

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**EUGÊNIO ZAPPA NETO**

**Uma sistemática para utilização de dados censurados de garantia para obtenção da  
confiabilidade automotiva**

Guaratinguetá - SP

2019

**Eugênio Zappa Neto**

**Uma sistemática para utilização de dados censurados de garantia para obtenção da confiabilidade automotiva**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na área de Gestão de Operações.

Orientador: Profº Dr. Messias Borges Silva  
Coorientador: Profº Dr. Gilberto F. Martha de Souza

Guaratinguetá - SP  
2019

Z35s	<p>Zappa Neto, Eugênio</p> <p>Uma Sistemática para utilização de dados censurados de garantia para obtenção da confiabilidade automotiva / Eugênio Zappa Neto – Guaratinguetá, 2019</p> <p>74 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 71-74</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. Gilberto F. Martha de Souza</p> <p>1. Confiabilidade (Engenharia) Métodos estatísticos. 2. Garantia de qualidade. 3. Indústria automobilística. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 658.56</p>
------	--

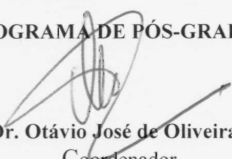
Pâmella Benevides Gonçalves  
Bibliotecária/CRB-8/9203

EUGÊNIO ZAPPA NETO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO”

PROGRAMA: ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
CURSO: MESTRADO ACADÊMICO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. Otávio José de Oliveira  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. ANEIRSON FRANCISCO DA SILVA  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. FABRÍCIO MACIEL GOMES  
EEL/USP

Agosto de 2019

## **DADOS CURRICULARES**

### **EUGÊNIO ZAPPA NETO**

**NASCIMENTO** 23.04.1975 - Lorena / SP

**FILIAÇÃO** Marco Antonio Cunha Zappa  
Sandra Terezinha Gomes Zappa

**1993 / 1998** Curso de Graduação Engenharia Química  
EEL-USP

**1999 / 2000** Curso de Pós Graduação Latu Sensu em  
Engenharia da Qualidade  
EEL-USP

**2008 / 2009** Curso de Pós Graduação Latu Sensu em  
Mecânica Automobilística  
FEI- São Bernardo do Campo,SP.

**2017 / 2019** Curso de Pós Graduação em Engenharia  
de Produção, nível de Mestrado  
Universidade Estadual Paulista, Campus  
de Guaratinguetá.

## RESUMO

Com um mercado cada vez mais veloz, competitivo e com consumidores mais exigentes que não toleram falhas de produtos, que são amparados por legislações de proteção e defesa do consumidor, as empresas necessitam se esforçar no aprimoramento da qualidade de seus produtos. Entretanto, mesmo com a aplicação de tecnologias no desenvolvimento e fabricação de produtos, as falhas ainda acontecem. Para que um produto possa desempenhar sua função sem falhas num determinado tempo desejável, nas mais diversas condições reais as quais são submetidos, deve-se conhecer e aumentar a sua confiabilidade. Embora os dados de garantia que as empresas possuem dos seus produtos sejam fontes de informações valiosas para a obtenção da confiabilidade de um produto, estes dados ainda são insuficientes, imprecisos ou incompletos para uso direto, sendo necessário o uso de métodos apropriados ainda não muito disseminados. Este trabalho visa aplicar o método de censura por taxa de uso que viabiliza o uso de dados de garantia em análises mais precisas de confiabilidade para que as empresas possam aprimorar os seus produtos. Por meio de uma revisão da literatura e com o uso de dados de garantia, verificou-se a viabilidade da aplicação do método proposto. Com comprovação estatística, o método proposto de modelagem dos dados de garantia atingiu os resultados do estudo de referência adotado. Conclui-se que o método proposto com o objetivo de conhecer com precisão a confiabilidade do produto é aplicável e não exige softwares especializados de confiabilidade para a sua execução. Portanto, a sua aplicação pode contribuir para o desenvolvimento da qualidade, o aumento da satisfação dos clientes e no ganho de vantagem competitiva para as empresas as quais o aplicarem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dados de garantia. Dados de campo. Dados censurados. Confiabilidade. Automobilística.

## **ABSTRACT**

With an ever faster, more competitive market, and more demanding consumers who cannot tolerate product failures that are backed by consumer protection and protection laws, companies need to strive to improve the quality of their products. However, even with the application of technologies in product development and manufacturing, failures still occur. For a product to be able to perform its function without fail in a certain desirable time, under the most diverse real conditions to which it is submitted, its reliability must be known and increased. Although the assurance data that companies have of their products is a valuable source of information for the reliability of a product, this data is still insufficient, inaccurate or incomplete for direct use, and appropriate methods not yet widely disseminated are required. . This work aims to apply the usage rate censored method that enables the use of warranty data in more accurate reliability analyzes so that companies can improve their products. Through a literature review and the use of guarantee data, the feasibility of applying the proposed method was verified. With statistical proof, the proposed guarantee data modeling method reached the results of the adopted reference study. It is concluded that the proposed method with the objective of knowing precisely the product reliability is applicable and does not require specialized reliability software for its execution. Therefore, its application can contribute to the development of quality, increase customer satisfaction and gain competitive advantage for the companies to apply it.

**KEYWORDS:** Warranty data. Field data. Censored data. Reliability. Automotive.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Questão de Pesquisa . . . . .	15
Figura 2	Evolução da Quantidade de Publicações para “Dados de Garantia” e Confiabilidade	16
Figura 3	Evolução da Quantidade de Publicações para “Dados Censurados” e Confiabilidade	17
Figura 4	Evolução das Citações para “Dados de Garantia” e Confiabilidade . . . . .	17
Figura 5	Evolução das Citações para “Dados Censurados” e Confiabilidade . . . . .	18
Figura 6	Método de Pesquisa . . . . .	19
Figura 7	Fluxograma da Pesquisa . . . . .	21
Figura 8	Ciclo de Vida de um Veículo . . . . .	25
Figura 9	Garantia 2D . . . . .	27
Figura 10	Causas das Reclamações de Garantia . . . . .	28
Figura 11	Representação de Dados Completos e Censurados . . . . .	29
Figura 12	Vida B10 . . . . .	30
Figura 13	Curva PDF . . . . .	33
Figura 14	Curva CDF . . . . .	34
Figura 15	Função Confiabilidade $R(t)$ . . . . .	35
Figura 16	Curva da Banheira . . . . .	36
Figura 17	Padrões de Falhas . . . . .	36
Figura 18	Distribuição Normal . . . . .	38
Figura 19	Distribuição Lognormal . . . . .	39
Figura 20	Distribuição Weibull . . . . .	40
Figura 21	Curva da Banheira e a Distribuição Weibull . . . . .	40
Figura 22	Estimativas de Parâmetros por Regressão . . . . .	41
Quadro 1	Métodos de Previsão de Confiabilidade e Garantia (continua) . . . . .	44
Figura 23	Fase 2 Detalhamento - Grupo Experimento I . . . . .	49
Figura 24	Histograma 75 Falhas- Grupo Experimento I . . . . .	50
Figura 25	Teste de Normalidade 75 Falhas- Grupo Experimento I . . . . .	50
Figura 26	Teste de Aderência - G.Experimento I . . . . .	51
Figura 27	Teste de Aderência - G. Experimento I . . . . .	51
Figura 28	Parâmetros da Distribuição de Weibull 2p - Grupo Experimento I . . . . .	52
Figura 29	Vida B10 Weibull 2p com 150 censuras- G.Experimento I . . . . .	52
Figura 30	Vida B10 Weibull 2p com 225 censuras - G.Experimento I . . . . .	53
Figura 31	Vida B10 Weibull 2p com 300 censuras - G.Experimento I . . . . .	53
Figura 32	Vida B10 Weibull 2p com 600 censuras - G.Experimento I . . . . .	54
Figura 33	Parâmetros da Distribuição de Weibull 3p - Grupo Experimento I . . . . .	54
Figura 34	Vida B10 Weibull 3p com 150 censuras - G.Experimento I . . . . .	55
Figura 35	Vida B10 Weibull 3p com 225 censuras - G.Experimento I . . . . .	55
Figura 36	Vida B10 Weibull 3p com 300 censuras - G.Experimento I . . . . .	56

Figura 37	Vida B10 Weibull 3p com 600 censuras - G.Experimento I . . . . .	56
Figura 38	Parâmetros da Distribuição Lognormal - Grupo Experimento I . . . . .	57
Figura 39	Vida B10 Lognormal com 150 censuras - G. Experimento I . . . . .	57
Figura 40	Vida B10 Lognormal com 225 censuras - G.Experimento I . . . . .	58
Figura 41	Vida B10 Lognormal com 300 censuras - G.Experimento I . . . . .	58
Figura 42	Vida B10 Lognormal com 600 censuras - G.Experimento I . . . . .	59
Figura 43	Fase 3 Detalhamento - Grupo Experimento II . . . . .	59
Figura 44	Histograma - Grupo Experimento II . . . . .	60
Figura 45	Teste de Normalidade para Taxa de uso - Grupo Experimento II . . . . .	61
Figura 46	Teste de Aderência taxa de uso - Grupo Experimento II . . . . .	61
Figura 47	Parâmetros Para Geração Dados Censurados por Weibull - G.Experimento II . .	62
Figura 48	Tempo de Vida com Dados Censurados Gerados por Weibull - G.Experimento II	62
Figura 49	Parâmetros Para Geração Dados Censurados por LogNormal - G.Experimento II	63
Figura 50	Tempo de Vida com Dados Censurados Gerados por LogNormal - G.Experimento II	63
Figura 51	Fase 4 Detalhamento - Grupo Controle . . . . .	64
Figura 52	Vida B10 Dados de Garantia e de Campo - Grupo Controle . . . . .	64
Figura 53	Teste de Hipótese - Teste t Experimento I . . . . .	66
Figura 54	Teste de Hipótese - Teste z Experimento I . . . . .	67
Figura 55	Teste de Hipótese - Teste t Experimento II . . . . .	68
Figura 56	Teste de Hipótese - Teste z Experimento II . . . . .	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do Experimento I . . . . .	66
Tabela 2 – Resultados - Correlação Método Mínimos Quadrados . . . . .	67
Tabela 3 – Resultados do Grupo Experimento II . . . . .	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFR	Constant Failure Rate - Taxa de Falha Constante
DFR	Decreasing Failure Rate - Taxa de Falha decrescente
EM	Expectation Maximization - Algoritmo de Maximização de Expectativa
FPM	Failure Process Modeling - Modelagem de Processos de Falhas
IFR	Increasing Failure Rate - Taxa de Falha Crescente
LDA	Life Data Analysis - Análise dos Dados de Vida
MIS	Months in Service - Meses em Serviço
MOP	Months of Production - Mês de Produção
NHPP	Nonhomogeneous Poisson Process - Processo Não Homogêneo de Poisson
NFFs	No Fault Found - Sem Falha Encontrada
MCEM	Monte Carlo Expectation Maximization - Algoritmo EM Monte Carlo
MLE	Maximum Likelihood Estimation - Estimativa por Máxima Verossimilhança
MTBF	Mean Time Between Failure - Tempo Médio Entre as Falhas
REP	Reparos
RGA	Reliability Growth Analysis - Análise do Crescimento da Confiabilidade
SEM	Stochastic Expectation Maximization
WDA	Warranty Data Analysis - Análise dos Dados de Garantia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta$	Parâmetro de Forma (ou inclinação)
$\eta$	Parâmetro de Escala (vida característica)
$\gamma$	Parâmetro de Localização (vida mínima)
$\mu$	Média
$\sigma$	Desvio Padrão

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.2	OBJETIVO	15
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Específico</b>	<b>15</b>
1.3	DELIMITAÇÃO	15
1.4	JUSTIFICATIVA	15
1.5	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO E MATERIAIS	18
1.6	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	22
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>23</b>
2.1	FALHAS DE PRODUTOS	23
<b>2.1.1</b>	<b>Falhas</b>	<b>24</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Análise de Falhas</b>	<b>24</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Ciclo de Vida de um Veículo</b>	<b>24</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Tipos de Garantia 1D e 2 D</b>	<b>26</b>
2.2	TIPOS DE DADOS	27
<b>2.2.1</b>	<b>Dados de Garantia</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Dados Censurados ou Suspensos em Confiabilidade</b>	<b>29</b>
2.3	DADOS DE VIDA DO PRODUTO	30
2.4	CONFIABILIDADE	31
<b>2.4.1</b>	<b>Engenharia da Confiabilidade - Benefícios e Aplicação</b>	<b>31</b>
2.5	FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE E ESTATÍSTICA	32
<b>2.5.1</b>	<b>Função Densidade de Probabilidade - PDF</b>	<b>32</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Função Distribuição Acumulada - CDF</b>	<b>33</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Função Confiabilidade - R(t)</b>	<b>34</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Taxa de Falhas - h(t)</b>	<b>35</b>
2.6	DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE	37
<b>2.6.1</b>	<b>Distribuição Normal</b>	<b>37</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Distribuição Lognormal</b>	<b>38</b>
<b>2.6.3</b>	<b>Distribuição Weibull</b>	<b>39</b>
2.7	MÉTODOS DE ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS	40
<b>2.7.1</b>	<b>Método dos Mínimos Quadrados</b>	<b>41</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Método da Máxima Verossimilhança</b>	<b>42</b>
2.8	INTERVALO DE CONFIANÇA	42
2.9	PROCESSO DE ESCOLHA DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	43
2.10	MÉTODOS QUE UTILIZAM DADOS DE GARANTIA EM CONFIABILIDADE	43

<b>3</b>	<b>APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA</b> . . . . .	<b>48</b>
3.1	FASE 1 - SELEÇÃO DO MÉTODO . . . . .	48
3.2	FASE 2 - GRUPO EXPERIMENTO I . . . . .	48
<b>3.2.1</b>	<b>G.Experimento IA - Weibull 2p</b> . . . . .	<b>52</b>
<b>3.2.2</b>	<b>G.Experimento IB - Weibull 3p</b> . . . . .	<b>54</b>
<b>3.2.3</b>	<b>G.Experimento IC - LogNormal</b> . . . . .	<b>57</b>
3.3	FASE 3 - GRUPO EXPERIMENTO II . . . . .	59
<b>3.3.1</b>	<b>G.Experimento II-D- Weibull 2p</b> . . . . .	<b>61</b>
<b>3.3.2</b>	<b>G.Experimento II-E - Lognormal</b> . . . . .	<b>63</b>
3.4	FASE 4 - GRUPO CONTROLE . . . . .	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>65</b>
4.1	FASE 2 - Grupo EXPERIMENTO I . . . . .	65
4.2	GRUPO EXPERIMENTO II . . . . .	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>69</b>
5.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS . . . . .	70
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os consumidores querem a garantia de que seus produtos funcionem durante a sua vida útil e a legislação de proteção ao consumidor tem se tornado mais rigorosa. Mediante este cenário as empresas têm aumentado as opções, formas e períodos de garantia de seus produtos para os clientes. Porém os custos da manutenção destas garantias podem variar entre 2 e 10 pontos percentuais do preço de venda e dependem do desempenho da confiabilidade dos seus produtos, seja por fatores sob controle dos fabricantes, que estão baseados nas tomadas de decisão durante a concepção e desenvolvimento dos produtos, ou seja por fatores que estão sob controle dos consumidores, como níveis de uso e operação, ambiente e manutenção (SRINIVASAN et al., 2016).

O desempenho dos produtos sob às condições de uso de operação pelo cliente é um importante fator relacionado com a confiabilidade do produto no campo. Entender e estimá-la é muito importante para as áreas técnica (engenheiros) e comercial (gerentes) dos fabricantes, que hoje coletam uma grande quantidade de dados de garantia. Prever com precisão o número de falhas em garantia permite os fabricantes preparar planos financeiros, estabelecer ou revisar políticas de garantia e planos de estoque de peças sobressalentes, assim como conhecer e entender os modos de falhas de seus produtos e, com isto, promover a correção e melhoria de seus produtos e a satisfação de seus clientes (KARIM; YAMAMOTO; SUZUKI, 2001; YANG; HE; HE, 2016).

Nas últimas duas décadas, pesquisas consideráveis foram feitas sobre garantia em diferentes perspectivas e áreas. Também foram realizadas pesquisas sobre diferentes modelos e métodos usados para análise de dados de garantia, seja em estudos de confiabilidade ou de previsão de garantia. Já com o tema utilização de dados de campo e de garantia, observou-se uma certa confusão na classificação destes tipos de dados. Dados de campo não possuem a precisão dos dados gerados, por exemplo, em testes de laboratório, e, portanto, por possuírem menor qualidade, geram mais erros nos estudos por eles utilizados, mesmo assim, o tema classificação e tipos de dados de garantia também foi explorado, embora numa menor frequência (WU, 2013).

É esperado que sejam realizadas mais pesquisas na área de dados de garantia do produto (KARIM; YAMAMOTO; SUZUKI, 2005). Os dados de garantia de produtos vendidos com uma ou duas dimensões (tempo e uso) promovem informações úteis para estimativas de confiabilidade no campo, do produto e no seu desenvolvimento e considerar estas estimativas nos diferentes cenários existentes é um potencial tema para novas pesquisas (MURTHY, 2007). Há necessidade de se realizar novas pesquisas sobre o tema análise de dados de garantia nas seguintes áreas (WU, 2012) :

1. Uso dos avanços das novas tecnologias para facilitar coleta de dados mais simples de desempenho do produto com o aprimoramento das técnicas analíticas;
2. Detecção precoce de problemas de confiabilidade e modificação de projetos com o desafio de detectar os modos de falhas críticos que podem gerar lesões humanas ou perdas de ativos e os modos de falhas comuns que ocasionam problemas com alta incidência;
3. Estimativa de confiabilidade de campo para lançamentos de novos produtos;
4. Previsão de falhas de garantia de médio e longo prazo.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O tema aplicações e análises de dados de campo e de garantia ainda não é significativo na literatura, e assim, também se faz necessário mais pesquisas (WU, 2013).

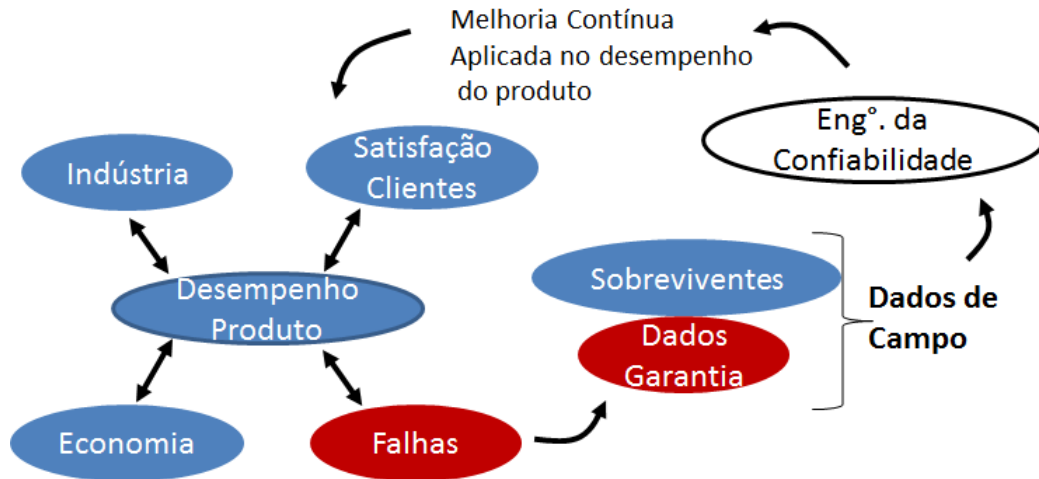
Devido a mudanças na tecnologia, a próxima geração de dados de campo para a confiabilidade será muito mais rica em informações. Na atual (e futura) geração de muitos produtos, a natureza dos dados de confiabilidade de campo está mudando drasticamente. Os produtos podem ser equipados com sensores que podem ser usados para capturar informações sobre como, quando e sob quais condições ambientais e operacionais os produtos estão sendo usados. Como exemplo de mudanças, o "Big Data", que embora possa fornecer alto volume de informações, por si só, não resolverá todos os problemas de confiabilidade, pois o conhecimento detalhado do mecanismo da falha, assim como, suas causas, se faz necessário para na elaboração das previsões nos estudos de confiabilidade (MEEKER; HONG, 2014).

Pode-se refletir sobre o paradoxo de se ter quantidade de dados ao invés de qualidade das informações, visto que com os avanços da era da informação, foi facilitada a disponibilidade de aquisição e armazenamento de dados, porém, nem sempre estes possuem a qualidade requerida, sendo necessário lapidá-los para serem úteis nas aplicações e estudos de melhorias. Talvez seja necessário um esforço maior em se obter dados de maior qualidade, e não em quantidade, para estas aplicações serem bem sucedidas, pois para uma boa análise de confiabilidade é necessário capturar o comportamento de uso do produto de maneira realista (ALSINA et al., 2017).

A proposta deste trabalho se faz necessária para verificar se as técnicas desenvolvidas para utilização de dados de garantia são aplicáveis em estudos de confiabilidade para melhorias dos produtos na área automobilística. Este setor foi escolhido por representar um relevante setor da economia, compor uma cadeia de suprimentos relevante no setor industrial e possuir produtos que fazem parte do dia-a-dia, o que possibilita um melhor entendimento das suas funcionalidades e, conseqüentemente, dos mecanismos de suas falhas.

Na Figura 1, é ilustrado as relações existentes entre as melhorias no produto com a satisfação do cliente. Quanto menor for a quantidade de falhas relacionadas ao bom desempenho do produto, maior será a satisfação do cliente e, conseqüentemente, melhores resultados a empresa e a economia obterão. Porém, infelizmente as falhas acontecem. Considerando que os dados das falhas, pelo menos no período coberto de garantia que o fabricante oferece, são registrados e estão disponíveis pela empresa, e os dados dos produtos que não falharam são incompletos, ou seja, não os temos com precisão, mas são necessários para as aplicações de engenharia de confiabilidade para melhorar o produto, surge a questão: como usar os dados de campo disponíveis nas empresas para melhorar a confiabilidade dos seus produtos ?

Figura 1 – Questão de Pesquisa



Fonte: Autor (2019).

## 1.2 OBJETIVO

Aplicar o método de censura por taxa de uso que utiliza dados de garantia e de campo falhados e censurados para a obtenção e melhoria da confiabilidade de produtos na área automobilística.

### 1.2.1 Objetivo Específico

Avaliar os valores preditos pelo método proposto de censura por taxa de uso comparando com os resultados de um estudo inicial de referencia pelo método convencional.

## 1.3 DELIMITAÇÃO

Este trabalho é baseado em um estudo do método de censura por taxa de uso para se utilizar dados de campo e de garantia para obtenção da confiabilidade de produtos do setor automobilístico.

Será realizada uma revisão bibliográfica com artigos acadêmicos e revisões internacionais, língua inglesa, sendo priorizados os cinco últimos anos das publicações científicas e também serão consideradas as principais fontes e autores do tema.

Limita-se a aplicação do método proposto utilizando dados de garantia e de campo, falhados e censurados, para um modo de falha conhecido de um componente que compõe um sistema de um veículo completo, sem considerar a reincidências das falhas.

Limita-se também à utilização de softwares comerciais de estatística e planilha de dados.

A pesquisa utilizará dados de garantia e de campo de uma frota de uma empresa do Brasil, que por questões de sigilosidade não será identificada.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

Ao fazer uma análise da evolução das pesquisas na área observa-se que inicialmente foram desenvolvidos métodos para estimar reclamações de garantia e a confiabilidade de produtos no

campo com dados limitados e de baixa qualidade, com interesses e benefícios predominantemente financeiros. Posteriormente pesquisadores desenvolveram algoritmos com alertas antecipados que não só contribuíram com os benefícios conhecidos para as empresas e para os clientes como a melhoria dos produtos, mas principalmente contribuíram na redução de riscos relacionados à segurança humana e perdas de ativos nas empresas. Busca-se obter a aplicação de um método para prever falhas de garantia a partir do conjunto de dados disponíveis (SRINIVASAN et al., 2016).

Observa-se então uma oportunidade em conhecer e explorar as técnicas e métodos desenvolvidos no âmbito científico para utilização de dados de garantia, considerando toda as suas restrições e limitações no que diz respeito à sua baixa qualidade, para desta forma, ser possível a aplicação desta tecnologia que envolve a captura (coleta) de dados, registros, tratativas (análises estatísticas) e uso em estudos de confiabilidade com o objetivo de aperfeiçoar os produtos nas empresas, favorecendo o crescimento da economia e beneficiando a sociedade.

