentes tipos de laterais, faz-se necessário avaliar a viabilidade financeira da recuperação da trinca na zona crítica 1, considerando que laterais já em operação terão uma vida remanescente menor.

Para essa avaliação, foram calculados os custos anuais equivalentes (CAE) dos diferentes tipos de laterais, de forma a normalizar o período de análise. Assim, a partir do momento que uma trinca é detectada na zona crítica 1 da lateral, existem duas alternativas:

- Comprar uma lateral nova, a um maior custo, e ter uma expectativa de vida igual à da lateral tipo 3;
- Recuperar a trinca da lateral, a um menor custo, tendo também uma menor expectativa de vida, que dependerá da idade da lateral (no caso deste trabalho, consideram-se as laterais tipo 1 e 2).

Para as laterais novas, foi considerado o custo de aquisição de R\$7.000,00 e uma expectativa de vida de 57,5 anos, conforme dados do controle de vida da área responsável pela manutenção de vagões, baseado no histórico de utilização.

Já para definir o custo de recuperação, foram adotadas as seguintes premissas:

- Salário médio de um soldador que atua nesse tipo de recuperação: aproximadamente R\$2.500,00;
- Custo do trabalhador, considerando encargos, de 2,55 vezes o salário em carteira. Foram considerados trabalhadores com vínculo de aproximadamente 5 anos, devido à considerável rotatividade da função (SOUZA *et al*, 2012);
- Regime de trabalho de turno, com 2 dias de 12 horas de trabalho e 2 dias de folga. Assim, considerando os 365 dias do ano e descontando os 30 dias de férias, seriam 167,5 dias trabalhados no ano com 12 horas cada, ou seja, 2.010 horas trabalhadas no ano;
- Custo anual por soldador seria então de R\$82.875,00 (2.500 de salário x 2,55 de fator do custo dos encargos x 13 salários). Assim, a hora trabalhada por cada soldador custaria de aproximadamente R\$41,23. Pelo fato de haver muitas variáveis nessa estimativa (possibilidade de pagamento de participação nos resultados, adicional de turno, adicional noturno, trabalho em feriados, realização de hora extra, etc.), adotou-se o valor de homem hora (HH) de R\$50,00;
- Em 1 turno de trabalho, em geral é possível realizar a recuperação de até 4 laterais com trinca na zona crítica 1, considerando as etapas de

movimentação das laterais, goivagem para remoção da trinca, preparação da superfície, realização do primeiro ensaio de partícula magnética (para confirmar remoção total da trinca), pré-aquecimento a 315 °C e preenchimento dos cordões de solda. Após recuperação, as laterais ficam em resfriamento controlado (manta térmica) por 48 horas e, após resfriamento, são feitos o acabamento final e o segundo ensaio de partícula magnética, para então liberar as laterais. Para uma produtividade estimada em 60%, sobriam 7,2 horas disponíveis para a recuperação das 4 laterais. Logo, estima-se que cada lateral recuperada demanda o soldador em 1,8 horas;

- O custo de mão de obra estimado para cada lateral recuperada fica então em aproximadamente R\$90,00;
- Cada rolo de arame MIG ER70S6 custa aproximadamente R\$300,00 e é suficiente, em média, para recuperação de 30 laterais. Sendo assim, estima-se um custo de R\$10,00 de arame por lateral recuperada;
- Necessidade de monitorar a qualidade da recuperação. A premissa definida é de realizar análises de macrografia, micrografia, dureza e microdureza em 1 lateral a cada 20 recuperadas. Somando o custo com as análises, realizadas em laboratório externo, mais o frete, cada lateral analisada tem o custo aproximado de R\$4.000,00. Dividindo esse custo pelas 19 laterais restantes da amostra, pode-se incluir o custo de controle de qualidade de R\$210,53 por análise de lateral recuperada e reaproveitada.
- O custo total por lateral recuperada fica estimado então em R\$310,53 (90 + 10 + 210,53).