Com base em alguns artigos pesquisados na pesquisa primária (análise exploratória), foram realizadas pesquisas nas bases (SCOPUS, 2019a) e (SCIENCE, 2019a) com a combinação das palavras chaves “dados de garantia” e “confiabilidade”, conforme ilustrado na Figura 2. Constata-se um crescimento de publicações ao longo dos anos em ambas bases da pesquisa.

Figura 2 – Evolução da Quantidade de Publicações para “Dados de Garantia” e Confiabilidade



Fonte: - (SCOPUS, 2019) e (WEB OF SCIENCE, 2019)

Da mesma forma, foram realizadas pesquisas nas mesmas bases com a combinação das palavras chaves “dados censurados” e “confiabilidade”, conforme ilustrado na Figura 3. Percebe-se também um crescimento de publicações ao longo dos anos em ambas bases da pesquisa.

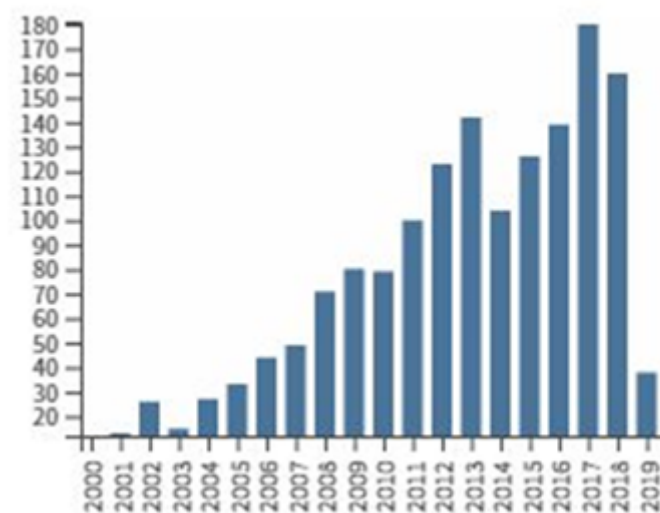
Figura 3 – Evolução da Quantidade de Publicações para “Dados Censurados” e Confiabilidade



Fonte: - (SCOPUS, 2019) e (WEB OF SCIENCE, 2019)

Conforme ilustrado na Figura 4, na base Web of Science há também uma evolução crescente ao longo dos últimos anos de citações para os temas “dados de garantia” e “confiabilidade”.

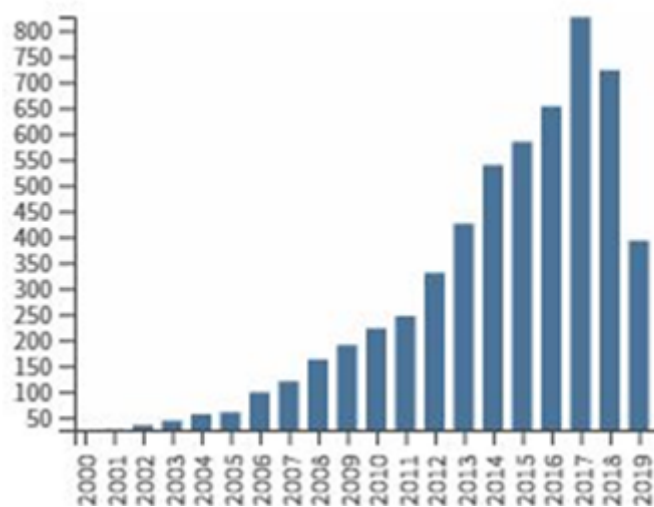
Figura 4 – Evolução das Citações para “Dados de Garantia” e Confiabilidade



Fonte: (WEB OF SCIENCE, 2019)

O mesmo comportamento crescente é ilustrado na Figura 5, para a quantidade de citações para os temas “dados censurados” e “confiabilidade”, na base Web of Science, porém com um volume maior.

Figura 5 – Evolução das Citações para “Dados Censurados” e Confiabilidade



Fonte: (WEB OF SCIENCE, 2019)

Pode-se observar nas figuras 2 à 5 que há uma quantidade maior tanto de citações como de publicações relacionadas com “dados censurados” e confiabilidade por estar mais relacionada ao desenvolvimento de algoritmos da área de computacional. Já para a pesquisa das combinações “dados de garantia” e confiabilidade percebe-se um menor volume de publicações quando comparado aos termos “ dados censurados” e confiabilidade. Em ambos os temas se observa aumento nos volumes de publicações e nas citações, o que mostra a relevância da pesquisa e a indicação de uma lacuna para novas pesquisas (KARIM; YAMAMOTO; SUZUKI, 2005; MURTHY, 2007; WU, 2013; SRINIVASAN et al., 2016).

Identificou-se assim, uma necessidade de estudos na aplicação de métodos e técnicas para utilização de diferentes tipos de dados de garantia em estudos de confiabilidade, comprovada por estudos científicos anteriores.

A lacuna que este estudo visa preencher é contribuir com a aplicação destes dados de garantia que são, na maioria das vezes, disponíveis mas inutilizados pelas empresas, em engenharia da confiabilidade para a obtenção das melhorias do produto.

## 1.5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO E MATERIAIS

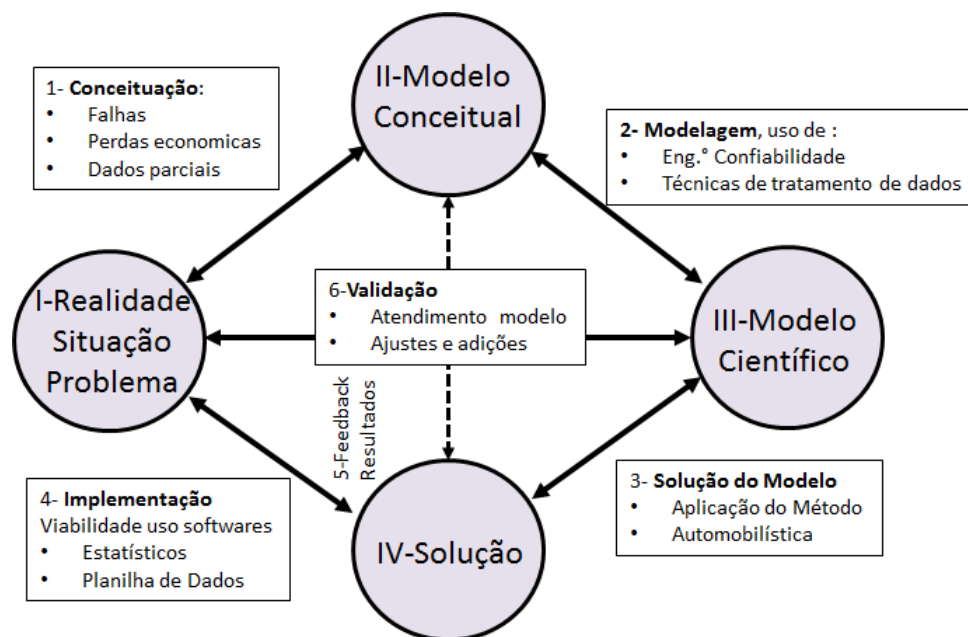
Uma pesquisa científica possui como objetivo a resolução de um problema, mas nem toda forma de resolução de problema implica em pesquisa científica. Muitas vezes esta se dá pelo senso comum e há semelhanças e diferenças entre elas. Numa pesquisa científica, além do grau de especialização do pesquisador no assunto, há também a disciplina e o rigor na aplicação do método de solução de problema. A ordem é representada em um modelo, sendo este a construção mental da ordem. Desta forma, o papel dos modelos na resolução de problemas é fundamental, pois os problemas representam desordem. Não há dúvidas que o conhecimento de pessoas no senso comum podem contribuir neste processo, mas a ciência busca sempre o conhecimento acumulado nas referências bibliográficas neste processo de resolução, de restabelecimento da ordem (MIGUEL, 2012).

Quanto à classificação da pesquisa, é de natureza aplicada, pois, a pesquisa caracteriza-se por seu interesse prático, isto é, objetiva que os resultados sejam aplicados ou utilizados imediatamente na solução de problemas que ocorrem na realidade, suscitada por objetivos comerciais por meio do desenvolvimento de novos processos ou produtos orientados para as necessidades do mercado (MARTINS; MELLO; TURRIONI, 2014).

Seus objetivos são exploratórios pois tem interesse tornar explícito o problema ou construir hipóteses. Pode ser utilizado levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que solucionaram problemas semelhantes e análises de exemplos que ajudam na compreensão (BERTRAND; FRANSOO, 2002).

A pesquisa empírica descritiva tem o foco num modelo que descreva de forma apropriada as relações causa-efeito existentes nos processos reais. Pesquisadores dedicados a esta linha de pesquisa precisam ter um bom conhecimento das características relevantes da operação, dos processos, seus dados, suas variantes e consequências no estudo (MIGUEL, 2012). De acordo com (BERTRAND; FRANSOO, 2002), este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa quantitativa, com método de modelagem empírico descritivo, com base em modelos visando descrever o modelo a partir de dados obtidos juntos ao objeto de estudo, ou seja, a partir de dados reais, completando o ciclo de “conceituação – modelagem – solução do modelo – implementação - resultados e validação”. O modelo básico que norteia a construção do método de pesquisa pode ser observado na Figura 6, adaptada :

Figura 6 – Método de Pesquisa



Fonte: Adaptado de (MITROFF et al., 1974)

Conceituação - etapa 1 - identificação, caracterização e importância do problema;

Modelagem - etapa 2 - pesquisa bibliográfica e seleção dos métodos de aplicação que atendam ao problema;

Solução do Modelo - etapa 3 - aplicação do método com dados reais;

Implementação - etapa 4 - verificação da aplicabilidade e contribuição para a disseminação da aplicação da pesquisa;

Resultados e Validação - etapas 5 e 6 - análise dos resultados obtidos, verificação do atendimento do modelo à situação problema, pois os modelos científicos nem sempre atendem completamente à realidade, sendo necessários ajustes ou até mesmo correções.

A verificação do resultado desta pesquisa, segundo (MARTINS; MELLO; TURRIONI, 2014) será feita por meio de testes com dados históricos do sistema real, se existirem dados históricos, parte é usada para a construção do modelo e a outra parte é usada para determinar se o sistema computacional se comporta de forma similar ao sistema real.

Vale ressaltar também que para modelos estocásticos consideram incertezas nos parâmetros do problema, requerem em geral, grande quantidade de dados históricos e tratamento estatístico adequado.

Para aplicação pode-se obter dados de garantia de períodos retroativos (passado), aplicar o modelo ou a simulação objeto de estudo desta pesquisa e calcular os resultados confrontando-os com os valores presentes verificando a eficácia do método aplicado (MIGUEL, 2012).

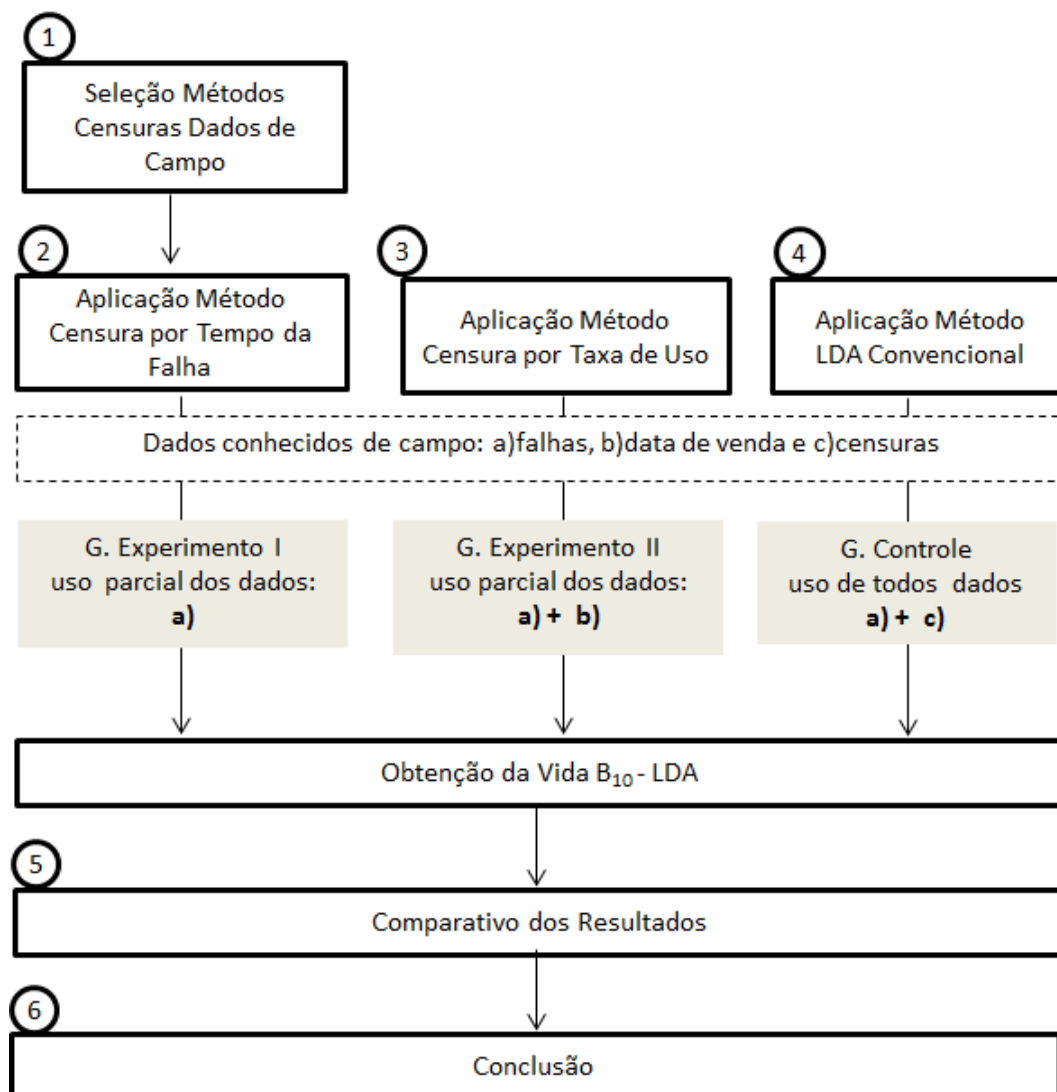
O ponto de partida deste trabalho se deu com observações oriundas do ambiente industrial, na área automotiva a respeito da dificuldade de se utilizar os dados disponíveis de garantia para a realização de projeções de confiabilidade.

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica, onde se aplicou conceitos de uma revisão sistemática da literatura, pois não se tinha pleno conhecimento dos métodos desenvolvidos inicialmente. Foram encontrados vários trabalhos e métodos desenvolvidos sobre a aplicação de dados de garantia em estudos de confiabilidade.

Adotou-se critérios para seleção de trabalhos que viessem a responder a questão de pesquisa elaborada. Os critérios foram: uso de dados de garantia e/ou campo, uso de dados censurados, aplicação prática, preferencialmente no campo automotivo. Outros critérios também foram considerados como o uso de métodos estatísticos convencionais de estimação de parâmetros e intervalo de confiança para dados censurados. Os estudos que não correspondiam aos critérios, ou partes deles, foram usados como consulta.

A Figura 7 descreve as etapas executadas na pesquisa:

Figura 7 – Fluxograma da Pesquisa



Fonte: Autor (2019)

Fase 1- Seleção do método para utilização de dados da campo com censura;

Fase 2- Grupo experimento I - Aplicação do método de censura por tempo da falha proposto por Limon et al. (2016) simplificado, sem considerar a taxa de uso mas considerando o tempo das falhas. Utilizou-se apenas as falhas para esta fase;

Fase 3- Grupo experimento II - Aplicação do método de censura por tempo da falha proposto por Limon et al. (2016), sendo considerado a falha e a idade do veículo em função da data de venda do mesmo;

Fase 4 - Grupo controle - Aplicação de todos os dados conhecidos para a obtenção de resultado de referência para ser usado na comparação dos resultados das fases anteriores;

Para as fases 2, 3 e 4, aplicou-se o estudo de vida para um componente, obtendo-se o valor de vida B10 para cada umas das respectivas fases.

Fase 5 - Com a obtenção da vida B10 de cada fase, comparou-se os resultados obtidos dos grupos experimento I (fase 2) e II (fase 3) com os resultados do grupo controle(fase 4);

Fase 6- Conclusão e verificação do atingimento dos objetivos da pesquisa.

O produto que será avaliado é um veículo consolidado no mercado. Sua garantia é de 24 meses. Porém foram considerados os veículos pertencentes à uma frota especial de garantia adicional com opção até 60 meses (5 anos), o que favorece a análise por haver maior tempo uso e, conseqüentemente, de monitoramento do produto.

Para fins de simplificação, a falha foi definida com a troca ou reparo de um grupo de sub-componentes que ocasionam o comprometimento parcial ou total do componente principal, sendo assim, definido e delimitado também o modo de falha.

Para a revisão sistemática da literatura foi utilizado o software Start, desenvolvido e disponibilizado versão livre pela Universidade de São Carlos, que auxiliou nos critérios de seleção e classificação dos artigos.

Já para os ajustes de distribuição de probabilidade e para a aplicação de confiabilidade, foi utilizado o software Minitab. Também foi utilizado o software Crystal Ball para a realização dos testes de aderência necessários.

A adoção destes softwares neste trabalho se deu pela disponibilidade de download de versão demonstração disponíveis nos próprios sites dos fabricantes, utilizando licenças com prazo determinado. Para o estudo foi utilizada garantia 1D, ou seja, a garantia considerada foi a adotada pela empresa que considera o tempo de vigência ou de contratação da extensão da sua cobertura, portanto, garantia baseada no tempo.

Aplicou-se os melhores ajustes de distribuição de probabilidade paramétrica utilizando teste de aderência para os dados, sendo estes dados falhados e censurados .

Aplicou-se os métodos de estimação de parâmetros - MLE e Mínimos Quadrados conforme característica da amostra (tamanho da amostra e presença ou não de dados censurados).

Execução de testes de hipóteses t e z para verificação dos resultados.

Considerou-se também “as falhas” como variáveis aleatórias em relação ao uso, conforme Limon et al. (2016).

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No capítulo 1 é introduzido, contextualizado, apresentado o objetivo, justificado e apresentado o método de pesquisa e os materiais utilizados neste trabalho.

O referencial teórico está relacionado no capítulo 2, onde são abordados os assuntos de engenharia da confiabilidade, dados de garantia e de campo e a fundamentação estatística, além dos métodos de utilização de dados de garantia em confiabilidade encontrados na revisão da literatura.

No capítulo 3 é desenvolvido a aplicação da metodologia, sendo detalhados os passos da executados nas fases 2, 3 e 4.

No capítulo 4 os resultados são apresentados e no capítulo 5 o trabalho é concluído e recomendações de estudos futuros são descritas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção é apresentado todo o referencial teórico em que o trabalho se fundamentou para ser desenvolvido.

### 2.1 FALHAS DE PRODUTOS

Embora as avançadas tecnologias auxiliadas por computador tenham contribuído do ponto de vista do projeto, a crescente complexidade das indústrias está criando mais desafios para os engenheiros de confiabilidade, pois as complexas interações entre os componentes e subsistemas tornam os processos perigosos e propensos a acidentes e falhas. Além disso, a demanda por qualidade do produto, leis e regulamentos e consciência pública tornam a análise de confiabilidade crucial. Portanto, garantir a confiabilidade de processos e produtos se tornou uma tarefa obrigatória para as indústrias garantirem uma operação mais segura e manterem a reputação de sua marca (AMIN; KHAN; ZUO, 2019).

Desta forma, as empresas automotivas tendem a oferecer serviços para veículos e fornecem cobertura de garantia prolongada com custos adicionais como um diferencial no mercado para atrair os clientes. Foi observado que os fabricantes de automóveis gastam uma quantidade substancial de seus retornos de vendas (2,5-3,0%) em defeitos que ocorrem durante o período de garantia. A indústria automobilística gasta entre 45 a 50 bilhões de dólares por ano em recalls e reclamações de garantia. A General Motors e a Ford juntas gastaram cerca de 8,6 bilhões de dólares em reclamações de garantia em 2006. Além disso, elas investiram bilhões de dólares para reduzir esse gasto de garantia (ALKAHTANIA et al., 2019).

A indústria automotiva busca continuamente maneiras novas e inovadoras de reduzir seus custos e melhorar sua margem de lucro. Tem sido demonstrado que quando se fornece melhores serviços, ganha-se a confiança do cliente nos produtos, levando a um aumento de receita para a empresa. Para isto, é essencial que o diagnóstico de falhas seja conduzido apropriadamente coletando as informações necessárias dos clientes para que as análises derivadas dos dados coletados possam melhorar o projeto do produto (PENG et al., 2017).

A alta competitividade no mercado faz com que os fabricantes sejam forçados a transformar as empresas em negócios lucrativos, centrados no cliente. Durante esta transição, bons serviços pós-venda gradualmente se tornam um fator chave para a sobrevivência de um fabricante, como a garantia. Quase todos os produtos são vendidos com contratos de garantia devido à concorrência, obrigações industriais ou requisitos do cliente. O principal objetivo de uma garantia é oferecer ao cliente uma reparação pós-venda, como conserto, substituição ou reembolso, quando um produto deixar de executar a sua função pretendida dentro do período previsto e contratado de garantia (YANG; HE; HE, 2016).

Essencialmente, a maioria dos fabricantes está empregando várias políticas de garantia como estratégia de marketing para impulsionar suas vendas, enquanto os clientes consideram a garantia como um fator importante em seu processo de seleção de produtos, especialmente quando as marcas concorrentes são quase idênticas. Como resultado, a garantia tornou-se cada vez mais importante em

transações comerciais e uma variedade de políticas de garantia surgiram no mercado. Nos últimos anos, a garantia do produto atraiu grande atenção de muitas disciplinas diferentes (DAI et al., 2017).

### **2.1.1 Falhas**

Uma falha pode ser qualquer incidente ou condição que faça com que um item ou sistema seja incapaz de executar sua função pretendida com segurança, confiabilidade e economia. Uma falha é o estado do produto caracterizado por sua incapacidade de executar sua função exigida. Algumas falhas duram apenas por um curto período de tempo e são denominadas como falhas intermitentes, enquanto outras falhas continuam até que alguma ação corretiva as retifique. Essas falhas são denominadas falhas estendidas, podendo ser completas, com perda parcial ou total de função. De acordo com a falha parcial com aviso ou não, as falhas estendidas podem ser divididas em falhas súbitas e graduais. Uma falha completa e repentina é chamada de falha catastrófica e uma falha gradual e parcial é chamada de falha degradada (BIROLINI, 2014).

### **2.1.2 Análise de Falhas**

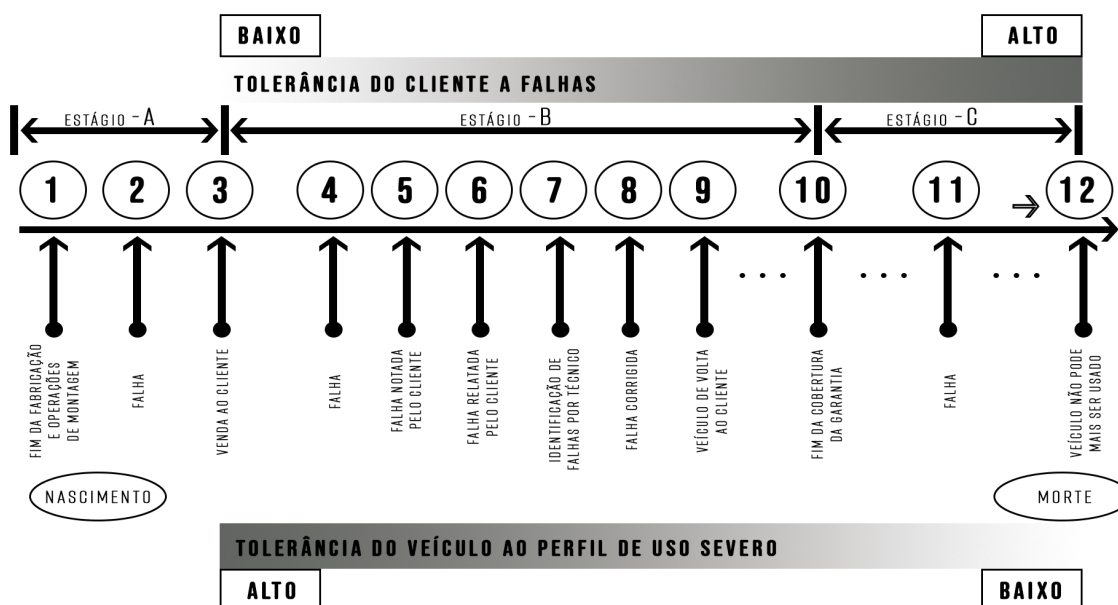
Um modo de falha é uma descrição pela qual uma falha é observada ou em que a falha acontece. É possível ter várias causas para o mesmo modo de falha. O conhecimento da causa do fracasso é útil na prevenção de falhas e mandatório na correção da mesma. Uma classificação das causas de falha é proposta segundo (JIANG, 2015):

- Falha de projeto devido ao design inadequado.
- Falha de fraqueza devido à fragilidade no sistema, de modo que não seja capaz de resistir o estresse encontrado no ambiente operacional normal.
- Falha de fabricação devido ao item não estar em conformidade com as especificações de projeto.
- Falha no envelhecimento devido aos efeitos da idade e / ou uso.
- Falha de uso incorreto devido ao mau uso do sistema (por exemplo, operação em ambientes para os quais não foram projetados).
- Falha no manuseio incorreto devido a manuseio incorreto e/ou falta de cuidado manutenção.