Para o cálculo do CAE, o período (n) escolhido foi a expectativa de vida útil remanescente de cada tipo de lateral. A taxa de juros (*i*) foi a inflação média dos últimos 5 anos no Brasil, calculada a partir dos dados da inflação anual (IPC Brasil) medida no mês de dezembro dos anos de 2014 a 2018 (INFLATION.EU, 2019), cujo valor ficou em 6,0 % ao ano.

Como foi mostrado no capítulo 4.3, a vida média remanescente das laterais tipo 1 e tipo 2 equivalem a 19,64% e 82,02% da vida remanescente da lateral tipo 3, respectivamente. Considerando expectativa de vida de 57,5 anos para a lateral

nova, estima-se então que as vidas remanescentes médias são de 11,29 anos para a lateral tipo 1 e 47,16 anos para a lateral tipo 2.

A análise do CAE foi realizada para os diferentes tipos de laterais e está resumida no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Resultados dos ensaios dinâmicos de fadiga nas laterais

Modelo de lateral	VPL (custo, em R\$)	Taxa de juros (I)	Período (n, em anos)	CAE (R\$)
Tipo 1	310,53	6,0%	11,29	38,65
Tipo 2	310,53	6,0%	47,16	19,91
Tipo 3	7000,00	6,0%	57,50	435,26

Fonte: Autor.

Como pode ser observado no Quadro 4.2, a recuperação das trincas na zona crítica 1 é viável financeiramente tanto para as laterais tipo 1 quanto para as laterais tipo 2. Isso ocorre devido ao baixo custo com a recuperação interna.

#### 4.5 ANÁLISE DE RISCOS COM A RECUPERAÇÃO

Apesar da recuperação de trincas ser viável para os dois modelos de lateral de truque existentes na EFVM (6" x 11" e 6.1/2" x 9"), é necessário avaliar os riscos da implantação desse processo na manutenção de vagões.

Foi avaliada então a capacidade da oficina em atender as futuras demandas de manutenção, caso toda lateral com trinca passe a ser recuperada (exceto as laterais cuja recuperação não é possível tecnicamente – geralmente nos casos em que a trinca ultrapassa toda a parede da lateral).

As seguintes premissas foram consideradas para a análise:

- Existência de 50.600 laterais na frota de 12.650 vagões de minério da EFVM (4 laterais por vagão, desconsiderando as laterais de rodízio);
- Capacidade de recuperação máxima anual de 2.920 laterais pela oficina de manutenção (4 laterais por turno, 2 turnos por dia, 365 dias no ano);
- Não é recomendável a recuperação externa para cumprimento das demandas, devido à criticidade do processo e dificuldade de certificar a

qualidade, vide exemplos de análises realizadas anteriormente (capítulo 2.1);

- Demanda anual linearizada de acordo com a vida útil remanescente calculada para as diferentes laterais.

A lateral tipo 1 possui vida útil média remanescente de 11,29 anos. Portanto, a longo prazo, estima-se que a demanda de recuperação necessária para manter a frota “saudável” (com todas laterais com trincas identificadas sendo imediatamente retiradas de operação, como ocorre atualmente) seria de 4.482 laterais (50.600 laterais / 11,29 anos). Portanto, acima da capacidade máxima de recuperação da oficina. Assim, entende-se que a recuperação de trincas na zona crítica 1 de laterais 6” x 11”, fabricadas antes do ano 2000, é inviável.

Já a lateral tipo 2 possui vida útil média remanescente de 47,16 anos. De forma análoga foi calculado que, a longo prazo, a demanda de recuperação estimada para manter a frota “saudável” seria de 1.073 laterais. Portanto, abaixo da capacidade máxima de recuperação da oficina. Assim, entende-se que a recuperação de trincas na zona crítica 1 de laterais 6.1/2” x 9”, fabricadas após o ano 2000, é viável. Fica a ressalva da necessidade de ampliar as inspeções nos pátios e reavaliar os planos de manutenção, para garantir que a capacidade de detecção das trincas será suficiente para atender essa demanda.

#### 4.6 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os critérios para definição dos parâmetros dos ensaios de fadiga nas laterais, a metodologia de validação e os resultados. Também foram apresentadas as análises dos dados gerados nos ensaios, através dos *softwares* Weibull++ e ALTA, da Reliasoft, com a comparação da vida remanescente dos diferentes tipos de laterais, e a análise da viabilidade de realizar as recuperações das trincas na zona crítica 1, diante das premissas definidas.

O capítulo trata do objetivo fim deste trabalho, que é justamente realizar essas comparações e gerar informação para a tomada de decisão dos engenheiros e gestores.

No próximo capítulo será apresentada a conclusão do trabalho, com as recomendações a respeito do processo de recuperação de trinca na zona crítica 1 de laterais de truques ferroviários.

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho realizado apresentou a especificação técnica das laterais de truques ferroviários, o desenvolvimento do processo de recuperação de trincas, os conceitos de engenharia de confiabilidade (incluindo análise de dados de vida e ensaios acelerados), a definição da metodologia de ensaios dinâmicos de fadiga em laterais e seus resultados, a comparação da vida útil remanescente (a partir de análises com os *softwares* Weibull<sup>++</sup> e ALTA) e as análises de viabilidade de realizar o processo de recuperação de trincas na zona crítica 1 das laterais.

Devido à pequena quantidade de amostras, não foi possível realizar as análises de vida remanescente considerando os intervalos de confiança, pois os mesmos ficaram muito amplos. Assim, foi necessário utilizar como premissa a comparação pelo valor mediano destes intervalos.

Também não foi possível estimar a vida das laterais novas, em ciclos, diretamente pelos resultados dos ensaios, pois só foi obtido 1 resultado válido para cada condição de aplicação de carga (são necessários no mínimo 2 dados de vida). Os resultados de vida das laterais novas (tipo 3) foram então estimados a partir dos resultados obtidos para as laterais tipos 1 e 2, considerando a idade da lateral como o fator de estressamento. Posteriormente, com os dados em mãos, foi possível estimar a vida da lateral tipo 3 para a condição de uso (carga de 50 tf).

Nenhuma das laterais ensaiadas a 68 tf de carga vertical falhou com menos de 125.000 ciclos, que é o valor médio esperado para laterais de grau B<sup>+</sup> no ensaio da norma AAR (2005) – mínimo esperado é de 75.000 ciclos.

Conforme apresentado no capítulo 4, verificou-se que a recuperação de trincas é inviável para as laterais 6" x 11", fabricadas antes do ano 2000, devido à incapacidade futura de atender à demanda de recuperações (a quantidade de laterais trincadas na frota cresceria, caso a recuperação fosse implementada para essas laterais). Já para as laterais 6.1/2" x 9", fabricadas após o ano 2000, a recuperação é viável tanto pelo aspecto financeiro quanto pelo fator de gestão de risco, desde que as premissas de controle de inspeção sejam adotadas.

Atualmente, a demanda de recuperação de trincas na zona crítica 1 está em aproximadamente 210 laterais tipo 2 por ano (42% das laterais de vagões de minério com trincas identificadas são desse modelo, conforme dados do controle de

inspeções da oficina). Considerando os valores de CAE calculados no capítulo 4.4, estima-se um o custo anual equivalente evitado de R\$87.223,50 ( $210 \cdot (435,26 - 19,91)$ ) com a recuperação de trincas nestas laterais.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se aumentar a amostragem de laterais ensaiadas, de modo que se possa obter mais dados para análise comparativa de vida (especialmente para as laterais novas), podendo-se trabalhar com os intervalos de confiança e diminuir os limites bilaterais.

Outra sugestão é aplicar metodologia semelhante para estudo de vida comparativo de outros componentes ferroviários. Por exemplo, estudo comparativo de componentes fundidos com e sem jateamento para inserção de tensões compressivas: comparar vidas úteis e analisar viabilidade de incluir na especificação técnica e/ou nas atividades de recuperação de componentes, considerando o custo para implantação.