### **2.1.3 Ciclo de Vida de um Veículo**

Para RAI e SINGH (2009), quando necessitamos identificar as características e o verdadeiro caráter de uma pessoa, é importante que se passe algum tempo com elas e que se faça um esforço para compreendê-las. Assim como as pessoas, o ciclo de vida de um veículo também têm características a serem analisadas, como os dados de garantia. Assim, ilustram as fases principais de um ciclo de vida de um veículo na Figura 8, onde também relaciona a tolerância à falha do ponto de visto do cliente (usuário) e da confiabilidade do veículo, além dos pontos chaves de ocorrência dos eventos de falhas desde o início do ciclo de vida do veículo, ou seja, o seu nascimento, até o fim do seu ciclo, sua morte.

Figura 8 – Ciclo de Vida de um Veículo



Fonte:(RAI; SINGH, 2009)

### 1. Estágio A: período de pré-venda

O fim das operações de fabricação e montagem no ponto 1 marcam o nascimento do veículo. Deste ponto em diante, o uso do cliente e as condições ambientais trarão grandes impactos ao longo do seu ciclo de vida. Falhas ocorridas no ponto 2 podem ser por causa de erros associados às operações de fabricação e montagem. Com a venda do veículo para o cliente no ponto 3 inicia a fase B crucial no ciclo de vida de veículo.

### 2. Estágio B: período de garantia

A cobertura de garantia fornecida pelos fabricantes de automóveis variam conforme marca e região no mundo. Esta é a fase em que um veículo é submetido a um teste severo e o as promessas dos fabricantes e as expectativas dos clientes são mantidas ou quebradas. Durante esta fase, os reparos de veículos iniciados pelo cliente são realizados por um serviço autorizado de assistência técnica.

Geralmente, há uma lacuna entre a ocorrência de falha no ponto 4 e a percepção pelo cliente da mesma no ponto 5. Essa lacuna será mínima quando a falha afetar gravemente a funcionalidade do veículo. Quando a gravidade é baixa, espera-se que a lacuna entre a ocorrência de falha e o cliente seja alta, com possibilidade de até mesmo passar despercebida. Assim, olhando para a possibilidade de os pontos 4, 5 e 6 serem espalhados ao longo do tempo, os dados de falha resultantes de reclamações de garantia na realidade são muitas vezes classificados como dados censurados. Ou seja, sabemos apenas que a falha real ocorreu em algum momento antes que o cliente informasse, mas o tempo exato ou a quilometragem na falha ainda são desconhecidos. No entanto, para reduzir a complexidade da análise, muitas vezes pode-se supor que a lacuna entre a ocorrência de falha e sua notificação é insignificante.

A duração das atividades nos pontos 7, 8 e 9 que terminam com a devolução do veículo para o cliente após a identificação e correção da(s) falha(s), depende em grande parte da capacidade do processo de reparo. É importante observar que as solicitações de garantia repetidas para o mesmo

modo de falha entre o ponto 9 e o ponto 10 podem ser uma função da (má) qualidade do reparo, além do design e da qualidade de fabricação. A fase B termina com o fim da cobertura da garantia no ponto 10.

### 3. Estágio C: Após o período de garantia.

As falhas no ponto 11 na Fase C podem fornecer informações muito úteis ao fabricante para melhoria geral do veículo. No entanto, as informações sobre essas falhas dependem do cliente que decide reparar na rede de concessionárias autorizadas da marca. Poucos clientes preferem realizar reparos em centros autorizados devido ao alto custo destes serviços especializados. Assim, falhas nesta fase do ciclo de vida são difíceis de capturar. A falha no ponto 12 torna o veículo inoperante ou onde não pode ser reparado com lucro, levando ao fim do ciclo de vida do veículo.

A barra horizontal superior na Figura 8 ilustra que os clientes possuem menor tolerância para a ocorrência de falhas no início do ciclo de vida do veículo do que no final do ciclo de vida. Por exemplo, um cliente está muito preocupado com um pequeno vazamento de transmissão ocorrendo em seu carro de 1 mês de idade, mas pode não estar tão preocupado com problema quando o carro tem 10 anos de idade. A barra horizontal inferior indica que a tolerância do veículo para condições severas de uso no mundo real é alta no início do ciclo de vida e diminui gradualmente conforme o veículo envelhece.

No final do ciclo de vida, muitos componentes são mais suscetíveis a falha devido ao desgaste e envelhecimento. Assim, as informações de falha de origem da garantia são o resultado de um de fatores de influência durante todo o ciclo de vida de um veículo. Para extrair conhecimento de informações impuras contidas nas declarações de garantia, às vezes, algum tipo de refino de dados se torna necessário (RAI; SINGH, 2009).

A análise de confiabilidade durante o período de garantia do veículo é um componente essencial do gerenciamento da cadeia de suprimentos automotiva para aumentar os lucros melhorando o desempenho dos componentes e reduzindo os problemas de confiabilidade em todas as variantes de uma família de veículos. Isto pode contribuir para que os engenheiros automotivos cortem custos, otimizem a utilização de componentes em plataformas semelhantes de veículos, aumentem a eficiência de combustível e modernizem a conectividade de veículos entre outras melhorias (MIKULEC; FELKE; BANGALE, 2017).

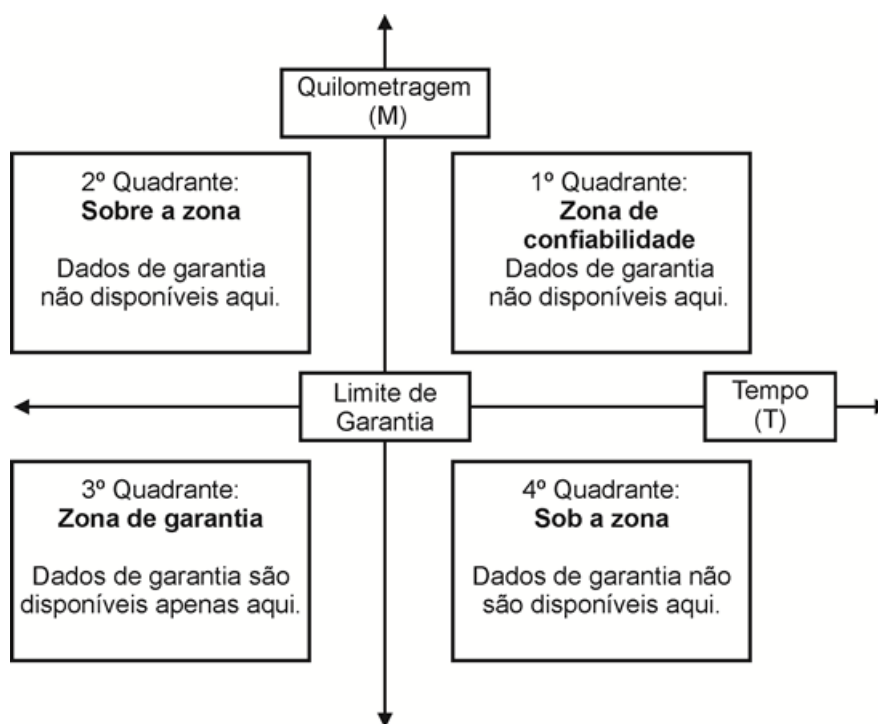
#### 2.1.4 Tipos de Garantia 1D e 2D

De acordo com o número de variáveis cobertas pelas políticas de garantia, elas podem ser categorizadas em unidimensional 1D e bidimensional 2D. Especificamente, uma política de garantia 1D é caracterizado por um intervalo com uma única variável, por exemplo, idade ou uso do produto. Por outro lado, a política de garantia 2D é representada por uma região no plano 2D, geralmente com uma dimensão representando idade e outra denotando uso. Muitos produtos, tais como automóveis, aviões, motores e equipamentos pesados, são vendidos com uma política de garantia 2D. Por exemplo, um novo automóvel pode ser coberto por uma garantia 2D de até 3 anos ou até 60.000 quilômetros, o que quer que ocorra primeiro (WANG; SUZUKI; YAMAMOTO, 2002).

Conforme ilustrado na Figura 9, a garantia 2D, ou bidimensional, é caracterizada como aquela que os seus limites em duas dimensões planas onde usualmente um eixo é simbolizado pelo uso, por

exemplo, quilometragem, quantidade de ciclos, meses em serviço e o outro pela idade (tempo em dias, meses, anos, etc.) Gupta, De e Chatterjee (2017, 2014).

Figura 9 – Garantia 2D



Fonte: (GUPTA; DE; CHATTERJEE, 2014)

As limitações para o uso de dados da garantia são possíveis de serem adequadas nos sistemas de dados de garantia para fins de confiabilidade. Sendo considerados baixo estes custos, fica viável essa alternativa, quando comparado ao custo dos testes de bancadas e acelerados (WANG; XIE, 2018).

## 2.2 TIPOS DE DADOS

### 2.2.1 Dados de Garantia

Em comparação com dados de testes de vida originados em laboratório, os dados de garantia fornecem informações mais confiáveis sobre o tempo de vida dos produtos porque capturam o perfil de uso real e o ambiente operacional (DAI et al., 2017).

Algumas considerações desmotivam a sua utilização como fonte. Por exemplo, a baixa qualidade ou descrições equivocadas das descrições de falhas no sistema de garantia, que pode comprometer a análise de causa raiz das ocorrências. Por outro lado, a escassez da quantidade de falhas ao longo do tempo, quanto mais alta for a confiabilidade do produto, pode comprometer a confiança das estimativas de vida (WU, 2012).

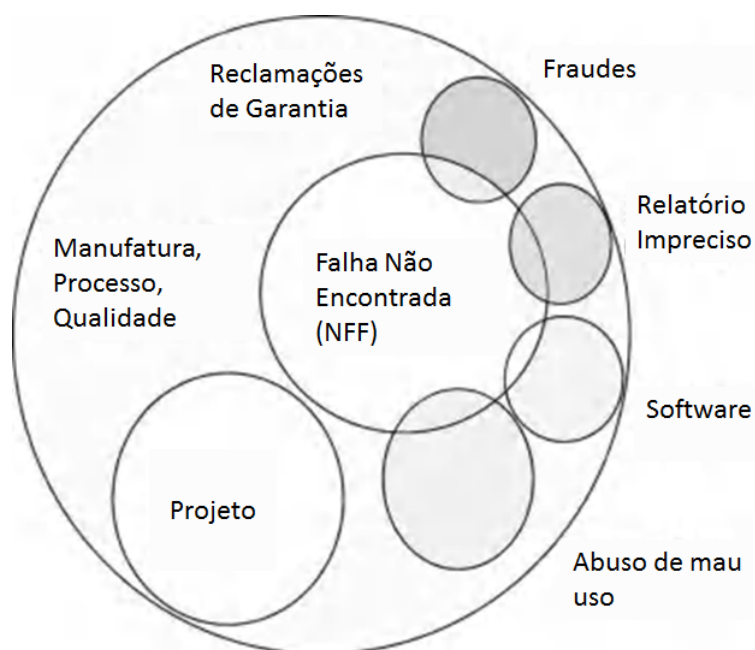
Na maioria dos casos, há uma inadequação dos sistemas de registro de campo, pois é comum estes serem concebidos com o foco financeiro, fiscal, contábil, o que não favorece o registro e o tratamento de informações técnicas necessárias para as análises necessárias nem a extração de dados de tempo de funcionamento para equipamentos que não falharam. Outro aspecto desfavorável para o fabricante, é o fato de diversos clientes possuírem meios próprios de reparos, impedindo que a falha seja registrada

pelo fabricante, ou seja, perde-se parte das informações do histórico da vida do produto (COIT; DEY, 1999).

Os dados de garantia vêm em várias formas, dependendo da indústria, tipo de produto, perfil de uso do cliente, fabricante e muitos outros fatores. Um banco de dados típico de garantia contém uma grande quantidade de informações sobre cada reclamação, no entanto, um profissional de confiabilidade deve entender que além de falhas verdadeiras há uma certa quantidade de ruído nestes dados (LIMON et al., 2016).

A Figura 10 mostra um exemplo de conteúdo do banco de dados de garantia. Os fatores de ruído incluem NFFs (No Fault Found - falha não encontrada) comum na indústria de eletrônicos, reclamações fraudulentas, relatórios imprecisos incluindo falta de dados e uso indevido. Os montantes de dados "ruidosos" variam significativamente com base na indústria, tipo do produto e até mesmo fabricante individual.

Figura 10 – Causas das Reclamações de Garantia



Fonte:(O'CONNOR; KLEYNER, 2012)

Portanto, é importante poder "limpar" os dados distinguindo entre as reclamações "relevantes" e "irrelevantes" e também as categorizar por modos de falha. No entanto, também é importante lembrar que o usuário do produto é afetado por todas as falhas do produto. Independentemente da sua origem, é frequentemente benéfico considerar os dados "tal como estão", sem removê-los estes considerados irrelevante sem antes uma criteriosa análise (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

Ao coletar e analisar dados de falha em campo, os fabricantes podem: prever falhas futuras, definir a necessidade de melhorias no produto ou processo, monitorar o efeito de mudança no processo e condições de uso na confiabilidade, comparar taxas de falha entre produtos similares ou concorrentes. Os dados de garantia ainda descrevem custos, causas das falhas e variações do tipo de reclamação em função do período e local de fabricação (KARIM; YAMAMOTO; SUZUKI, 2001).

Os dados de garantia contêm informações úteis sobre a qualidade e confiabilidade do produto, mas eles são dados geralmente grosseiros, porque eles podem ser agrupados, atrasados, censurados,

faltantes ou vagos. Eles podem, contudo, ser a única fonte que o fabricante tem na identificação de avisos antecipados de anormalidades em seus produtos, proporcionando informações úteis sobre os modos de falha possibilitando a modificação do projeto quando necessária. Além disso, estimar a confiabilidade do produto para decidir sobre política de garantia e as projeções de reclamações de garantia futuras para provisão de recursos financeiros para a garantia (WU, 2013).

A previsão dos produtos de campo que retornam dentro do período da garantia é uma tarefa importante para os fabricantes de ter eficaz gerenciamento da mesma, e uma melhor compreensão sobre a qualidade do produto e confiabilidade no uso real. Tais previsões podem ser feitas com base nos dados recolhidos a partir do campo, que geralmente oferece boa previsão, a longo prazo, mas pode não ser oportuna e estável na fase inicial do período de garantia (HSU; TSENG; CHEN, 2015).

### 2.2.2 Dados Censurados ou Suspensos em Confiabilidade

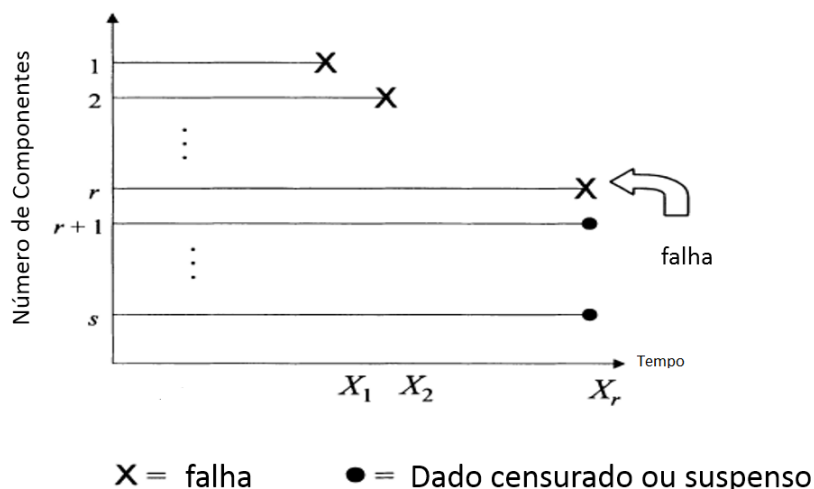
Dados de campo geralmente envolvem censura tipo I, tipo II ou aleatória. A censura de tipo I é quando há um tempo de operação máximo predeterminado. Os dados estão indisponíveis após esse tempo. Componentes que ainda estão operando neste momento são censurados. A censura de tipo II ocorre quando há um número de falha especificado e a coleta de dados é finalizada na chegada dessa falha e a censura aleatória não há pré-determinação (COIT; DEY, 1999).

Os dados censurados são os dados que se observa ou se finaliza os testes antes do fracasso de todos os itens sob observação. Em testes de confiabilidade, há duas formas de censura que geralmente ocorrem (BLISCHKE; KARIM; MURTHY, 2011):

1. Tipo I: n itens são colocados em testes que são interrompidos em um determinado tempo t.
2. Tipo II: n itens são colocados em teste e o teste é interrompido quando um pré-determinado número r de itens falharam.

A Figura 11 representa falhas e dados censurados para um tempo e uma quantidade de falhas r.

Figura 11 – Representação de Dados Completos e Censurados



Fonte: adaptado de (COIT; DEY, 1999)

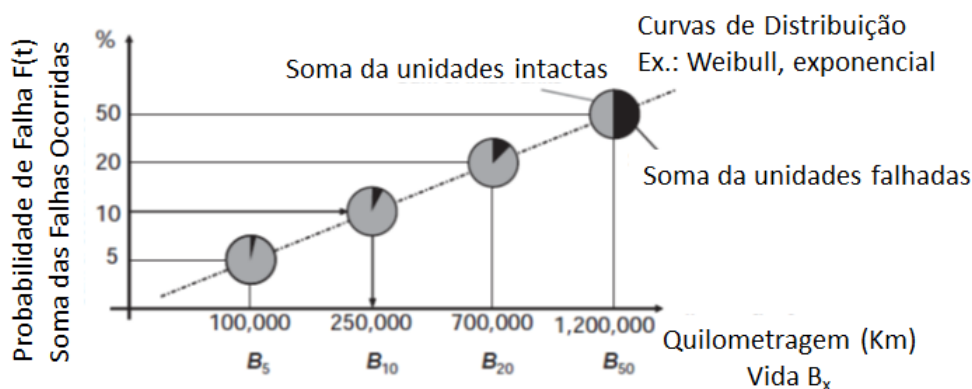
De acordo com diferentes tipos de dados de teste, a influência dos dados censurados deve ser

considerada plenamente para selecionar o método de tratamento apropriado. Os dados censurados não devem ser ignorados na aplicação de engenharia. No testes de vida de fadiga onde os dados censurados foram ignorados, o resultado foi subestimado em graus variados (MA; XIE, 2017).

### 2.3 DADOS DE VIDA DO PRODUTO

O tempo de vida  $B_x$  descreve o ponto no tempo no qual  $x\%$  de todas as peças já falharam. Isto significa que a vida  $B_{10}$  determina o ponto no tempo onde 10% das peças falharam. Na prática, a vida  $B_1$ ,  $B_{10}$  e  $B_{50}$  são valores que servem como medida de confiabilidade do produto (BERTSCHE, 2008). A Figura 12 descreve o conceito de vida  $B_{10}$ .

Figura 12 – Vida  $B_{10}$



Fonte: (BERTSCHE, 2008)

As 4 principais fontes de dados de vida de produtos e componentes para utilização são (MARCORIN; ABACKERLI, 2002):

1. Componentes-padrão: aparecem em manuais especializados. São, geralmente, componentes empregados em grande escala nos meios industriais e que têm comportamento de falha e características de vida conhecidos que, na média, são independentes do fabricante como rolamentos, anéis de vedação, resistores, capacitores. Sua vantagem é o custo baixo para obtenção, porém por se tratar de uma média, seus valores nem sempre correspondem com a aplicação do cliente.

2. Catálogos de fabricantes: bem semelhante ao componente-padrão, com as mesmas vantagens e desvantagens.

3. Testes de bancadas: ensaios feitos especificamente para o desenvolvimento do produto, podem para alguns casos ser uma boa fonte de dados pois se conhece as condições de testes. Porém, os custos são desfavoráveis e requer um planejamento para execução, ou seja, demanda tempo.

4. Falhas de garantia e de campo: tem vantagens de ter baixo custo de aquisição das informações, considerando a existência de um sistema de informação de garantia estabelecido e retrata as condições reais de uso do equipamento pelo cliente.

## 2.4 CONFIABILIDADE

A confiabilidade é a probabilidade de que um item desempenhe suas funções durante um determinado período de tempo sem falha. Esta definição contém quatro elementos. Primeiro, a confiabilidade é uma probabilidade de não falhar e, portanto, é um número entre zero e um, o que nos permite calcular a confiabilidade de forma quantitativa. O segundo elemento trata da "função" e da "falha", que são dois termos intimamente ligados; uma falha significa que um dispositivo não pode desempenhar sua função satisfatoriamente. O terceiro elemento a confiabilidade depende das condições de operação, em outras palavras um dispositivo é confiável mas pode não ser confiável sob condições mais severas. Finalmente, a confiabilidade geralmente varia com o tempo, então o tempo até a falha é uma variável aleatória primária (JIANG, 2015).

### 2.4.1 Engenharia da Confiabilidade - Benefícios e Aplicação

A teoria da confiabilidade lida com o uso interdisciplinar de probabilidade, estatística e modelagem estocástica, combinada com conhecimentos de engenharia sobre o projeto e a compreensão científica dos mecanismos de falha, para estudar os vários aspectos da confiabilidade. Como tal, engloba questões como (MURTHY; BLISCHK, 2000):

1- Modelagem da confiabilidade - A modelagem da confiabilidade lida com a construção de modelos para obter soluções para problemas de previsão, estimar e otimizar a sobrevivência ou desempenho de um sistema não confiável, o impacto da falta de confiabilidade e ações para mitigar esse impacto.

2- Análise e otimização da confiabilidade - A análise da confiabilidade pode ser dividida em duas grandes categorias:

2.1 Qualitativa - O primeiro destina-se a verificar os vários modos de falha e causas que contribuem à falta de confiabilidade de um produto ou sistema.

2.2 Quantitativa - O último usa dados de falhas reais em conjunto com modelos matemáticos adequados para produzir estimativas quantitativas de confiabilidade do produto ou do sistema.

3- Engenharia da confiabilidade - A engenharia de confiabilidade lida com o projeto e construção de sistemas e produtos, tendo em conta a falta de confiabilidade das suas partes e componentes. Inclui também testes e programas para melhorar a confiabilidade. Uma boa engenharia resulta em um produto final mais confiável.

4-Ciência da confiabilidade - A ciência da confiabilidade preocupa-se com as propriedades dos materiais e as causas da deterioração levando a falhas de peças e componentes.

5-Tecnologia da confiabilidade - Ele também lida com o efeito da fabricação processos (por exemplo, fundição, recozimento) na confiabilidade da peça ou componente produzido.

6-Gestão da confiabilidade - A gestão da confiabilidade lida com os vários problemas de gestão no contexto da gestão do projeto, fabricação e / ou operação de produtos e sistemas confiáveis. Aqui a ênfase está no ponto de vista do negócio, pois a falta de confiabilidade traz consequências no custo, no tempo desperdiçado, e, em certos casos, o bem-estar de um indivíduo ou mesmo a segurança de uma nação.