## REFERÊNCIAS

AAR – ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. M-201: Manual of standards and recommended practices – Casting details – Section S. Washington, 2005.

AAR – ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. M-203: Manual of standards and recommended practices – Truck side frames, cast steel – design and testing – Section S. Washington, 2005.

AAR – ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. S-660: Manual of standards and recommended practices – Wheel designs, locomotive and freight car – Analytic evaluation – Section G. Washington, 2009.

AAR – ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. **The environmental benefits of moving freight by rail**, 2017. Disponível em: [www.cbo.gov/publication/50049](http://www.cbo.gov/publication/50049). Acesso em: 14 out. 2017. Em: GRIPP, Rafael Azevedo. **Otimização do ciclo de manutenção preventiva de rolamentos ferroviários**. 2017. 79 f. Dissertação (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

ABACKERLI, Alvaro José; PAPA, Maria Célia de Oliveira; MIGUEL, Paulo Augusto Cauchik; SASSERON, Pedro Luiz. **Análise da incerteza experimental na determinação da vida usando ensaio acelerado**. Gest. Prod., São Carlos-SP, v. 14, n. 1, p. 69-81, jan.-abr. 2007.

ADESIDA, Olu. **Reliability engineering: definition & purpose**. Disponível em <https://study.com/academy/lesson/reliability-engineering-definition-purpose.html>. Acesso em: 25 jun. 2019.

ALMEIDA, Leandro Prates Ferreira de. **Análise da viabilidade de troca automatizada de chapas dos vagões GDE na EFVM**. 2012. 49 f. Dissertação (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária, Faculdade Brasileira - UNIVIX. Vitória-ES, 2012.

ALMEIDA, Leandro Prates Ferreira de; LEMOS, Dennis Vieira; GRIPP, Rafael Azevedo; COSTA, Sandro; SOUZA, Wanderson. **Documento Técnico 19501: Recuperação de trincas em laterais de truques de vagões**. VALE S/A - Departamento da Estrada de Ferro Vitória a Minas. Vitória, 2017.

ALTOÉ, A.; BRUNORO, A.; OLIVEIRA, A. P. C.; RIBEIRO, B.; BRITO, B.; BARROS, B. T.; LEMOS, D. V.; SANTOS, G. F.; CARVALHO, H.; FREITAS, I.; RODRIGUES, K. P.; SANTOS, K. S.; ALMEIDA, L. P. F.; NEVES, M.; COSTA, M.; BERGANTINI, M. A.; GRIPP, R. A.; FERNANDES, R. P.; BOLDT, S.; CREMASCO, W. **Manual Técnico de Vagões e Carros de Passageiros**. VALE S/A - Departamento de Engenharia e Desenvolvimento Logístico. Belo Horizonte, 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16440**: Vagão ferroviário – Truque de três peças com dois rodeiros – Requisitos mínimos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSUNÇÃO, Renato Martins. **Estimador de máxima verossimilhança**: motivação. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013. Disponível em <https://homepages.dcc.ufmg.br/~assuncao/EstatCC/Slides/EMVIntro.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2019.

BARBOSA, Solange Assis. **Análise de confiabilidade dos trilhos do Túnel Monte Seco L1**. 2017. 62 f. Dissertação (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

BATISTA, João Luís F. **Verossimilhança e máxima verossimilhança**. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009. Disponível em <http://cmq.esalq.usp.br/BIE5781/lib/exe/fetch.php?media=leituras:verossim.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2019.

BRANCO FILHO, Gil. **Dicionário de termos de manutenção, confiabilidade e qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2006. Em: KISHIMOTO, Reinaldo Manabu. **Ensaios acelerados em sinaleiros LED (diodo emissor de luz) e incandescentes de painéis com tensão de alimentação 220 VAC para análises de confiabilidade**. 2017. 71 f. Dissertação (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

BUSINESS DICTIONARY. **Reliability engineering**: definition. Disponível em <http://www.businessdictionary.com/definition/reliability-engineering.html>. Acesso em: 25 jun. 2019.