Os objetivos da engenharia da confiabilidade, segundo (O'CONNOR; KLEYNER, 2012), na ordem de prioridade, são:

- 1 Aplicar conhecimentos de engenharia e técnicas especializadas para prevenir ou reduzir a probabilidade ou frequência de falhas.
- 2 Identificar e corrigir as causas das falhas que ocorrem, apesar dos esforços para evitá-las.
- 3 Determinar formas de lidar com falhas que ocorrem, se suas causas não tiverem sido corrigidas.
- 4 Aplicar métodos para estimar a provável confiabilidade de novos projetos e para analisar dados de confiabilidade.

## 2.5 FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE E ESTATÍSTICA

Conforme O'Connor, Modarres e Mosleh (2016), variáveis aleatórias são classificadas como discretas ou contínuas. Em uma distribuição discreta, a variável aleatória pode assumir um número distinto ou contável de valores possíveis, como o número de demandas por falha. Em uma distribuição contínua, a variável aleatória não é restrita a valores possíveis distintos, como a distribuição do tempo até a falha.

### 2.5.1 Função Densidade de Probabilidade - PDF

Uma função de densidade de probabilidade (pdf), denotada como  $f(t)$  é qualquer função que seja sempre positiva e tenha uma área unitária conforme equação 1 para variáveis contínuas e equação 2 para variáveis discretas:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)dt = 1 \quad (1)$$

Sendo  $t$  uma variável contínua.

$$\sum_k f(k) = 1 \quad (2)$$

Sendo  $k$  uma variável discreta.

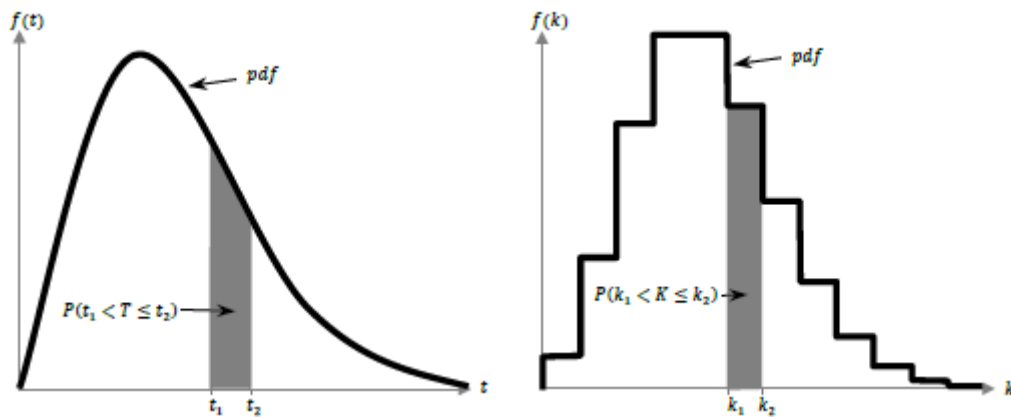
A probabilidade de um evento ocorrer entre os limites  $a$  e  $b$  é a área sob a pdf conforme equação 3 para variáveis contínuas e equação 4 para variáveis discretas:

$$P(a \leq t \leq b) = \int_a^b f(t)dt = F(b) - F(a) \quad (3)$$

$$P(a \leq k \leq b) = \sum_{i=a}^b f(k) = F(b) - F(a - 1) \quad (4)$$

A Figura 13 ilustra no lado esquerdo com uma pdf para uma distribuição contínua e ao lado direito com uma distribuição discreta a probabilidade de um evento ocorrer em intervalos.

Figura 13 – Curva PDF



Fonte: (O'CONNOR; MODARRES; MOSLEH, 2016)

### 2.5.2 Função Distribuição Acumulada - CDF

A função de distribuição acumulada (cdf), denotada por  $F(t)$ , é a probabilidade do evento aleatório ocorrer antes de  $t$ ,  $P(T \leq t)$  conforme equação 5. Para uma cdf discreta, a altura de cada barra é o valor da pdf  $f(k_i)$  conforme equação 6.

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(x) dx \quad (5)$$

Sendo  $T$  uma variável contínua.

$$F(k) = P(K \leq k) = \sum_{k_i \leq k} f(k_i) \quad (6)$$

Sendo  $K$  uma variável discreta.

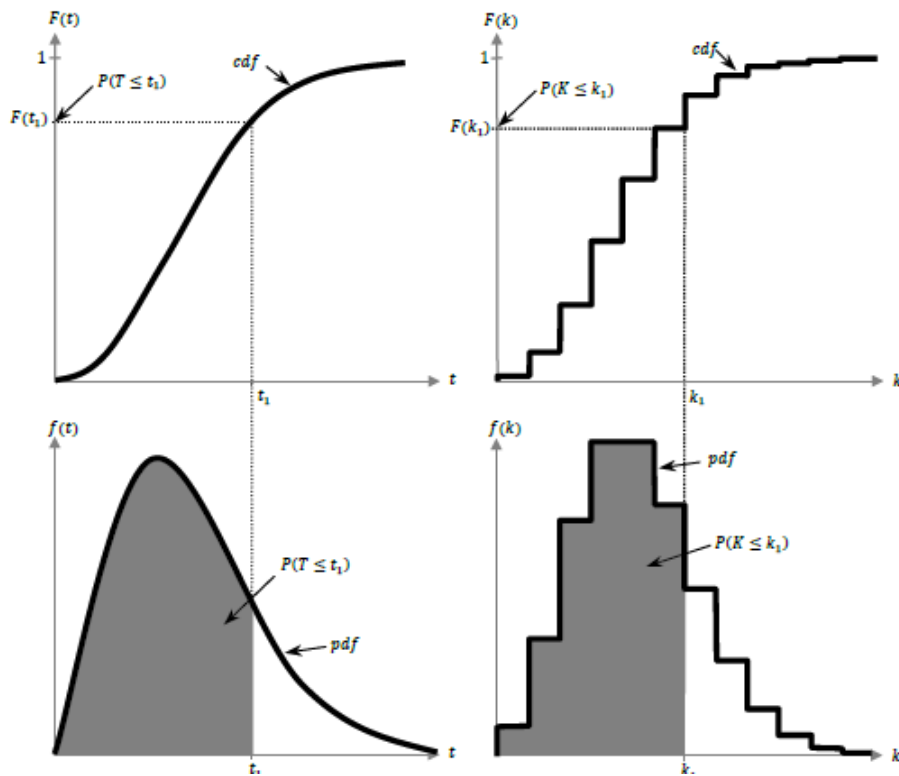
A cdf pode ser usada para encontrar a probabilidade dos eventos aleatórios que ocorrem entre intervalos conforme equação 7 para variáveis contínuas e conforme equação 8 para variáveis discretas.

$$PF(a \leq T \leq b) = \int_a^b f(t) dt = F(b) - F(a) \quad (7)$$

$$F(a \leq K \leq b) = \sum_{i=a}^b f(k) = F(b) - F(a - 1) \quad (8)$$

A Figura 14 ilustra no lado esquerdo a curva cdf contínua sobre sua respectiva curva pdf. Da mesma forma, ao lado direito a curva cdf discreta sobre sua respectiva curva pdf. As áreas hachuradas destacadas demarcam o intervalo da probabilidade alvo. Observa-se que a função distribuição acumulada (cdf) é a integral da função densidade (PDF) (O'CONNOR; MODARRES; MOSLEH, 2016).

Figura 14 – Curva CDF



Fonte: (O'CONNOR; MODARRES; MOSLEH, 2016)

### 2.5.3 Função Confiabilidade - R(t)

A função de confiabilidade, também conhecida como função de sobrevivência, é denotada como  $R(t)$ , para variáveis contínuas conforme a equação 9 e  $R(k)$  para variáveis discretas conforme a equação 11. É a probabilidade de que o evento aleatório (tempo de falha) ocorra após o tempo  $t$ , conforme equação 10 para variáveis contínuas e para o tempo  $k$ , conforme equação 12 para variáveis discretas (O'CONNOR; MODARRES; MOSLEH, 2016).

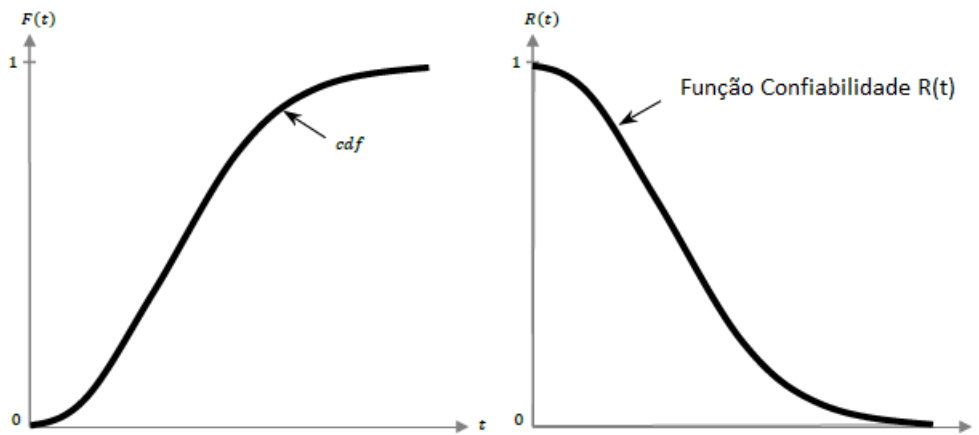
$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \quad (9)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (10)$$

$$R(k) = P(T > k) = 1 - F(k) \quad (11)$$

$$R(k) = \sum_{i=k+1}^{\infty} f(k_i) \quad (12)$$

Figura 15 – Função Confiabilidade R(t)



Fonte: (O'CONNOR; MODARRES; MOSLEH, 2016)

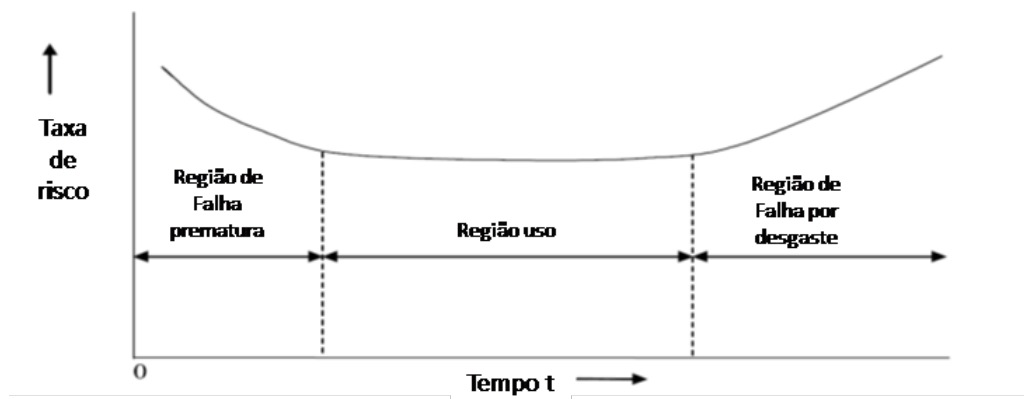
#### 2.5.4 Taxa de Falhas - $h(t)$

A função taxa de falha, denominada como  $h(t)$  conforme a equação 13, é a probabilidade condicional de um componente falhar em um intervalo de tempo pequeno, dado que ele sobreviveu desde o tempo zero até o início do intervalo de tempo. Para o caso de variáveis contínuas, a probabilidade de um item falhar em um intervalo de tempo dado que o item estava funcionando no tempo  $t$  é :

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (13)$$

As falhas podem ser classificadas em relação ao tempo de acordo com os mecanismos que as originaram. O comportamento da taxa de falha pode ser representado graficamente por meio da curva conhecida como curva da banheira conforme ilustrado na Figura 16, e que possuem três fases diferentes: falhas prematuras (mortalidade infantil), vida útil (região de uso normal, falhas aleatórias) e velhice (falhas por desgaste). A região de mortalidade infantil é caracterizada por elevadas taxas de falhas e rápida queda com o tempo. A região de vida útil apresenta taxa de falha praticamente constante e a região de velhice, de forma intuitiva, é caracterizada por taxas de falha crescente (DHILLON, 2007; DURIVAGE, 2015).

Figura 16 – Curva da Banheira

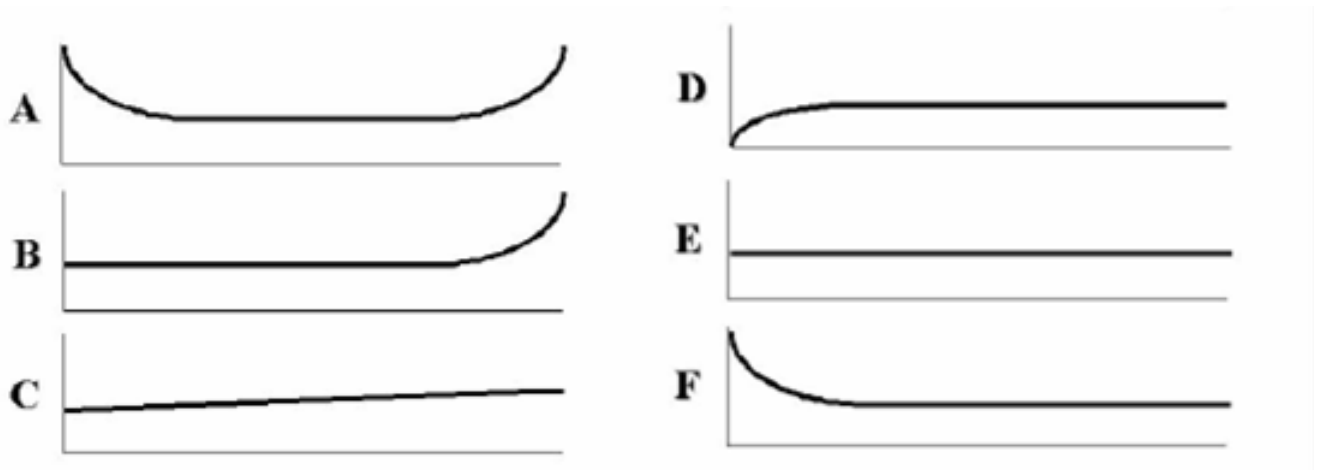


Fonte: (DHILLON, 2007)

Existem sistemas particulares nos quais podem prevalecer uma das três fases da curva da banheira descritas. Por exemplo, no estudo do comportamento da taxa de falhas de softwares, prevalece as falhas prematuras, não se considera de envelhecimento. Mas não se deve confundir, do ponto de vista da confiabilidade, o término da vida útil com a obsolescência pelo mercado (LAFRAIA, 2001).

A curva da banheira ainda que seja muito utilizada, foi considerada um padrão de representação até o início da década de 70. Devido ao desenvolvimento de tecnologias e a evolução dos equipamentos, verificou-se a existência de outros tipos de comportamento conforme ilustra a Figura 17, (MOUBRAY, 1997).

Figura 17 – Padrões de Falhas



Fonte: (MOUBRAY, 1997)

O padrão de falha A mostrado na Figura 17 é chamado de curva da banheira conforme Figura 16.

Já o padrão B representa uma taxa de falhas aproximadamente constante, com um aumento lento seguido por um período de desgaste.

O padrão C traduz uma taxa de falhas com crescimento vagaroso, não apresentando desgaste ao final da vida útil.

O padrão D mostra que a baixa taxa de falhas no início da vida é seguida por um patamar permanente.

O padrão de falha E é característico de computadores e outros hardwares de componentes eletrônicos. Na maioria das vezes, este tipo de componente apresenta falhas aleatórias.

O padrão F inicia com uma alta taxa de falhas no período mortalidade infantil mas tende a estabilizar-se rapidamente em torno de um valor aproximadamente constante.

Estudos realizados na aviação civil demonstram que 68% das falhas obedecem ao padrão F e 14% ao padrão E ficando os outros com índices bem menores. Não se pode afirmar se estes mesmos percentuais se repetem na indústria, porém, sabe-se que, quanto maior a complexidade do equipamento, maiores as chances de predominância dos padrões E e F (MOUBRAY, 1997; LAFRAIA, 2001).

## 2.6 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

As distribuições de probabilidade são usadas para modelar eventos aleatórios para os quais o resultado é incerto. A distribuição da probabilidade de falha em momentos diferentes é modelada por uma distribuição de probabilidade. Os parâmetros de uma distribuição são as variáveis que precisam ser definidas para caracterizar e especificar completamente a distribuição. É comum os parâmetros serem classificados pelo efeito que eles têm nas distribuições. Os parâmetros de forma definem a forma da distribuição, os parâmetros de escala esticam a distribuição ao longo do eixo variável aleatório e os parâmetros de localização deslocam a distribuição ao longo do eixo variável aleatório. É importante ressaltar que as nomenclaturas dos parâmetros para uma distribuição podem mudar dependendo da fonte e convenção adotada nos trabalhos acadêmicos, sendo conveniente sempre confirmar a parametrização utilizada. Entender o efeito de alterar o valor do parâmetro de uma distribuição pode ser uma tarefa difícil (O'CONNOR; MODARRES; MOSLEH, 2016).

Nas próximas sub-seções, serão apresentadas os tipos de distribuições mais utilizados nos estudos de confiabilidade, embora existam outras distribuições, foram abordadas as que foram utilizadas neste trabalho.

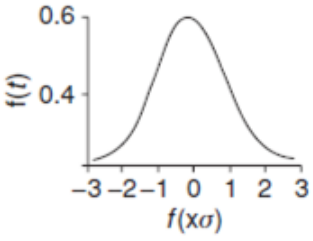
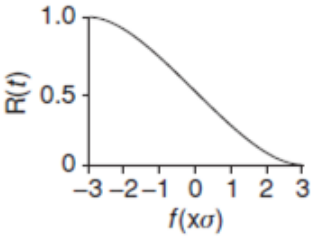
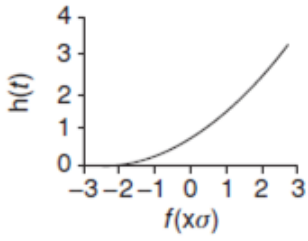
### 2.6.1 Distribuição Normal

A distribuição normal é frequentemente usada para modelar a distribuição de características e outras medidas de amostragem variáveis. É simétrica e possui um único modo. Pelo teorema do limite central, características envolvendo uma soma de muitas outras variáveis independentes são aproximadamente distribuídas normalmente. Isto significa que os dados têm uma tendência central, em que a maior parte da população encontra-se dentro de vários desvios padrão de sua média (BIROLINI, 2014).

A distribuição normal é usada para aproximar uma ampla variedade de processos e comportamentos. Apesar de sua ampla popularidade, a distribuição normal é provavelmente a distribuição mais incorretamente usada. No controle de qualidade, no controle de processos são modelados como uma sequência de dados estacionários (constantes) e variáveis aleatórias. No mundo real, no entanto, os processos possuem variações. Os ruídos são os resultados de uma série de fatores incontroláveis, resultando em excessivas e imprevisíveis variações de processo. Conseqüentemente, as características do processo são frequentemente correlacionados e perturbados por mudanças aleatórias no processo, o que invalida quaisquer suposições distribuídas (WASSERMAN, 2002).

Uma distribuição normal é representada por dois parâmetros: média e desvio padrão. A média é representada por  $\mu$  e o desvio padrão é representado por  $\sigma$ . Na Figura 18, a função densidade de probabilidade  $f(t)$ , também chamada de PDF, a função confiabilidade  $R(t)$  e a função taxa de falha,  $h(t)$  para uma distribuição de probabilidade normal são representadas graficamente, com suas respectivas equações (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

Figura 18 – Distribuição Normal

Função Densidade de Probabilidade $f(t)$	Função Confiabilidade $R(t) = 1 - F(t)$	Função Taxa de Falha $h(t) = f(t)/R(t)$
		
$f(t) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]$	$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$	$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{expressão geral})$

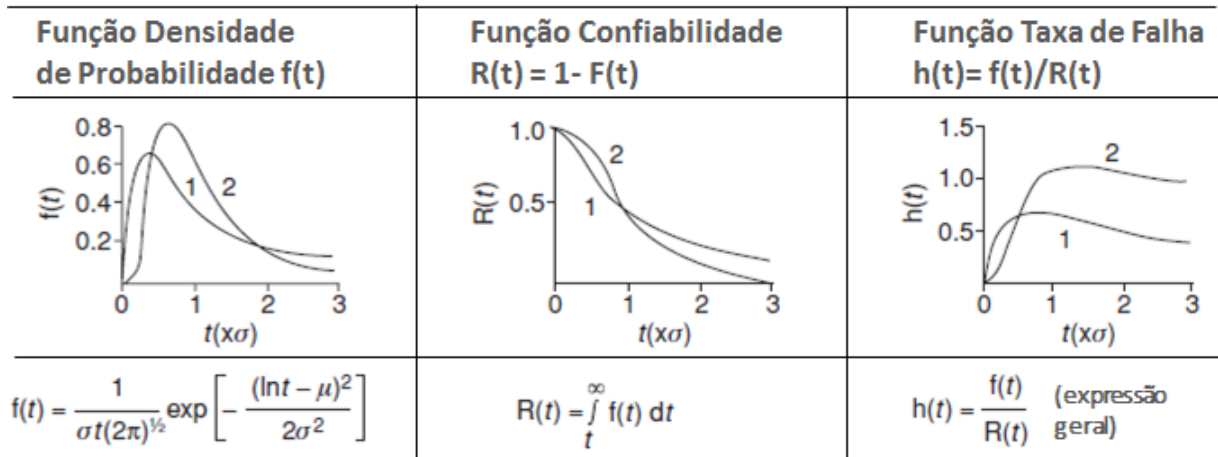
Fonte: adaptado de (O'CONNOR; KLEYNER, 2012)

### 2.6.2 Distribuição Lognormal

Se o logaritmo dos dados é normalmente distribuído, então a distribuição lognormal é apropriada. A distribuição lognormal descreve um intervalo de formas de distribuição. É uma distribuição versátil e adequada para distribuições em forma de decaimento enviesadas ou exponenciais. A distribuição lognormal é apropriada quando a variação é o produto multiplicativo de muitas pequenas perturbações. Todas as contribuições para a variação são positivas. Valores que se ajustam a uma distribuição lognormal são todos positivos. A distribuição é definida de zero a infinito positivo. Tempo de recuperação e tempos de atraso são exemplos de medidas que, geralmente, se ajustam bem a uma distribuição lognormal (BIROLINI, 2014).

A distribuição lognormal, assim como a normal, é representada por dois parâmetros: média e desvio padrão. A média é representada por  $\mu$  e o desvio padrão é representado por  $\sigma$ . Na Figura 19, a função densidade de probabilidade  $f(t)$ , também chamada de PDF, a função confiabilidade  $R(t)$  e a função taxa de falha,  $h(t)$  para uma distribuição de probabilidade lognormal são representadas graficamente, com suas respectivas equações (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

Figura 19 – Distribuição Lognormal



Fonte: adaptado de (O'CONNOR; KLEYNER, 2012)

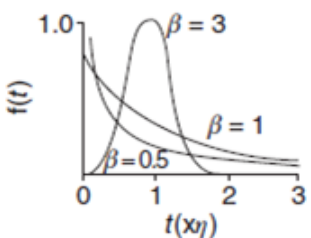
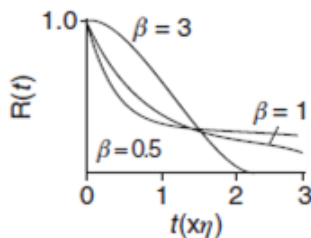
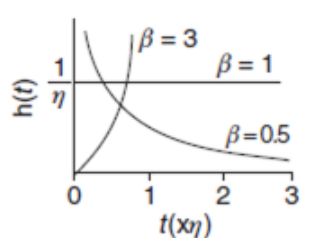
### 2.6.3 Distribuição Weibull

Em engenharia de confiabilidade, a análise de dados de probabilidade Weibull é provavelmente a técnica mais amplamente utilizada de processamento e interpretação de dados de vida. Uma das muitas vantagens é a flexibilidade da distribuição de Weibull, a fácil interpretação dos parâmetros de distribuição e sua relação com as taxas de falhas e o conceito de curva de banheira (BIROLINI, 2014).