ÉTICA Empreendimentos Tecnológicos LTDA. **Desenvolvimento de processos de soldagem**: reparo das laterais e travessas de vagões. Relatório técnico nº 2665/14. Ribeirão Preto-SP, 2014.

FAUSTINI, T. R. **Análise de investimentos**. Apostila do curso de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária, Vitória: Faculdade Brasileira, 2011.

FAZACONTA. **Matemática Financeira**. Disponível em <https://fazaconta.com/matematica-financeira-tvm.htm>. Acesso em 07 nov. 2019.

FELIX, Érico Pessoa. **Análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos complexos baseada em ensaios acelerados de vida**. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. São Paulo, 2006.

FREITAS, Marta A.; COLOSIMO, Enrico Antonio. **Confiabilidade**: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1997. 326 p. (Série Ferramentas da Qualidade, v. 12).

GRIPP, Rafael Azevedo. **Otimização do ciclo de manutenção preventiva de rolamentos ferroviários**. 2017. 79 f. Dissertação (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

INFLATION.EU – Worldwide Inflation Data. **Inflação histórica Brasil – IPC**. Disponível em <https://pt.inflation.eu/taxas-de-inflacao/brasil/inflacao-historica/ipc-inflacao-brasil.aspx>. Acesso em: 16 set. 2019.

INFOSOLDA. **Carbono equivalente**. Disponível em <https://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/metalurgia-livros-senai/130-carbono-equivalente>. Acesso em: 15 jun. 2019.

Institutos LACTEC. **Ensaio em laterais de truques ferroviários**. Relatório REL DVSM 6637/2016 – Rev03. Curitiba-PR, 2016.

KISHIMOTO, Reinaldo Manabu. **Ensaio acelerados em sinaleiros LED (diodo emissor de luz) e incandescentes de painéis com tensão de alimentação 220 VAC para análises de confiabilidade**. 2017. 71 f. Dissertação (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

LAEDE – Laboratório de Acústica e Ensaio Dinâmicos e Estáticos. **Ensaio dinâmico de fadiga em laterais de truque – Até 6.293.552 de ciclos**. Relatório de Ensaio: RE-1552-ED-003, IEME BRASIL – Engenharia Consultiva. São Paulo-SP, 2019.

LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física. **Relatório de Análise de Falha em Truck de Vagão Ferroviário**. Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

MACEDO, Caio César Lippe. **Análise de confiabilidade baseada em ensaios acelerados de vida: estudo de caso de lâmpadas incandescentes e LED utilizadas em refrigeradores**. 2018. 129 f. Dissertação (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

MAZZEI, Denis. **LCCA: Análise do custo do ciclo de vida**. [S.l.]: ReliaSoft, 2014. 224 p. (Apostila de treinamento). Em: KISHIMOTO, Reinaldo Manabu. **Ensaio acelerados em sinaleiros LED (diodo emissor de luz) e incandescentes de painéis com tensão de alimentação 220 VAC para análises de confiabilidade**. 2017. 71 f. Dissertação (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

MAZZEI, Denis. **Análise de dados de vida**. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2018(a).

MAZZEI, Denis. **LCCA: Análise do custo do ciclo de vida**. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2018(b).

MIB – Materials Institute of Brazil. **Certificado nº MIB-0298-15**. São Carlos-SP, 2015.

NELSON, W. **Accelerated Testing: statistical models, test plans and data analysis**. Second Edition, New Jersey: John Wiley and Sons, 2004.

NETO, Antônio Miguel Salla. **Planejamento e execução de ensaios de confiabilidade de componentes eletromecânicos**. 55 f. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Automação e Sistemas. Florianópolis-SC, 2014.

NRCC-46774. **National Research Council Canada**, 2004. Em: MAZZEI, Denis. **LCCA: Análise do custo do ciclo de vida**. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2018.

PAPA, Maria Célia de Oliveira; ABACKERLI, Alvaro J.; MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. **Análise dos efeitos das incertezas nas estimativas de tempos de falha de produtos via ensaios acelerados**, 2007.