A versão mais simples da distribuição Weibull é o modelo de 2 parâmetros. De acordo com o seu nome, esta distribuição é definida por dois parâmetros. Sendo  $\beta$  o parâmetro que descreve a inclinação da linha no gráfico Weibull, também referido como parâmetro de forma. Outro parâmetro é a vida característica  $\eta$ , sendo o tempo em que 63,2 % da população do produto irá falhar, também referida como um parâmetro de escala. O terceiro parâmetro, caracterizando uma distribuição Weibull de 3 parâmetros, ou Weibull 3p, é o de localização  $\gamma$ , que representa a vida mínima do produto. Dependendo do comportamento de vida do produto, este valor é muito baixo, sendo desconsiderado, caracterizando, assim, uma distribuição Weibull 2p com os parâmetros de  $\beta$  (forma) e  $\eta$  (escala) (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

Na Figura 20, a função densidade de probabilidade  $f(t)$ , conhecida como PDF, a função confiabilidade  $R(t)$  e a função taxa de falha,  $h(t)$  para uma distribuição de probabilidade Weibull são representadas graficamente, com suas respectivas equações.

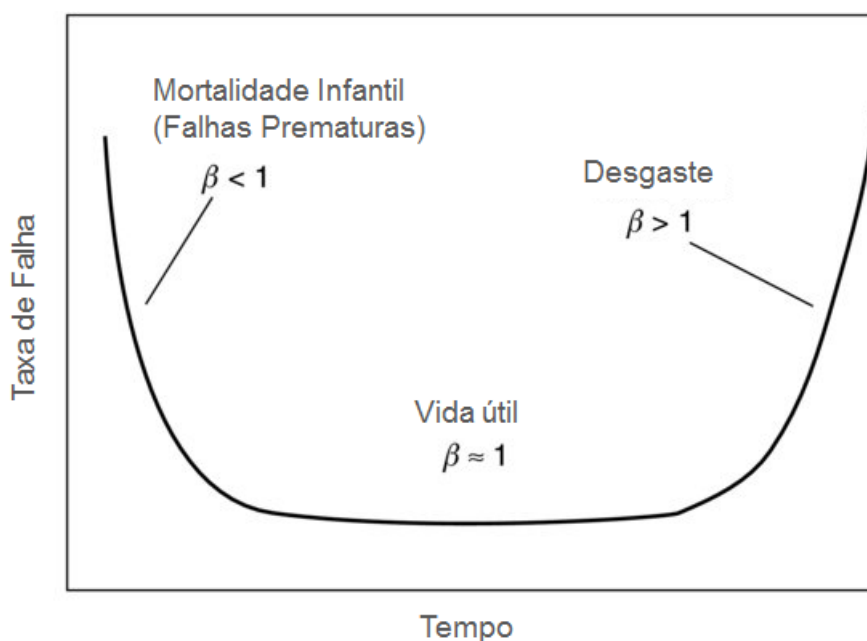
Figura 20 – Distribuição Weibull

Função Densidade de Probabilidade $f(t)$	Função Confiabilidade $R(t) = 1 - F(t)$	Função Taxa de Falha $h(t) = f(t)/R(t)$
		
$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t-\gamma)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$	$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]$	$h(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta}$

Fonte: adaptado de (O'CONNOR; KLEYNER, 2012)

Na Figura 21, é mostrado a relação das fases da curva da banheira com a variação de  $\beta$  para uma distribuição de Weibull. A fase de mortalidade infantil é caracterizada com  $\beta < 1$ , a fase da vida útil  $\beta$  fica praticamente constante com o valor em torno de 1 e fase de desgaste o valor de  $\beta > 1$ .

Figura 21 – Curva da Banheira e a Distribuição Weibull



Fonte: (O'CONNOR; KLEYNER, 2012)

Conforme afirma Tudor e Watkins (2016), os resultados mostram que o efeito de selecionar a distribuição de confiabilidade correta (ou a "melhor" distribuição candidata entre um campo de distribuição de confiabilidade) em estimativas de probabilidades de falha é frequentemente relativamente pequeno.

## 2.7 MÉTODOS DE ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS

As duas técnicas mais comumente utilizadas para as estimativas de parâmetros com de análise computadorizada de dados são: mínimos quadrados e o estimador de máxima verossimilhança (MLE -

Maximum Likelihood Estimator) (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

### 2.7.1 Método dos Mínimos Quadrados

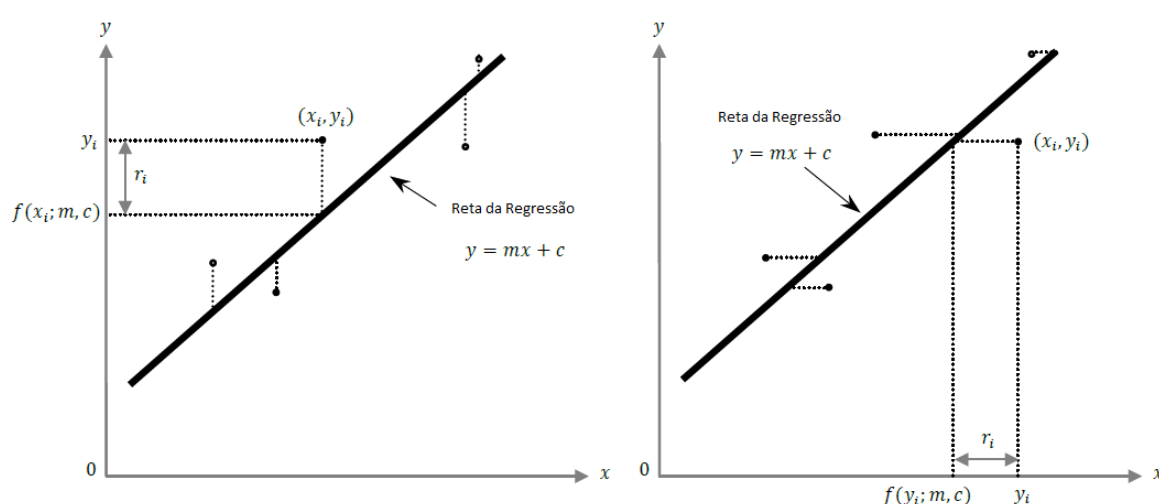
Este método é usado para estimar a linha de melhor ajuste de parâmetros de plotagem. Uma das maneiras de desenhar a linha através do conjunto de pontos de dados é executar uma regressão linear. Esta linha deve ser matematicamente ajustada a um conjunto de pontos de dados de forma que a soma dos quadrados dos desvios verticais ou horizontais dos pontos para a linha seja minimizada. Quando a relação entre duas variáveis,  $x$  e  $y$  é assumida como linear ( $y = mx + c$ ), uma estimativa dos parâmetros da linha pode ser obtida de  $n$  pontos de dados de amostra, usando a regressão linear por mínimos quadrados médios. O método dos mínimos quadrados minimiza o quadrado do resíduo (O'CONNOR; MODARRES; MOSLEH, 2016).

$$S = \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (14)$$

Uma das vantagens deste método é que ele pode fornecer uma boa medida para o ajuste do linha para os pontos de dados. Essa medida é conhecida como o coeficiente de correlação. No caso da análise de dados de vida, é uma medida para a força da relação linear entre as classificações medianas (valores do eixo Y) e a falha dados de tempo (valores do eixo X) (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

O alinhamento da reta sobre os pontos, tal que a soma das diferenças ao quadrado dos pontos à reta, conforme equação 14, seja minimizada pode acontecer no eixo vertical (RRY), conforme gráfico da esquerda da Figura 22, ou no eixo X (RRX), conforme gráfico da direita da Figura 22, este último sendo utilizado mais comumente por proporcionar um menor erro no resultado (O'CONNOR; MODARRES; MOSLEH, 2016).

Figura 22 – Estimativas de Parâmetros por Regressão



Fonte: (O'CONNOR; MODARRES; MOSLEH, 2016)

### 2.7.2 Método da Máxima Verossimilhança

O objetivo do método de estimação de parâmetros de máxima verossimilhança é determinar os parâmetros que maximizam a probabilidade do ajuste de dados da amostra da distribuição. Este método procura encontrar os mais prováveis valores de parâmetros de distribuição para um conjunto de dados, maximizando o valor do que é chamado de probabilidade função. Do ponto de vista estatístico, o método de máxima verossimilhança é considerado mais robusto (com algumas exceções) e gera estimadores com boas propriedades estatísticas. Em outras palavras, os métodos MLE são versáteis e se aplicam à maioria dos modelos e a diferentes tipos de dados (censurados e não censurados) (BIROLINI, 2014).

Comparando o uso de métodos dos mínimos quadrados e o MLE, observa-se que o método dos mínimos quadrados geralmente produzem parâmetros de distribuição diferentes do MLE, portanto, é uma questão lógica perguntar qual método deve ser aplicado com o tipo de dados. Com base em vários estudos a regressão é geralmente a que funciona melhor para os conjuntos de dados com amostras menores que 30 e para conjuntos de dados que contém apenas falhas. Para amostras de dados maiores que 30, contendo ou não dados censurados, o método MLE geralmente fornece melhores resultados. No caso em que não está claro qual método forneceria resultados mais precisos, é recomendável executar os dois métodos e comparar os resultados (O'CONNOR; MODARRES; MOSLEH, 2016).

## 2.8 INTERVALO DE CONFIANÇA

Como os resultados da análise de dados da vida são estimativas baseadas nos tempos de vida observados de uma amostra de unidades, há incerteza nos resultados devido aos tamanhos de amostra. Limites de confiança (também chamados de intervalos de confiança) são usados para quantificar essa incerteza devido ao erro de amostragem, expressando a confiança de que um intervalo específico contém a quantidade de interesse. O intervalo de confiança nos dá um intervalo de valores reais para um parâmetro desconhecido, já os limites são as fronteiras que delimitam is intervalos de confiança (JIANG, 2015).

Os limites de confiança podem ser unilateralmente (one sided), inferior ou superior ou bilateralmente (two sided). Para distribuições contínuas, os cálculos de limites de confiança envolvem a área sob a curva pdf correspondente à porcentagem de confiança desejada para a solução particular. Quando usamos limites de confiança de dois lados (ou intervalos), significa que dado um nível de confiança, o real valor estará entre estes limites. Enquanto que no limite unilateral inferior teremos o valor percentual de certeza que o valor obtido é maior do que a linha limite plotada (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

Numa visão geral da teoria aplicada para os limites de confiança com dados suspensos, temos como dos principais métodos, a matriz de Fisher amplamente utilizada nos softwares de confiabilidade, podendo ser do tipo I (função do tempo) ou tipo II (função da confiabilidade). Há também o método beta binomial e o da razão da verossimilhança (WASSERMAN, 2002).

## 2.9 PROCESSO DE ESCOLHA DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE

Na engenharia de confiabilidade é frequentemente necessário determinar qual a melhor distribuição que se ajusta aos dados e derivar estimativas dos parâmetros de distribuição, porém este processo é abrangente e, nem sempre, aparente. Geralmente começa com a avaliação das distribuições disponíveis com base em quão bem elas se ajustam aos dados, ou seja, a qualidade matemática do ajuste, sendo comumente aplicado testes estatísticos de aderência. No entanto, em aplicações de engenharia ter o melhor ajuste matemático não é suficiente, uma vez que a distribuição estatística escolhida também deve ser apropriada para a natureza física das falhas observadas. As considerações de engenharia devem incluir a maturidade do sistema e sua classificação na curva da banheira, os tipos de falhas, considerando seus modos de falha e a física da falha, e, por fim, o tamanho da amostra e tamanho da população que ela representa. Portanto, ambas as abordagens, estatística e de engenharia, precisam ser cuidadosamente consideradas antes de selecionar o melhor modelo matemático para análise os dados (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

Dos testes de aderência mais comuns neste processo de análise de confiabilidade são os testes Qui-quadrado, Anderson-Darling (A-D) e Kolmogorov-Smirnov (K-S). Para Blischke, Karim e Murthy (2011) estes testes são úteis na construção de modelos quando a distribuição que está sendo testada para o ajuste for completamente especificada, mas quando os parâmetros forem desconhecidos e estimados a partir dos dados, boas aproximações poderão ser obtidas. Para uma terceira situação, onde há maior complexidade dos dados, como por exemplo, dados incompletos, censurados, complexidade de populações, misturas ou distribuições multi-modal, o resultado do teste de aderência pode ser usado somente para comparar ajustes de vários modelos candidatos e para selecionar um ou mais como melhores que outros, ou ocasionalmente como melhores.

## 2.10 MÉTODOS QUE UTILIZAM DADOS DE GARANTIA EM CONFIABILIDADE

Foi realizado uma revisão da bibliografia, utilizando conceitos de uma revisão sistemática da literatura, a respeito dos métodos desenvolvidos para uso de dados de garantia em estudos de confiabilidade. Após avaliação de artigos na fase inicial da pesquisa, ou seja, fase exploratória, foram definidas as palavras-chaves e suas respectivas combinações: "dados de garantia", "dados censurados", "confiabilidade" e "automotiva".

Com estas combinações, realizou-se as buscas nas bases (SCOPUS, 2019b) e (SCIENCE, 2019b). Dos 1536 documentos retornados, foram aplicados os critérios de seleção conforme definido no protocolo de pesquisa sendo selecionados 90 trabalhos que foram considerados para a pesquisa. Desta seleção, listou-se os principais trabalhos, onde os métodos por eles propostos ou discutidos foram classificados em duas áreas: previsão de confiabilidade e previsão de garantia.

Estas foram segmentadas em sub-áreas as quais para cada uma delas foram identificadas o método aplicado, além da aplicação na área veicular automotiva, entre outras características. O quadro 01 sumariza esta classificação com a área, sub-área, método aplicado ou discutido, autor e ano da publicação.

Quadro 1 – Métodos de Previsão de Confiabilidade e Garantia (continua)

Área	Sub-área	Método	Autor/ano
Previsão de Confiabilidade	Sistema reparáveis, censurados por intervalos	NHPP /MCEM	(PENG et al., 2017)
		NHPP	(MARSHALL; CHUKOVA, 2010)
		Taxa de uso, degradação, 2D, SEM X MLE	(DAI et al., 2017)
		Comportamento entre Km X Idade- Não paramétrico, 2D	(ANASTASIADIS; ANDERSON; CHUKOVA, 2013) .
		Não paramétrico, cópula, 2D	(GUPTA; DE; CHATTERJEE, 2017) .
	Dados censurados de garantia	FPM-estrutura para modelagem de falha	(REGATTIERI; MANZINI; BATTINI, 2010)
		Taxa de uso, Variáveis aleatórias	(LIMON et al., 2016)
	Modo de Falha	Mineração de texto	(RAJPATHAK; DE, 2016)
	Dados de campo e testes de laboratórios	Bayesian Framework	(HSU; TSENG; CHEN, 2015)
	Sem uso de dados de garantia)	Sem dados de vendas	Distribuição Mista e EM
SEM			(ZHANG; YE; XIE, 2014)
Dados censurados	SEM	(YE; NG, 2014)	
Monitoramento	Estimativa de parâmetros heurísticos	(NACHLAS; KUMAR, 1993)	
Sem dados censurados	Lognormal	(HONARI; DONOVAN, 2007)	
	Afirma que não é necessário	(ALAM; SUZUKI, 2009)	

Quadro 1: Métodos de Previsão de Confiabilidade e Garantia (conclusão)

Área	Sub-área	Método	Autor/ano
Previsão de Garantia		Copula	(ANDERSON; CHU-KOVA; HIROSE, 2017)
	Duas dimensões	Mistura/regiões ótimas demarcadas	(GUPTA; DE; CHATTERJEE, 2014)
		NHPP	(MAJESKE, 2007)
	Dados incompletos	Teste de normalidade e uso de dados	(RAI; SINGH, 2003)
	Sazonalidade da garantia e severidade de falhas	Não paramétrica, MLE, iteração TurnBull	(RAI; SINGH, 2006)
	Dados censurados	Regressão sequencial	(YANG; ZAGHATI, 2002)
		RGA Modificado	(BETTINI; GIAN-SANTE; TUCCI, 2007)
	Sem dados de vendas	NHPP / MLE	(WANG; SUZUKI; YAMAMOTO, 2002)
	Monitoramento	Cusums/ Markov	(LAWLESS; CROWDER; LEE, 2012)

Fonte: Autor

Na área de previsão de confiabilidade, foram segmentadas 9 sub-áreas. Para a sub-área "sistemas reparáveis, censurados por intervalos", o método apresentado por Peng et al. (2017) é o método NHPP - Processo Não Homogêneo de Poisson, combinado com MCEM- Monte Carlo-Expectation Maximization, assim como o de Marshall e Chukova (2010) que também utilizam o método NHPP, ambos sem aplicação na área automotiva, não foram considerados para aplicação neste trabalho por usarem censura em intervalos, que não é o usualmente utilizado na indústria automotiva e por não terem aplicação direta na área de estudo (automotiva).

Na sub-área "dados censurados de garantia", Dai et al. (2017) utiliza numa aplicação automotiva um modelo complexo de tempo de falha acelerado para investigar a taxa de uso com degradação e apresenta um comparativo entre os métodos de estimativa de parâmetros SEM (Stochastic Expectation Maximization) e MLE- estimativa por máxima verossimilhança. Já o trabalho acadêmico de Anastasiadis, Anderson e Chukova (2013), e o de Gupta, De e Chatterjee (2017), com aplicação automotiva, apresentam metodologias não paramétricas em aplicação de garantia 2D (duas dimensões - tempo e uso). Também com um exemplo na área automotiva, Regattieri, Manzini e Battini (2010) apresentam uma estrutura para modelagem de falha. Já Limon et al. (2016) explora os comportamentos de taxa de uso dos dados atuais de uma aplicação veicular real para gerar dados censurados sendo o escolhido para aplicação neste trabalho.

Na sub-área "modo de falha", Rajpathak e De (2016) abordam a mineração de texto, utilizando dados textuais para modos de falhas na área automotiva, sendo não considerado pelo fato dos dados disponíveis para a aplicação neste estudo ser de natureza numérica.

A junção do uso de "dados de campo e testes de laboratório" caracteriza outra sub-área, onde é proposto por HSU, TSENG e CHEN (2015) um modelo de confiabilidade hierárquica para a modelagem conjunta dos dados de laboratório e de campo utilizando uma estrutura bayesiana é desenvolvido com aplicação não automotiva. Pelo fato de necessitar de dados de laboratório, este método proposto não foi considerado.

Na sub-área "sem uso de dados de campo/garantia", Ruhi, Sarker e Karim (2015) utilizam a distribuição mista combinada com EM (Expectation Maximization) e Zhang, Ye e Xie (2014) utilizam SEM (Stochastic Expectation Maximization), ambos com aplicação fora da área veicular.

Caracterizando a sub-área "sem dados de vendas", Ye e Ng (2014) propoem um método baseado numa estrutura de SEM (Stochastic Expectation Maximization) para inferência paramétrica. Devido ao fato de não considerar dados de vendas e a sua complexidade computacional na execução, o mesmo não foi considerado para o desenvolvimento.

Para a sub-área "dados censurados", Nachlas e Kumar (1993) desenvolvem o tema estimativa de parâmetros heurísticos numa aplicação fora da área veicular, também não sendo considerado para o estudo.

Em outra sub-área classificada como "monitoramento", Honari e Donovan (2007) adotam o monitoramento de mudanças no padrão de comportamento dos dados de campo de falha utilizando lognormal com o objetivo de antecipar a detecção das falhas. Não apresenta um estudo na área de veicular.

Finalmente, a sub-área "sem dados censurados", onde Alam e Suzuki (2009) afirmam que não

é necessário a utilização de dados censurados conhecidos, porém há fundamentos expostos nesta metodologia que foram considerados para o desenvolvimento deste trabalho.

Para a área de "previsão de garantia", foram encontradas três metodologias para a sub-área "duas dimensões", conforme Tabela 1 (conclusão). Embora todas utilizem aplicações na área veicular, nenhuma foi adotada pode serem fundamentadas em garantia 2D. O método utilizando copula é desenvolvido por Anderson, Chukova e Hirose (2017), Gupta, De e Chatterjee (2014) exploram a mistura de distribuições probabilísticas identificando e demarcando regiões ótimas e Majeske (2007) adota o NHPP - Processo Não Homogêneo de Poisson como metodologia.

Para a sub-área "dados incompletos", foi considerado o estudo de dois métodos para estimar parâmetros populacionais de conjunto de dados incompletos quando o comportamento das falhas segue uma distribuição normal ou lognormal desenvolvido por Rai e Singh (2003).

Numa outra sub-área, "sazonalidade de garantia e severidade de falhas", Rai e Singh (2006) exploram o fenômeno do comportamento do cliente em acionar a garantia próximo ao limite de sua expiração, abordando estimativas de taxa de risco não paramétricas, utilizando MLE-estimativa por máxima verossimilhança e iteração Turnbull. Pelo fato de adotar um método não paramétrico e pela sua complexidade, este estudo não foi considerado neste trabalho.

Na sub-área "dados censurados", Yang e Zaghatai (2002) abordam uma metodologia de regressão sequencial para modelagem de quilometragem acumulada, baseado em garantia 2D. Embora utilize uma aplicação na área automotiva, a metodologia não foi a escolhida porém algumas constatações foram consideradas. Outro método apresentado por Bettini, Giansante e Tucci (2007) utiliza RGA-Reliability Grown Analysis (análise do crescimento da confiabilidade) modificado. Um estudo baseado em dados de uma montadora, porém que depende de uma estrutura de garantia para ser viabilizado, sendo assim, restrito sua aplicação.

Por fim, nas sub-áreas "sem dados de vendas", Wang, Suzuki e Yamamoto (2002) adotam o método NHPP-Processo Não Homogêneo de Poisson e para estimativa de parâmetros o método MLE-estimativa por máxima verossimilhança numa aplicação não veicular e a sub-área "monitoramento", na qual Lawless, Crowder e Lee (2012) adotam o método de Kusums para monitoramento de falhas com aplicação automotiva, não foram considerados pelo fato do presente trabalho considerar o uso de dados de vendas e garantia.

### 3 APLICAÇÃO DA SISTEMÁTICA

Os dados foram obtidos do sistema de garantia de uma empresa. A cada reclamação recebida pela rede de concessionárias distribuída pelo país, são automaticamente registradas as informações padrões referentes ao atendimento como: quilometragem, data de produção, data de venda, data de reparo, MIS, número da peça substituída (peça causadora do problema), defeito, custo de peça, custo de mão de obra, número de chassi entre outras informações.

Embora haja um processamento e liberação para cada reclamação solicitada ser transformada em um registro de garantia, ocorrem muitas falhas de registros, como alguns dados faltantes, erros de digitação, entre outros, conforme relatado no meio acadêmico (WU, 2012).

Para cada veículo considerado foi realizado uma análise de coerência dos registros que consistiu na avaliação do histórico das passagens dos veículos pelas concessionárias da rede autorizada da marca, sendo avaliados e validados os dados de data e tipo de reparo ou manutenção com o registro da quilometragem. Desta forma, foram removidos ou desconsiderados os outliers.

#### 3.1 FASE 1 - SELEÇÃO DO MÉTODO

Na pesquisa realizada na sub-área "dados censurados de garantia", Limon et al. (2016) apresenta um método que se baseia no comportamento de taxa de uso dos dados de garantia para a geração de dados censurados numa aplicação veicular real, conforme apresentado no capítulo anterior, sendo o escolhido para aplicação neste trabalho.

O método de censura por taxa de uso escolhido como base para a aplicação neste trabalho apresentado por Limon et al. (2016), considera o comportamento de uso do veículo pelo cliente, ou seja, a sua taxa de uso, que é calculada com base na quilometragem total acumulada pela tempo de uso total. Este método utiliza os dados disponíveis de garantia considerando os dados de garantia, recall e manutenção.

Seu fundamento consiste em considerar que a taxa de uso e a idade do veículo são variáveis aleatórias independentes, ou seja, uma não depende da outra para acontecer. Assim, o comportamento de uso para os veículos falhados é o mesmo para os veículos que não falharam, pois o comportamento das falhas independem das características de uso do produto pelo cliente, por serem consideradas variáveis aleatórias independentes. Desta forma, o comportamento de uso para uma população de veículos, caracterizado por uma distribuição de probabilidade paramétrica, pode ser aplicado para a obtenção dos dados dos veículos que não falharam, aplicando a propriedade de produtos das variáveis aleatórias taxa de uso e idade do veículo.