PRATES, Wladimir Ribeiro. **O que é TIR (Taxa Interna de Retorno)?**. Disponível <https://www.wrprates.com/o-que-e-tir-taxa-interna-de-retorno/>. Acesso em: 07 nov. 2019.

PRENSCIA HBM. **Reliability engineering resources**. Disponível em <https://www.weibull.com/basics/reliability.htm>. Acesso em: 25 jun. 2019.

RELIASOFT. **Life data analysis reference book**. Disponível em [http://reliawiki.org/index.php/Life\\_Data\\_Analysis\\_Reference\\_Book](http://reliawiki.org/index.php/Life_Data_Analysis_Reference_Book). Acesso em: 25 jun. 2019.

RIGONI, Emerson. **Estudo da aplicação do método de máxima verossimilhança para determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull**. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Estatística. Curso de Estatística. Curitiba, 2013.

RIGONI, Emerson; MARIANO, Carlos Henrique. **Distribuições aplicadas a confiabilidade**. 3. Parte. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2016.

SANTANA, Pedro Paiva. **Análise de dados de vida de um conjunto de filtros micrônicos**. 2016. 46 f. Dissertação (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

SASSERON, Pedro Luiz; ABACKERLI, Alvaro José. **Uso do ensaio acelerado na determinação experimental da confiabilidade de relés**. XII SIMPEP. Bauru-SP, 2005.

SIGNIFICADOS. **Significado de fluxo de caixa**. Disponível em <https://www.significados.com.br/fluxo-de-caixa/>. Acesso em: 11 set. 2019.

SILVA, Paulo Rogério Ferreira da; JUN KINA, Edilson; BERGANTINI, Mauro. Vagões. **Apostila do curso de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária**. Faculdade Brasileira. Vitória, 2011.

SKF. **Custo do ciclo de vida**. Disponível em <https://www.skf.com/br/services/asset-management-services/asset-efficiency-optimisation/optimize/live-cycle-costing/index.html>. Acesso em: 10 set. 2019.

SOUZA, André Portela; FIRPO, Sérgio P.; PONCZEK, Vladimir P.; ZYLBERSTAJN, Eduardo; RIBEIRO, Felipe Garcia. **Custo do trabalho no brasil**: proposta de uma nova metodologia de mensuração – relatório final. Centro de Microeconomia Aplicada da Fundação Getúlio Vargas / Escola de Economia de São Paulo (FGV / EESP). São Paulo-SP, mai. 2012.

SPANÓ, Cláudio Caiani. **Ensaio acelerados de vida**. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2019.

STIELER, E. C. **Valor presente líquido (VPL)**. Disponível em: [http://www2.unemat.br/eugenio/files\\_planilha/8\\_vpl.htm](http://www2.unemat.br/eugenio/files_planilha/8_vpl.htm). Acesso em 11 set. 2019.

SUCENA. **Distribuição de Weibull**. Apostila do curso de especialização em transporte ferroviário de carga, Rio de Janeiro (RJ): IME (Instituto Militar de Engenharia), 2008. Disponível em [http://www.sucena.eng.br/IME/Mod5\\_Weibull2008.pdf](http://www.sucena.eng.br/IME/Mod5_Weibull2008.pdf). Acesso em: 04 nov. 2019.

TAVARES. **Conceitos de confiabilidade**: características da distribuição Weibull, 2005. Disponível em <http://san.uri.br/~ober/arquivos/disciplinas/tolerancia/apoio/weibull.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2019.

TOBIAS, Afonso. **Valor presente líquido (VPL)**. Disponível em: <http://expresstraining.com.br/index.php?page=article&id=61>. Acesso em: 04 nov. 2011. Em ALMEIDA, Leandro Prates Ferreira de. **Análise da viabilidade de troca automatizada de chapas dos vagões GDE na EFVM**. 2012. 49 f. Dissertação (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária, Faculdade Brasileira - UNIVIX. Vitória-ES, 2012.