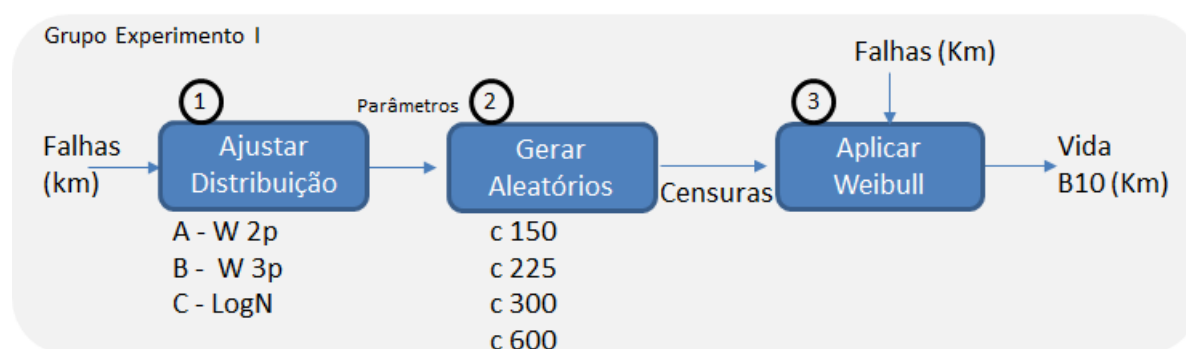
#### 3.2 FASE 2 - GRUPO EXPERIMENTO I

Ao considerar que os dados das falhas são mais disponíveis pelas empresas por estarem registrados em seus sistema de garantia, foi considerado neste experimento apenas as falhas como base para o estudo. Partiu-se da premissa de utilizar apenas os dados falhados com o objetivo de obter um processo

de estimativa de dados censurados simplificado em relação ao proposto por (LIMON et al., 2016). Esta proposta foi originada pelo autor com base na pesquisa realizada. Considerando os parâmetros do melhor ajuste obtido com os dados falhados, gera-se números aleatórios para compor a amostra de dados e aplica-se o ajuste de confiabilidade. Foram considerados os melhores ajustes conforme teste de aderência Qui-quadrado e Anderson Darling.

A Figura 23 ilustra as 3 etapas seguidas no grupo experimento I:

Figura 23 – Fase 2 Detalhamento - Grupo Experimento I



Fonte: Autor (2019)

#### Etapa 1 - Ajustar Distribuição:

Tendo como dados de entradas o tempo expresso em quilometragem de 75 falhas, obteve-se os parâmetros das distribuições de probabilidade, sendo aplicado no experimento IA a distribuição de Weibull de 2 parâmetros, para o grupo experimento IB utilizado a distribuição de Weibull de 3 parâmetros e, por fim, o grupo experimento IC aplicado a distribuição Lognormal;

#### Etapa 2 - Gerar Aleatórios:

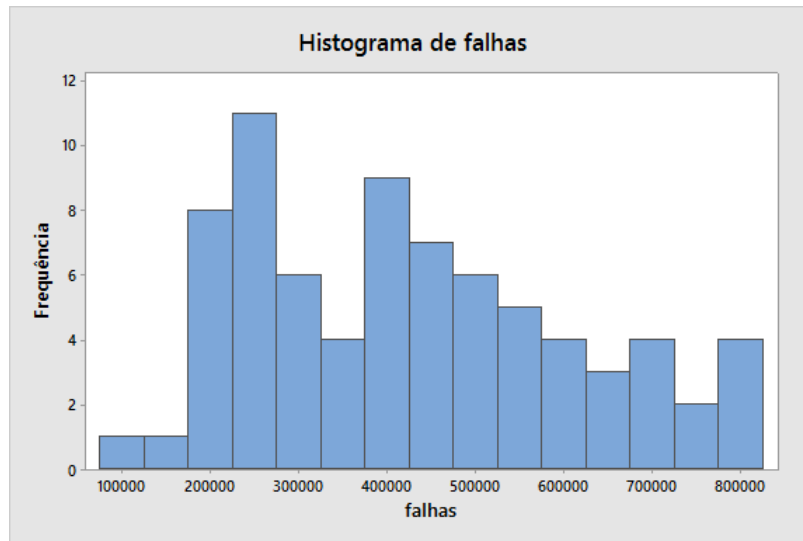
Com os parâmetros obtidos da etapa anterior, gerou-se dados aleatórios considerados censuras, variando a quantidade de censuras em 150 veículos ( $c=150$ ), ou seja, o dobro da quantidade de falhas consideradas, para 225 veículos censurados, ou seja, o triplo da quantidade de falhas iniciais ( $c=225$ ), para 300 veículos censurados, ou seja, 4 vezes a quantidade de falhas censuradas ( $c=300$ ) e finalizando, para 600 veículos censurados ( $c=600$ ), quantidade esta próxima a da população de dados considerado como referência neste trabalho (grupo controle).

#### Etapa 3 - Aplicar Weibull:

Com a junção dos 75 dados de falhas e para cada tipo de distribuição e para cada quantidade de censuras, aplicou-se a distribuição de Weibull 2p para a obtenção do valor de vida B10.

As 75 falhas utilizadas neste estudo são ilustrados no histograma da Figura 24. Observa-se uma extensa amplitude dos valores, sendo observadas baixas quilometragens, relacionadas diretamente com a falha, e também altas quilometragens, fruto da característica da extensão da garantia considerada.

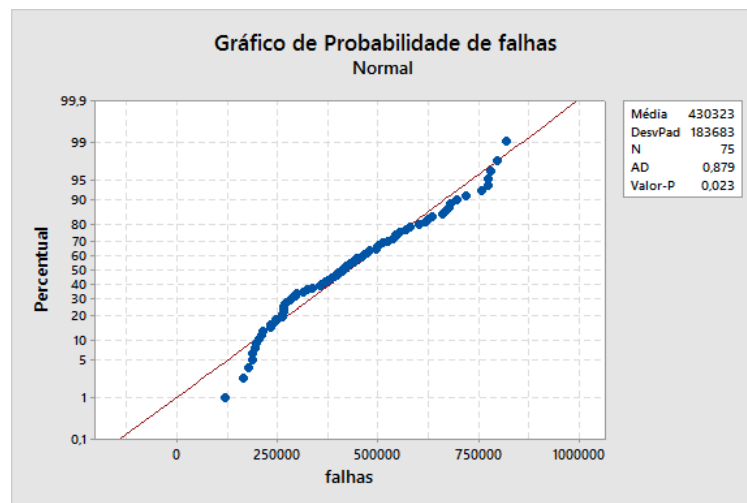
Figura 24 – Histograma 75 Falhas- Grupo Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Foi realizado o teste de normalidade para os dados de falhas conforme Figura 25. Consta-se pelo valor obtido de p-value que a distribuição não segue uma curva normal ( $p\text{-value} < 0,05$ ).

Figura 25 – Teste de Normalidade 75 Falhas- Grupo Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Optou-se em realizar o teste de aderência utilizando dois software distintos, sendo o (MINITAB®, 2019) por seu amplo uso no mercado e o (ORACLE®, 2019) por possibilitar a comparação com outras distribuições. Dentre as opções de ajustes de distribuição de probabilidades após realização do teste de aderência utilizando o software (ORACLE®, 2019), conforme Figura 26, observa-se que a distribuição de Weibull aparece com resultado destacado no ranking com p-value de 0,56. Embora a distribuição lognormal não tenha sido considerada a melhor, ela também teve um valor significativo de p-value de 0,46.

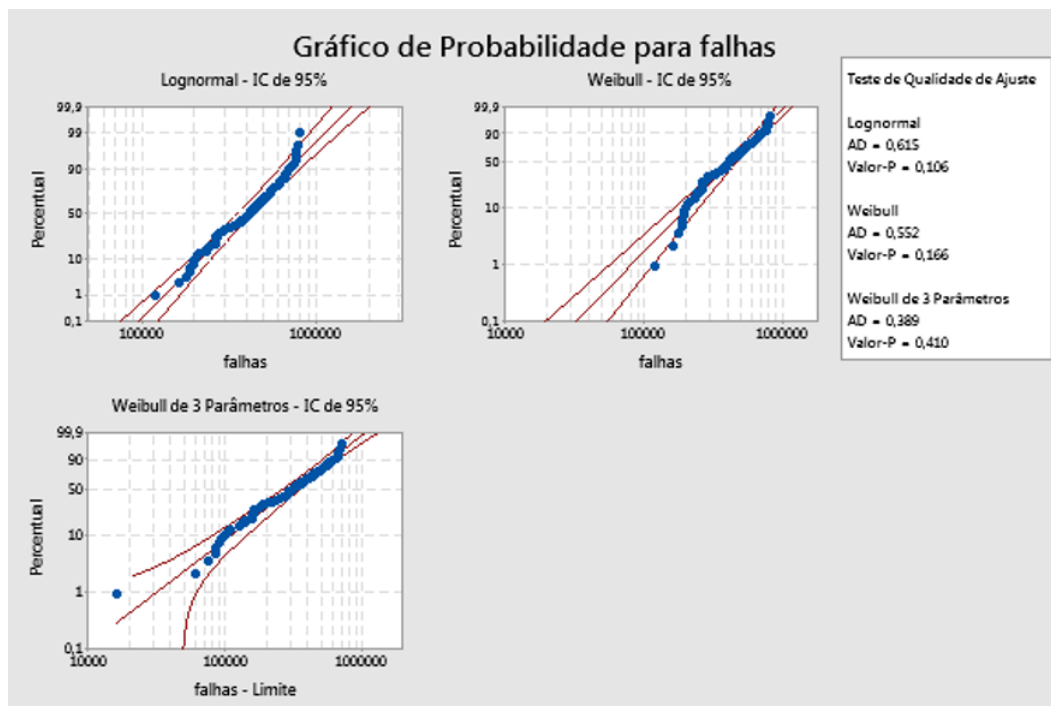
Figura 26 – Teste de Aderência - G.Experimento I

Distribuição	A-D	Valor de P-A	K-S	Valor de P K-S	Qui-quadrado	Valor de P Qui-quadr	Parâmetros
Weibull	,6418	0,235	,0968	0,250	4,8667	0,561	Local=22.071,77;Escala=472.510,94;Forma=2,43327
Triangular	,5194	---	,0670	---	5,1333	0,527	Mínimo=81,584,71;Mais provável=264,556,00;Máximo=894,640,0
Gama	,4856	0,196	,0702	0,496	5,1333	0,527	Local=69,204,47;Escala=103,258,94;Forma=3,49722
Lognormal	,5405	0,085	,0792	0,213	5,6867	0,462	Local=125,126,10;Mediana=431,386,33;Desvio Padrão=193,485,96
Beta	,5352	---	,0394	---	5,4000	0,369	Mínimo=150,208,70;Máximo=885,228,71;Alfa=1,07767;beta=1,75
Extremo Máx	,5928	0,126	,0800	0,285	7,8000	0,351	Mais provável=343,095,33;Escala=151,828,95
Normal	,8793	0,023	,0978	0,081	12,6000	0,082	Média=430,323,39;Desvio Padrão=183,682,73
Uniforme	2,3733	0,043	,1435	0,073	14,7333	0,040	Mínimo=110,088,03;Máximo=830,025,97
Logística	,8566	0,014	,0867	0,087	18,2000	0,011	Média=419,948,85;Escala=109,299,99
Extremo Mín	1,9403	0,000	,1181	0,010	21,1333	0,004	Mais provável=524,620,21;Escala=184,048,20
BetaPERT	5,1855	---	,1559	---	22,4667	0,001	Mínimo=150,208,70;Mais provável=386,625,73;Máximo=885,228,
Pareto	12,5370	---	,2990	---	95,5333	0,000	Local=117,421,55;Forma=0,8322
Exponencial	11,0866	0,000	,3129	0,000	58,4667	0,000	Taxa=0,00
T de student	2,3521	---	,1493	---	45,1333	0,000	Ponto intermediário=430,323,39;Escala=86,408,69;Graus de Libe

Fonte: (ORACLE®, 2019)

Foi realizado também o teste de aderência para as curvas de distribuição utilizando o software (MINITAB®, 2019) conforme Figura 27 onde se observa pelo índice AD a indicação das curvas Weibull 3p e 2p e Lognormal como as mais significativas. Assim, com esta confirmação, foi adotado as três curvas como as escolhidas para a próxima etapa.

Figura 27 – Teste de Aderência - G. Experimento I



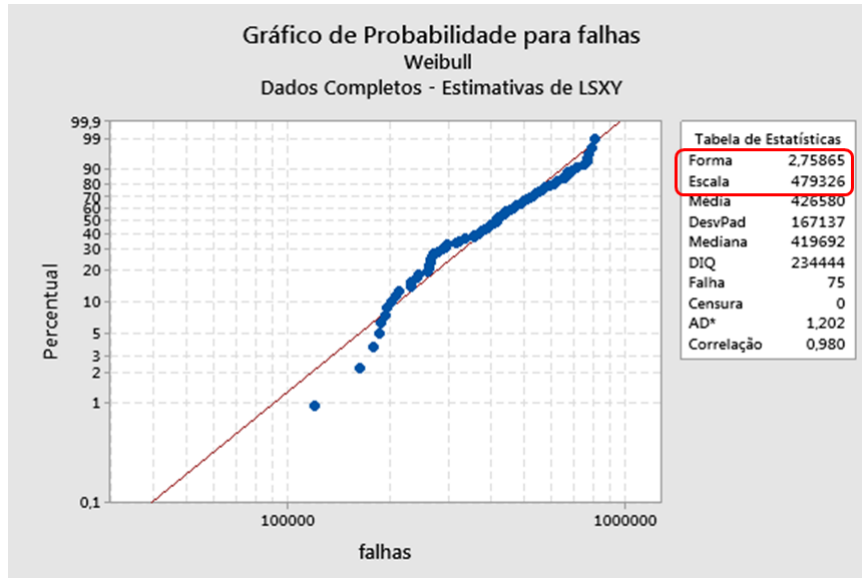
Fonte: (MINITAB®, 2019)

Com a premissa adotada considerando apenas os dados de falhas, e adotando as três melhores curvas de distribuição para os dados da amostra, estabeleceu-se a realização de experimentos variando a quantidade de censuras adotadas, ou seja, a quantidade de veículos sem falhas contidos na simulação.

### 3.2.1 G.Experimento IA - Weibull 2p

Etapa 1 - Foram obtidos os parâmetros forma e escala da distribuição de Weibull 2 parâmetros conforme Figura 28. Com estes parâmetros foram gerados valores aleatórios para 150, 225, 300 e 600 veículos. Estes dados gerados aleatoriamente foram utilizados para a próxima etapa.

Figura 28 – Parâmetros da Distribuição de Weibull 2p - Grupo Experimento I

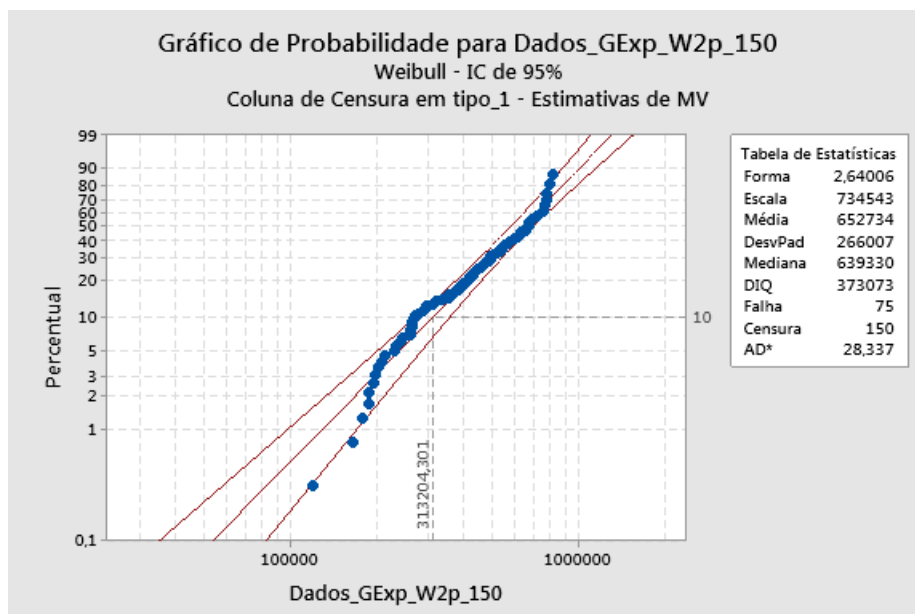


Fonte: (MINITAB®, 2019)

Etapa 2 e 3 - G.Experimento I - Tempo de Vida com dados censurados gerados aleatoriamente

Com os parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 150 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para as 150 censuras e as 75 falhas utilizando Weibull 2p conforme Figura 29, sendo destacado o valor de vida B10 obtido de 313.204 Km.

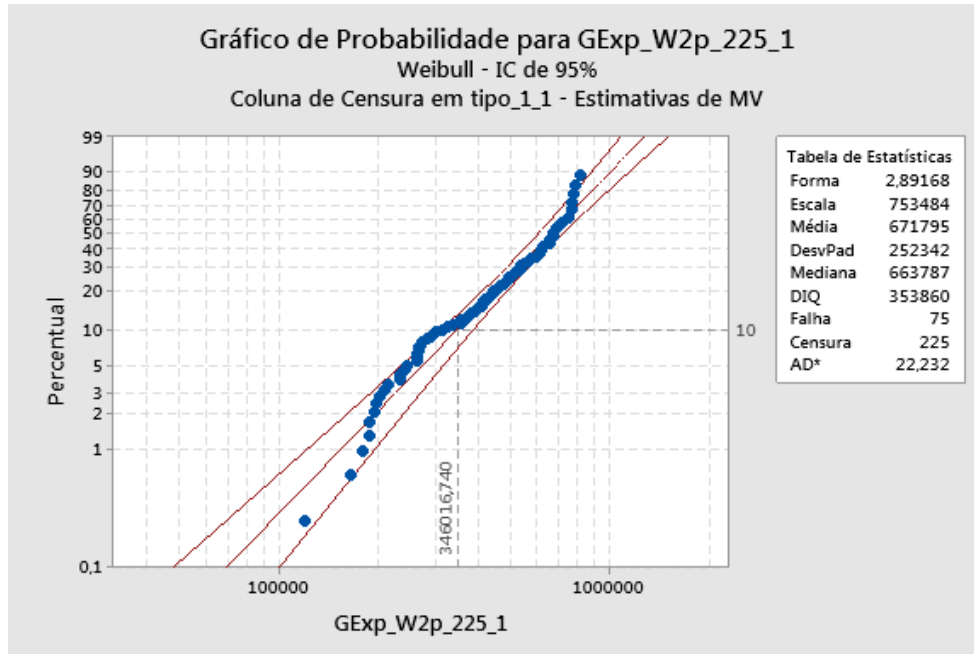
Figura 29 – Vida B10 Weibull 2p com 150 censuras- G.Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Com os mesmos parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 225 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para 225 veículos censurados e as 75 falhas utilizando Weibull 2p conforme Figura 30, sendo observado o valor de vida B10 obtido de 346.016 Km.

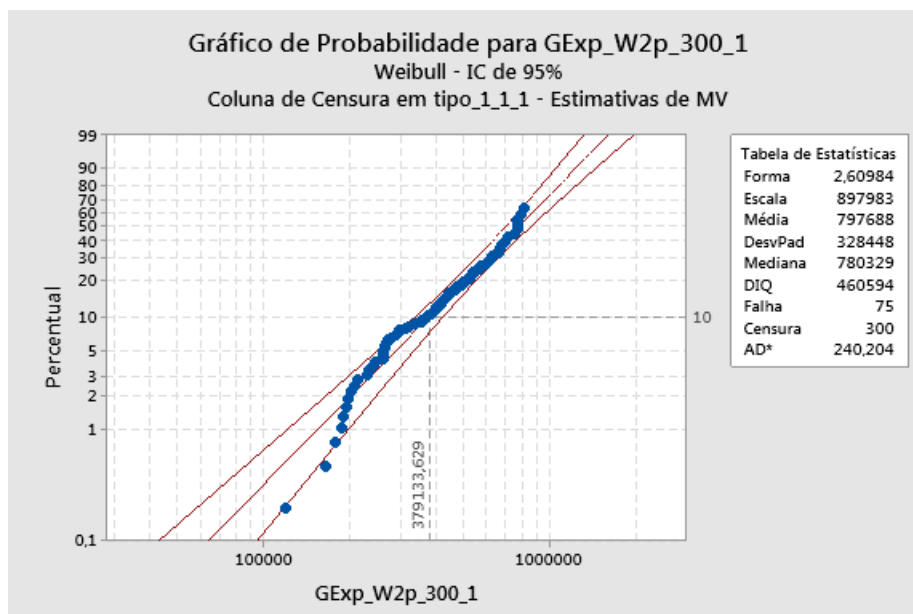
Figura 30 – Vida B10 Weibull 2p com 225 censuras - G.Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Ainda com os parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 300 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para 300 veículos censurados e as 75 falhas utilizando Weibull 2p conforme Figura 31, sendo observado o valor de vida B10 obtido de 379.133 Km.

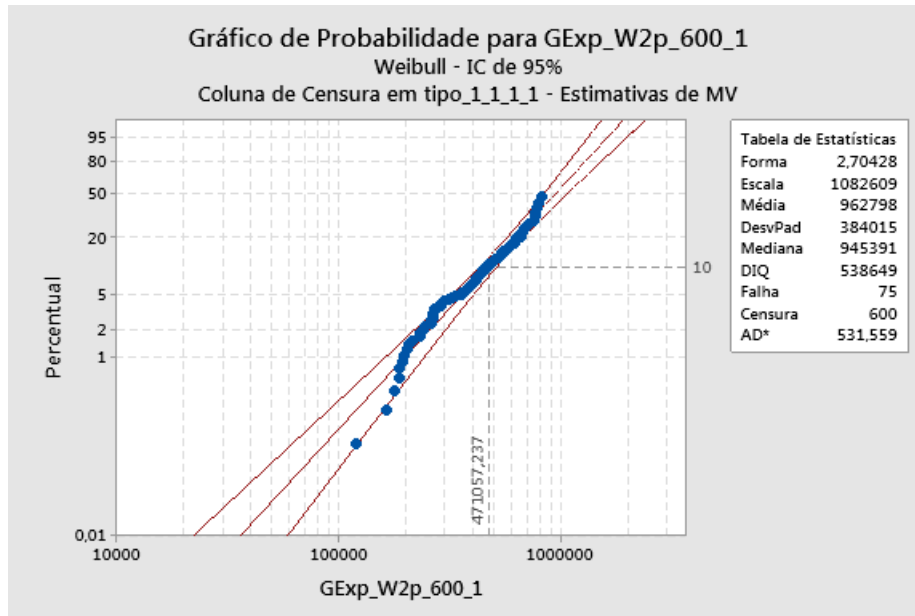
Figura 31 – Vida B10 Weibull 2p com 300 censuras - G.Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Por fim e com os mesmos parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 600 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para 600 veículos censurados e as 75 falhas utilizando Weibull 2p conforme Figura 32, sendo observado o valor de vida B10 obtido de 471.057 Km.

Figura 32 – Vida B10 Weibull 2p com 600 censuras - G.Experimento I

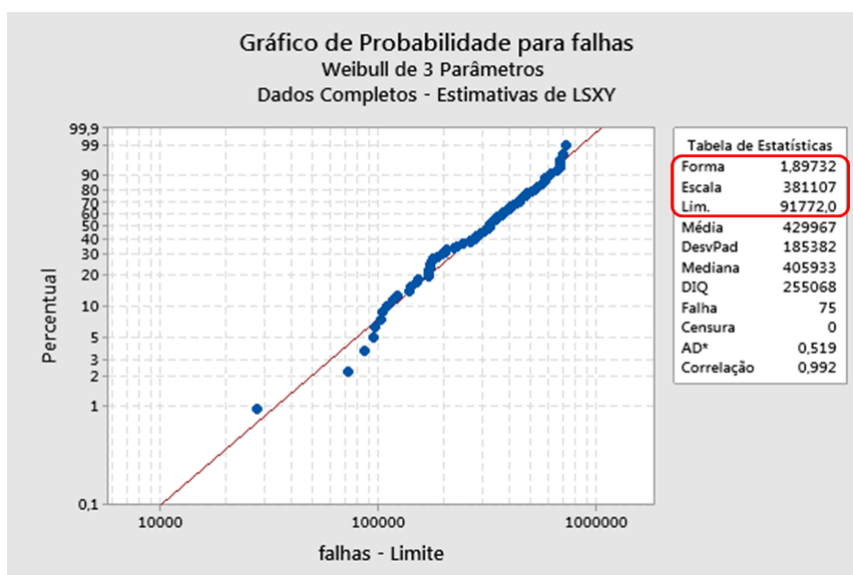


Fonte: (MINITAB®, 2019)

### 3.2.2 G.Experimento IB - Weibull 3p

Etapa 1 - Foram obtidos os parâmetros da distribuição de Weibull 3 parâmetros conforme Figura 33. Com estes parâmetros foram gerados valores aleatórios para 150, 225, 300 e 600 veículos. Estes valores foram utilizados para a próxima etapa para o cálculo de vida B10.

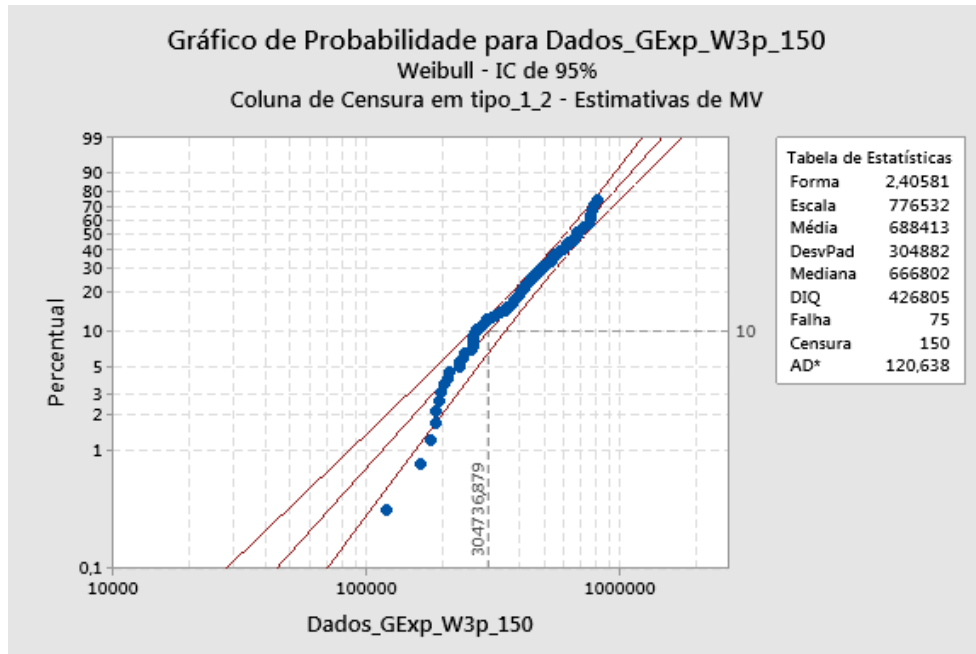
Figura 33 – Parâmetros da Distribuição de Weibull 3p - Grupo Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Etapas 2 e 3 - Com os parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 150 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para as 150 censuras e as 75 falhas utilizando a distribuições de Weibull 3p conforme Figura 34, sendo observado o valor de vida B10 obtido de 304.737 Km.

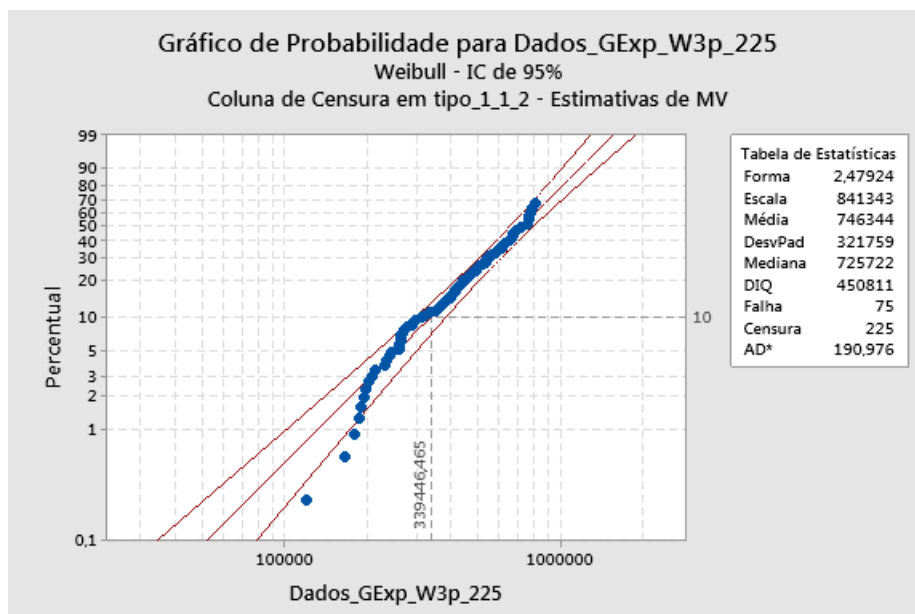
Figura 34 – Vida B10 Weibull 3p com 150 censuras - G.Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Com os parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 225 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para as 225 censuras e as 75 falhas utilizando a distribuições de Weibull 3p conforme Figura 35, sendo observado o valor de vida B10 obtido de 339.446 Km.

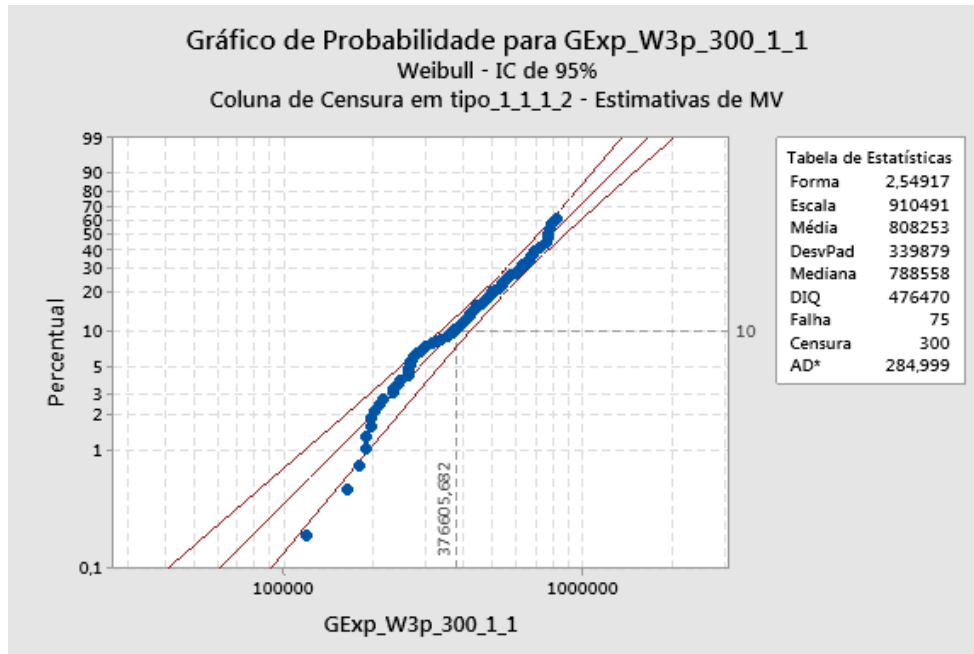
Figura 35 – Vida B10 Weibull 3p com 225 censuras - G.Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Com os parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 300 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para as 300 censuras e as 75 falhas utilizando a distribuições de Weibull 3p conforme Figura 36, sendo observado o valor de vida B10 obtido de 376.606 Km.

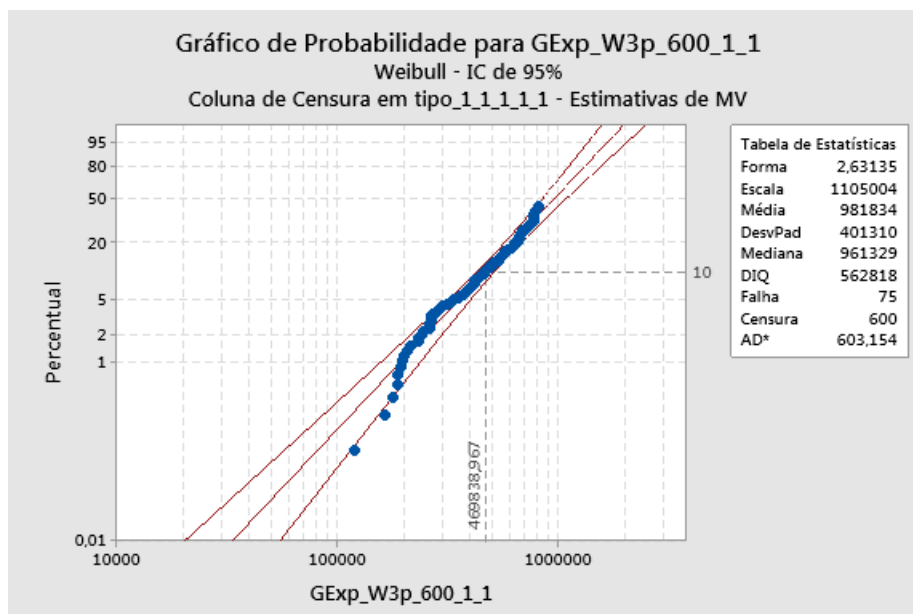
Figura 36 – Vida B10 Weibull 3p com 300 censuras - G.Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Com os parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 600 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para as 600 censuras e as 75 falhas utilizando a distribuições de Weibull 3p conforme Figura 37, sendo observado o valor de vida B10 obtido de 469.839 Km.

Figura 37 – Vida B10 Weibull 3p com 600 censuras - G.Experimento I

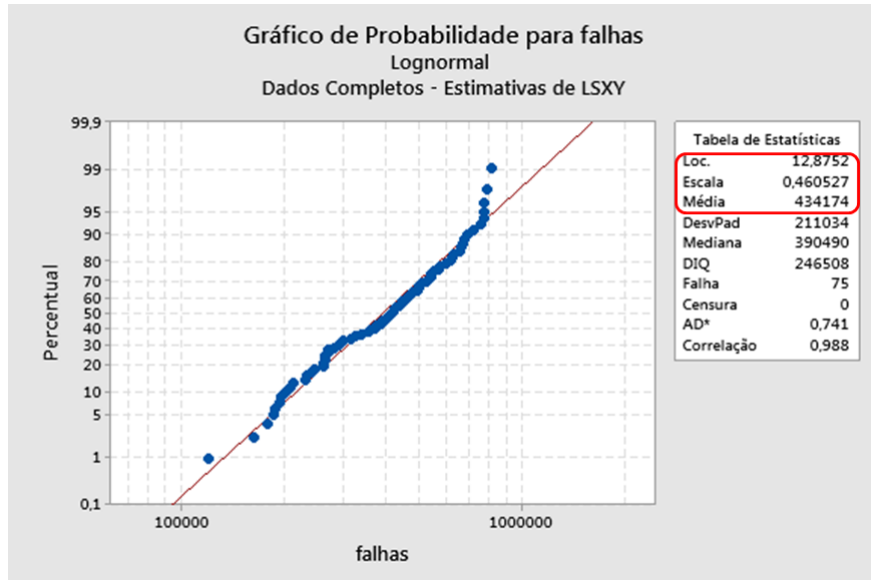


Fonte: (MINITAB®, 2019)

### 3.2.3 G.Experimento IC - LogNormal

Etapa 1 - Foram obtidos os parâmetros da distribuição conforme Figura 38. Com estes parâmetros foram gerados valores aleatórios para 150, 225, 300 e 600 veículos. Estes valores foram utilizados para a próxima etapa para o cálculo de vida B10.

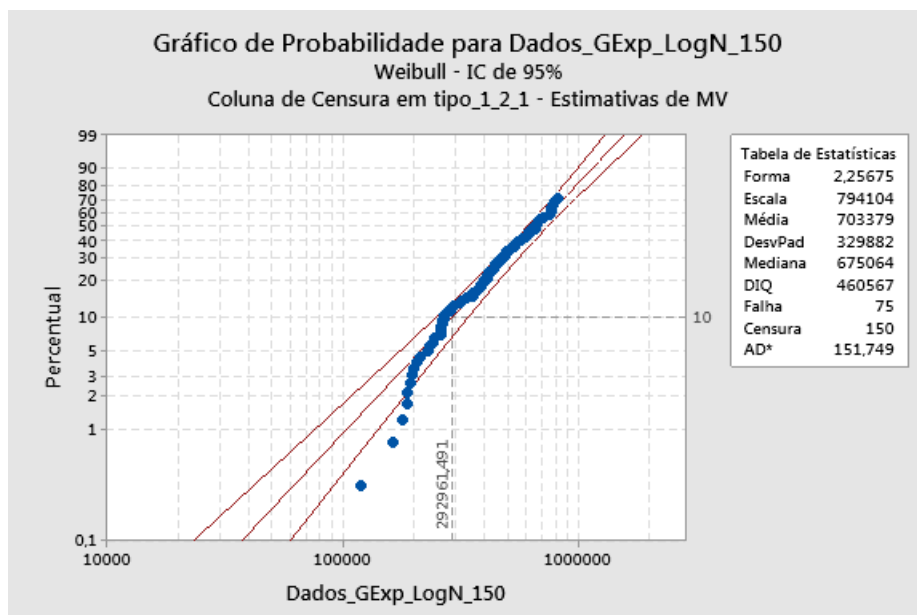
Figura 38 – Parâmetros da Distribuição Lognormal - Grupo Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Etapas 2 e 3 - Com os parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 150 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para as 150 censuras e as 75 falhas utilizando a distribuição Lognormal conforme Figura 39, sendo observado o valor de vida B10 obtido de 292.961 Km.

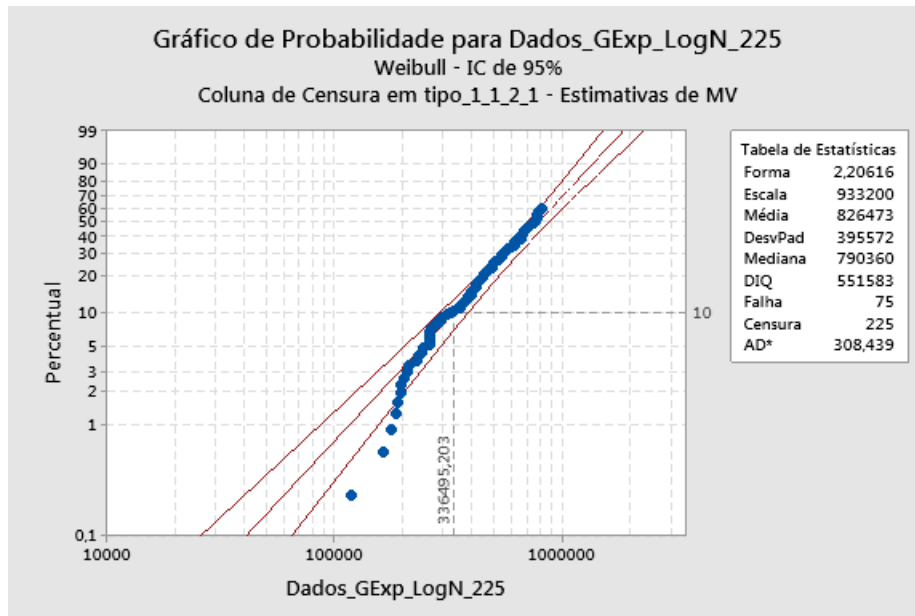
Figura 39 – Vida B10 Lognormal com 150 censuras - G. Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Com os parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 225 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para as 225 censuras e as 75 falhas utilizando a distribuição Lognormal conforme Figura 40, sendo observado o valor de vida B10 obtido de 336.495 Km.

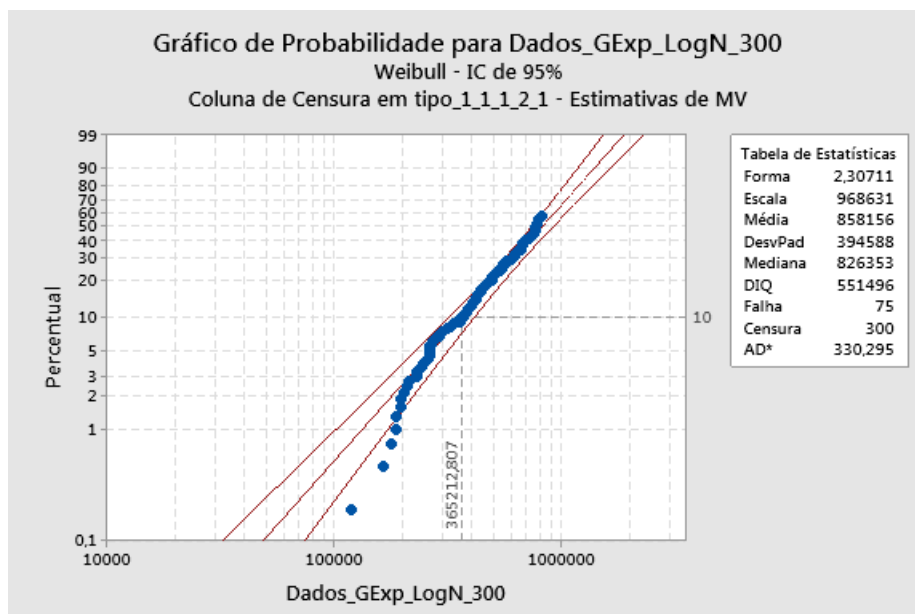
Figura 40 – Vida B10 Lognormal com 225 censuras - G.Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Com os parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 300 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para as 300 censuras e as 75 falhas utilizando a distribuição Lognormal conforme Figura 41, sendo observado o valor de vida B10 obtido de 365.212 Km.

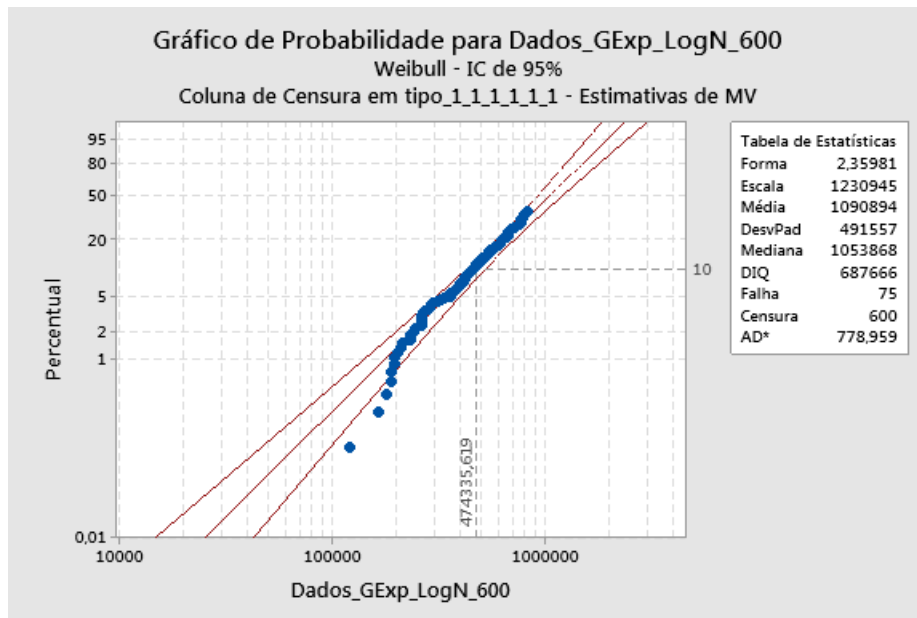
Figura 41 – Vida B10 Lognormal com 300 censuras - G.Experimento I



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Com os parâmetros obtidos na etapa anterior, foram gerados 600 dados aleatórios para compor os dados censurados e, desta forma, calculou-se o tempo de vida para as 600 censuras e as 75 falhas utilizando a distribuição Lognormal conforme Figura 42, sendo observado o valor de vida B10 obtido de 474.335 Km.

Figura 42 – Vida B10 Lognormal com 600 censuras - G.Experimento I

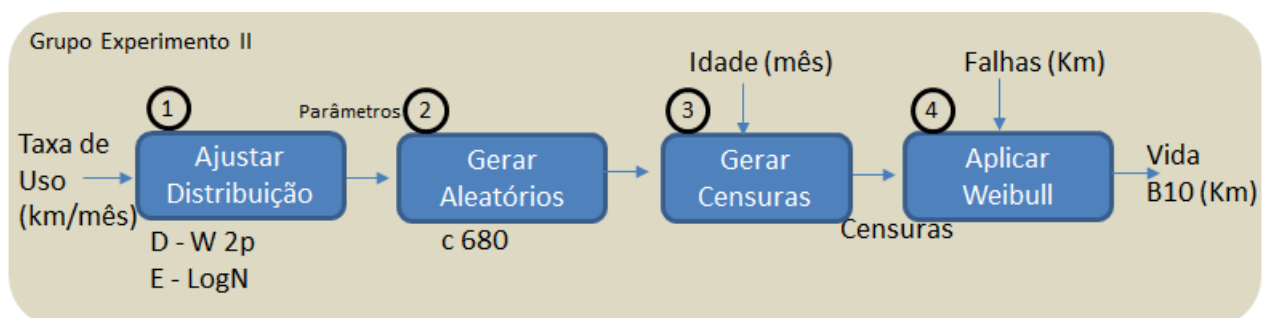


fonte: (MINITAB®, 2019)

### 3.3 FASE 3 - GRUPO EXPERIMENTO II

Para o grupo experimento II, adotou-se a mesma quantidade de veículos falhados e censurados considerados no grupo controle. A Figura 43 ilustra as 4 etapas seguidas no grupo experimento II:

Figura 43 – Fase 3 Detalhamento - Grupo Experimento II



Fonte: Autor (2019)

As etapas Grupo Experimento II podem ser sumarizadas desta forma:

Etapa 1 - Ajustar Distribuição:

Os dados foram organizados para a obtenção da taxa de uso, que consiste na quilometragem total acumulada pelos meses totais de uso do veículo.

Tendo como dados de entradas a taxa de uso calculada, obteve-se os parâmetros das respectivas distribuições de probabilidade, ou seja, o grupo experimento II-D utilizou a distribuição de Weibull de 2 parâmetros e o grupo experimento II-E utilizou a distribuição Lognormal;

Etapa 2 - Gerar Aleatórios:

Com os parâmetros obtidos da etapa anterior, gerou-se 680 dados aleatórios, sendo esta a mesma quantidade de veículos censurados do grupo controle ( $c=680$ );

Etapa 3 - Gerar Censuras

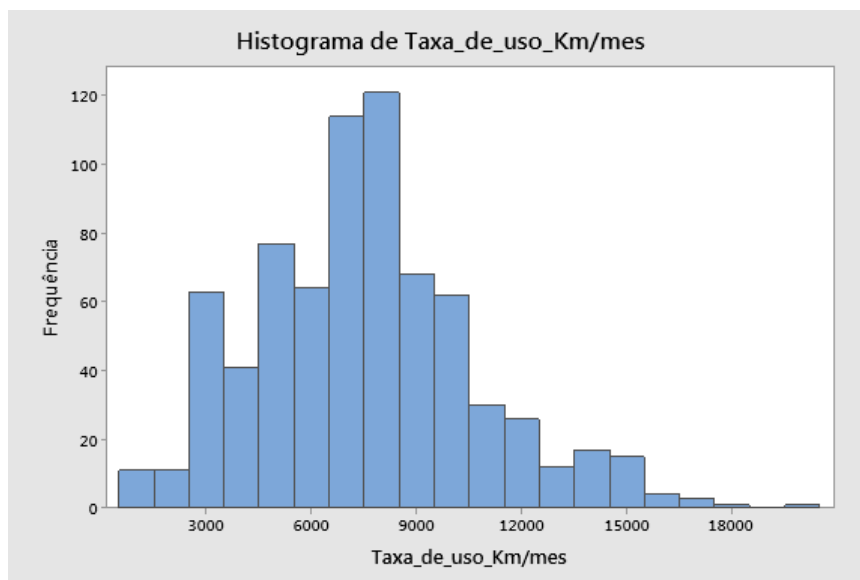
Nesta etapa foram considerados os dados aleatórios gerados na etapa anterior e realizado o produto com as idades da população considerada, para assim obter-se os dados censurados;

Etapa 4- Aplicar Weibull:

Com a junção dos 75 dados de falhas e para tipo de distribuição e para cada quantidade de censuras, aplicou-se a distribuição de Weibull 2p para a obtenção do valor de vida B10.

Como descrito anteriormente, foram utilizados dados de garantia e de campo para a aplicação da metodologia proposta. A Figura 44 representa o histograma dos dados de taxa de uso considerados.

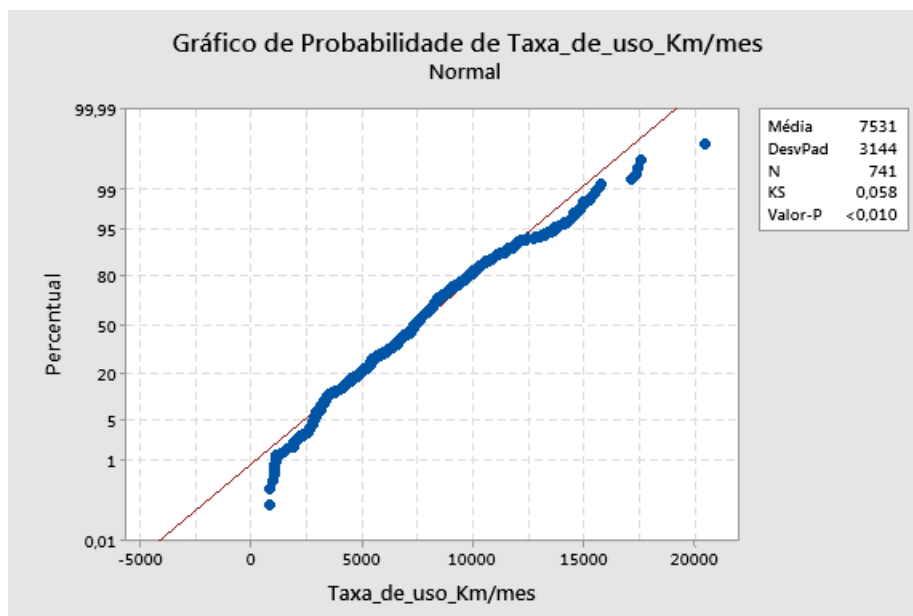
Figura 44 – Histograma - Grupo Experimento II



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Realizado o teste de normalidade para os dados de taxa de uso conforme Figura 45, não sendo comprovada a normalidade em função do resultado de "p"valor < 0,05.

Figura 45 – Teste de Normalidade para Taxa de uso - Grupo Experimento II



Fonte: (MINITAB®, 2019)

Aplicado o conceito de taxa de uso, sendo o coeficiente entre a quilometragem total acumulada (uso) pela idade em MIS de cada veículo (tempo) e avaliado o comportamento das distribuições de probabilidades. Observa-se na Figura 46 que no teste de aderência dos ajustes das distribuições de probabilidade os índices valor-p para a distribuição de Weibull para os testes A-D e K-S (4%), embora não significativos, foram os que tiveram maior valor. Optou-se em escolher e aplicar também a distribuição lognormal por ser adotado no método proposto por Limon et al. (2016).

Figura 46 – Teste de Aderência taxa de uso - Grupo Experimento II

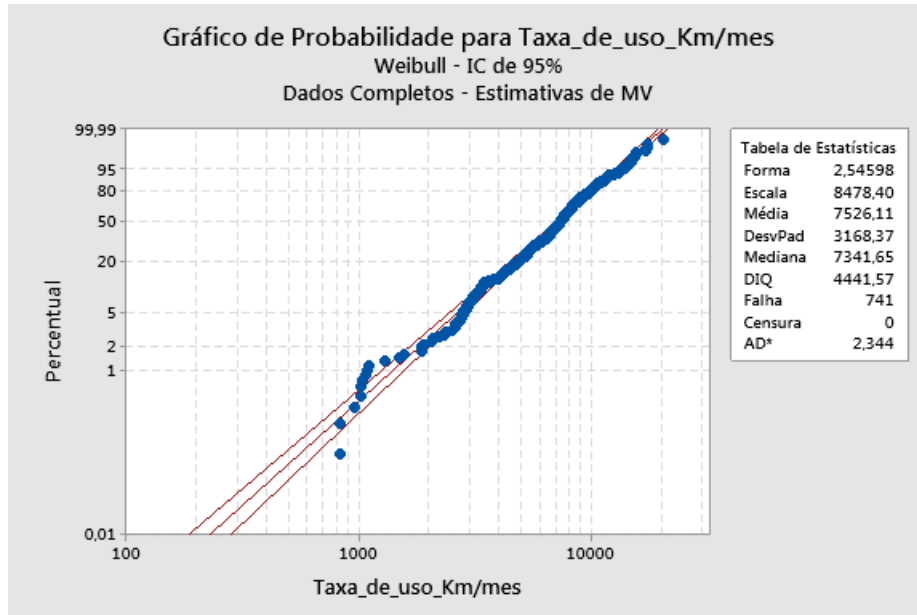
Dividir Exibição							736 Exibido
Distribuição	A-D	Valor de P A-D	K-S	Valor de P K-S	Qui-quadrado	Valor de P Q	Parâmetros
Weibull	2,2312	0,040	,0487	0,037	60,3684	0,000	Local=311,76;Escala=8,102,98;Forma=2,43829
Gama	1,5736	0,000	,0449	0,000	61,2807	0,000	Local=-4,976,25;Escala=789,37;Forma=15,8446
Lognormal	1,5032	0,000	,0441	0,000	68,9298	0,000	Local=-10,974,22;Média=7,531,49;Desvio Padr
Logística	1,5952	0,000	,0299	0,041	69,4912	0,000	Média=7,402,32;Escala=1,761,87
T de student	2,5422	---	,0531	---	70,1228	0,000	Ponto intermediário=7,531,10;Escala=2,950,68;
Beta	3,1421	---	,0588	---	75,6667	0,000	Mínimo=-37,016,34;Máximo=52,078,54;Alfa=10
Normal	3,0885	0,000	,0585	0,000	77,1404	0,000	Média=7,531,10;Desvio Padrão=3,144,26
Extremo Máx	4,6507	0,000	,0749	0,000	92,0877	0,000	Mais provável=6,028,67;Escala=2,778,11
BetaPERT	18,8379	---	,1228	---	141,4211	0,000	Mínimo=504,40;Mais provável=5,322,58;Máxim
Triangular	46,3961	---	,2016	---	227,2456	0,000	Mínimo=504,40;Mais provável=5,322,58;Máxim
Extremo Mín	23,6416	0,000	,1215	0,000	233,2807	0,000	Mais provável=9,170,67;Escala=3,550,79
Uniforme	154,8480	0,000	,3642	0,000	685,7719	0,000	Mínimo=798,16;Máximo=20,522,10
Exponencial	115,7709	0,000	,2851	0,000	753,5614	0,000	Taxa=0,00
Pareto	205,6430	---	,3999	---	2,271,4561	0,000	Local=822,32;Forma=0,47354

Fonte: (ORACLE®, 2019)

### 3.3.1 G.Experimento II-D- Weibull 2p

Fase 1 - Com os dados da taxa de uso extraídos de todos os veículos disponíveis, ou seja, dos 74 veículos falhados e dos 667 não falhados, totalizando 741 veículos, aplicou-se o ajuste da distribuição de Weibull para a obtenção dos parâmetros de forma e escala conforme Figura 47.

Figura 47 – Parâmetros Para Geração Dados Censurados por Weibull - G.Experimento II

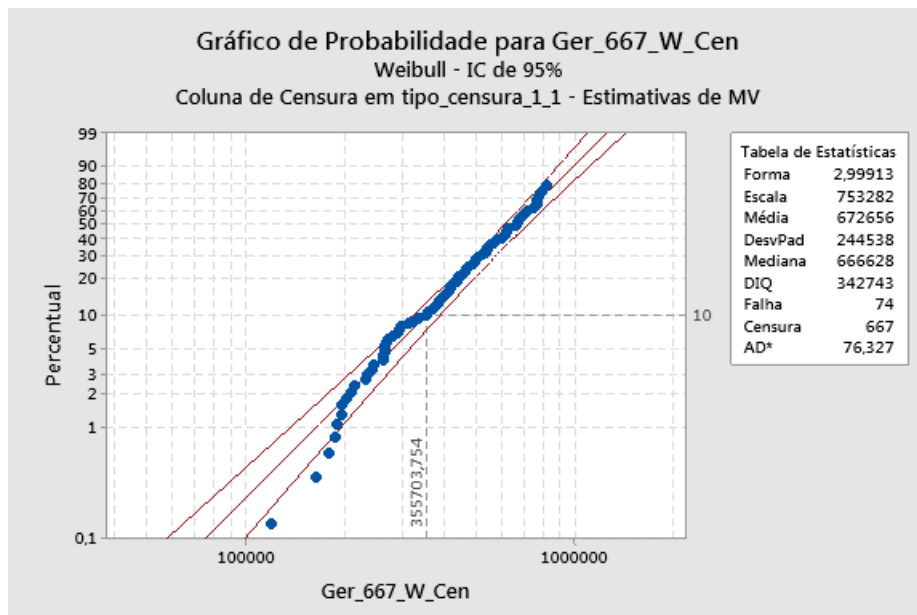


Fonte: (MINITAB®, 2019)

Fase 2 e 3 - Os parâmetros obtidos na fase anterior foram utilizados para a geração de dados aleatórios. Na fase 3, realizou-se o produto entre os dados gerados aleatoriamente na fase 2 com a idade dos veículos, chegando-se aos valores de quilometragem dos veículos censurados.

Fase 4- Com os 667 valores censurados obtidos, e com os dados das 74 falhas, aplicou-se então o ajuste utilizando a distribuição de Weibull conforme Figura 48, obtendo a vida B10 de 355.704 Km.

Figura 48 – Tempo de Vida com Dados Censurados Gerados por Weibull - G.Experimento II

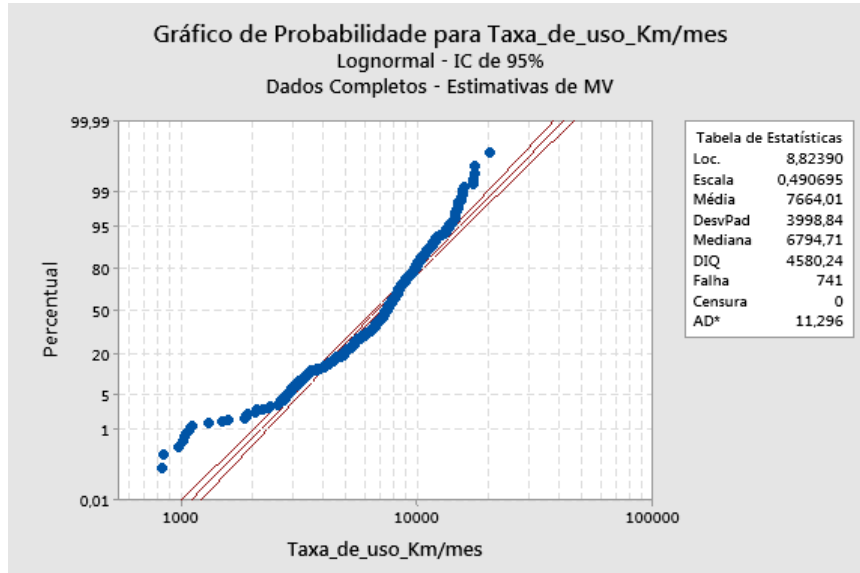


Fonte: (MINITAB®, 2019)

### 3.3.2 G.Experimento II-E - Lognormal

Fase 1 - Aplicando o mesmo processo anterior porém utilizando a distribuição Lognormal, obtém-se os parâmetros desta curva conforme Figura 49.

Figura 49 – Parâmetros Para Geração Dados Censurados por LogNormal - G.Experimento II

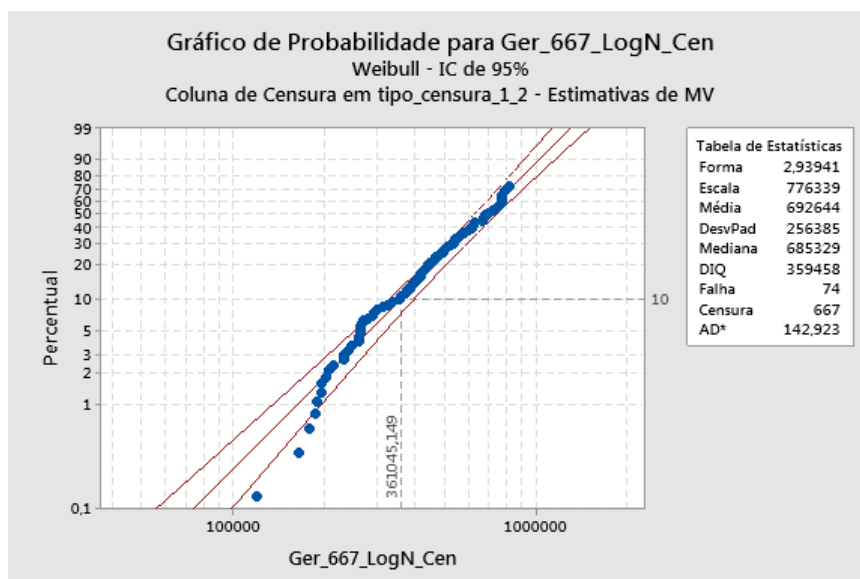


Fonte: (MINITAB®, 2019)

Fase 2 e 3 - Repetiu-se o mesmo processo adotado para o experimento anterior, onde os parâmetros obtidos na fase anterior foram utilizados para a geração de dados aleatórios. Na fase 3, realizou-se o produto entre os dados gerados aleatoriamente na fase 2 com a idade dos veículos, chegando-se aos valores de quilometragem dos veículos censurados.

Fase 4- Com os 667 valores censurados obtidos, e com os dados das 74 falhas, aplicou-se então o ajuste utilizando a distribuição de Lognormal conforme Figura 50, obtendo a vida B10 de 361.045 Km.

Figura 50 – Tempo de Vida com Dados Censurados Gerados por LogNormal - G.Experimento II

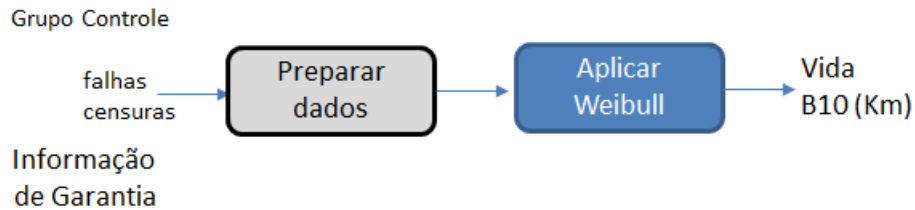


Fonte: (MINITAB®, 2019)

### 3.4 FASE 4 - GRUPO CONTROLE

Para o grupo controle, utilizou-se toda a quantidade de veículos falhados e censurados disponíveis. A Figura 51 ilustra resumidamente as 2 etapas seguidas no grupo controle II:

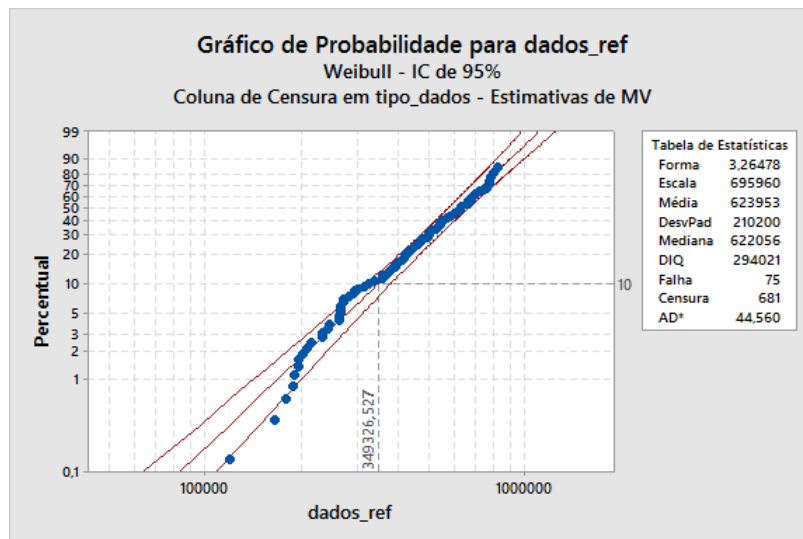
Figura 51 – Fase 4 Detalhamento - Grupo Controle



Fonte: Autor (2019)

A composição da amostra foi uma frota de 756 veículos, sendo 75 falhados e 681 censurados. O objetivo foi obter o tempo de vida do produto em relação ao evento falha considerado, uma vez que esta falha causa a paralisação do veículo. O resultado obtido foi o B10 de 349.326 Km, utilizando Weibull de 2 parâmetros com um intervalo de confiança de 95% conforme Figura 52

Figura 52 – Vida B10 Dados de Garantia e de Campo - Grupo Controle



Fonte: Autor (2019)

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na aplicação dos métodos da fase 2 e fase 3 comparados com os valores obtidos na fase 4 conforme Figura 7 apresentada no capítulo I. Na fase 2 foi aplicado o método de censura por tempo da falha, na fase 3 aplicado o método de censura por taxa de falha, sendo os resultados comparados com os de referência obtidos na fase 4.

### 4.1 FASE 2 - GRUPO EXPERIMENTO I

No grupo experimento I foram realizadas três etapas que se repetiram para três diferentes distribuições de probabilidade, sendo que a etapa 2 foi aplicada variando em até 4 diferentes quantidades de dados censurados conforme ilustrado na Figura 23.

#### Resultados da Etapa 1 - Ajustar Distribuição

Os dados utilizados das 75 falhas conforme histograma ilustrado na Figura 24 mostram valores com amplitude significativa do ponto de vista do modo de falha considerado, sendo observados quilometragens baixas de 100.000km até 800.000km. Os valores de quilometragem da faixa superior registrados se dão pelo fato dos dados serem de garantia estendida, possibilitando um acompanhamento da vida do produto mais prolongado, de forma que isto contribui para o levantamento da vida do produto de forma mais real.

O teste de normalidade realizado comprovou que os dados não seguem um comportamento normal.

Dentre as opções de ajustes de distribuição de probabilidades após realização do teste de aderência utilizando o software (ORACLE®, 2019), conforme Figura 26, observa-se que a distribuição de Weibull aparece com resultado destacado no ranking com valor-p de 0,56. Embora a distribuição lognormal não tenha sido considerada a melhor, ela também apresentou um significativo valor-p de 0,46. Como na literatura esta distribuição é mencionada como uma das mais usadas, optou-se neste trabalho sua inclusão. Na figura Figura 27 é também mostrado o resultado do testes de aderência utilizando o software (MINITAB®, 2019), confirmando a significância estatística com os valores-p > 0,05, para as distribuições lognormal e Weibull 2 e 3 parâmetros.

No trabalho apresentado por Limon et al. (2016) é escolhido apenas a distribuição Lognormal por referências de estudos anteriores aplicados com dados da indústria automobilística, porém neste trabalho o autor optou-se em realizar o teste de aderência como auxílio na tomada de decisão para a escolha das distribuições de probabilidade mais adequadas, sendo observadas as características sob o ponto de vista estatístico e de engenharia mencionadas no capítulo 2.

#### Resultados da Etapa 2 e 3 - Gerar Aleatórios e Aplicar Weibull

Os resultados dos tempos de vida B10 obtidos do experimento I estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados do Experimento I

Grupo Experimento I	Censuradas Gerados por:			
	C = 150	C = 225	C=300	C=600
A- Weibull	313.204	346.016	379.133	471.057
B- Weibull 3p	304.737	339.446	376.606	469.839
C- Lognormal	292.961	336.495	365.212	474.335

Fonte: Autor (2019)

Lembrando que o valor alvo do grupo controle é de 349.326 Km, observa-se que:

1- Na medida que ocorre incremento da quantidade de censuras utilizadas, o resultado de vida B10 obtido foi aumentado. Esta constatação foi observada para as três diferentes distribuições A-Weibull, B-Weibull 3p e C-Lognormal.

2- A distribuição de Weibull foi a que mais se aproximou do valor do grupo de controle. Isto pode ter se dado ao fato do comportamento de uso deste caso ter sido melhor representado por esta distribuição.

3- Constata-se também que para o número de censuras equivalentes a 3 vezes o número de falhas, ou seja, para  $c=225$  (sendo  $f$  o número de falhas igual à 75) obteve-se um valor mais próximo do valor alvo para as distribuições de Weibull.

Foi realizado o teste de hipótese - teste t com os resultados do experimento I conforme Figura 53, considerando a variação do tamanho de amostra de dados censurados e adotando como valor alvo de 350.000 Km. Conclui-se que para  $c=225$  (3 X N= 75 falhas) há significância para 95% de confiança (valor  $p > 5\%$  H0 aceita).

Figura 53 – Teste de Hipótese - Teste t Experimento I

Teste			
Hipótese nula	$H_0: \mu = 350000$		
Hipótese alternativa	$H_1: \mu \neq 350000$		
Amostra	Valor-T	Valor-p	
150	-7,90	0,016	Rejeita
225	-3,32	0,080	Aceita
300	5,52	0,031	Rejeita
600	90,68	0,000	Rejeita

Fonte: (MINITAB®, 2019)

Aplicou-se o teste de hipótese - z comparando os 3 resultados do experimento I, considerando a utilização de 225 dados censurados ( $c=225$ ) e aplicando desvio padrão da população (grupo controle) conforme Figura 54, conclui-se que há significância para 95% de confiança (valor  $p > 5\%$  H0 aceita). O valor para a hipótese nula foi arredondada para 350.000 km sem prejuízo ou alteração no resultado.

Figura 54 – Teste de Hipótese - Teste z Experimento I

Teste		
Hipótese nula		$H_0: \mu = 350000$
Hipótese alternativa		$H_1: \mu \neq 350000$
<u>Valor-Z</u>	<u>Valor-p</u>	
-0,08	0,939	aceita

Fonte: (MINITAB®, 2019)

4- Observado na Tabela 2 os resultados da correlação para as três distribuições pelo método dos mínimos quadrados que os valores são, além de próximos de 1,0, o que representa um bom ajuste destes dados desta aplicação nas distribuições, próximos entre eles.

Tabela 2 – Resultados - Correlação Método Mínimos Quadrados

Método dos Mínimos Quadrados	
Grupo Experimento I	Correlação
A - Weibull 2p	0,980
B- Weibull - 3P	0,992
C - LogNormal	0,988

Fonte: Autor (2019)

## 4.2 GRUPO EXPERIMENTO II

### Resultados da Etapa 1 - Ajustar Distribuição

Os dados utilizados dos 741 veículos conforme histograma ilustrado na Figura 44 refletem também valores com amplitude significativa do ponto de vista do modo de falha considerado, sendo observados taxas de uso, ou seja, quilometragem média por mês, fruto dos dados de garantia estendida conforme relatado na seção anterior.

O teste de normalidade realizado, da mesma forma do experimento anterior, comprovou que os dados não seguem um comportamento normal.

Foi adotado o mesmo processo na avaliação das distribuições de probabilidades aplicando o teste de aderência utilizando o software (ORACLE®, 2019), conforme Figura 46. Os índices valor-p para os testes A-D e K-S (4%) para a distribuição de Weibull embora não sejam estatisticamente significativos, foram os que tiveram maior valor, e considerando as referencias (BLISCHKE; KARIM; MURTHY, 2011) e (O'CONNOR; KLEYNER, 2012) foram adotados.

Da mesma forma que no experimento anterior, foi escolhido e aplicado também a distribuição Lognormal neste experimento.

### Resultados da Etapa 2, 3 e 4 - Gerar Aleatórios, Censuras e Aplicar Weibull

Os resultados dos tempos de vida B10 obtidos do experimento II estão demonstrados na Tabela 3. Lembrando que o valor alvo do grupo controle é de 349.326 Km, observa-se que:

1-As duas distribuições A-Lognormal e B-Weibull tiveram como resultado um valor muito próximo do alvo.

2-A distribuição de Weibull foi também a que mais se aproximou do valor do grupo de controle.

Tabela 3 – Resultados do Grupo Experimento II

	Censura geradas por:
Grupo Experimento II	C = 667
A-Lognormal	361.045
B-Weibull	355.704

Fonte: Autor (2019)

Foi realizado o teste de hipótese - teste t com os resultados do grupo experimento II conforme Figura 55, considerando a variação do resultado para  $c=667$  (do tamanho de amostra de dados censurados) e adotando como valor alvo de 350.000 Km. Conclui-se que há significância para 95% de confiança (valor  $p > 5\%$   $H_0$  aceita).

Figura 55 – Teste de Hipótese - Teste t Experimento II

Teste	
Hipótese nula	$H_0: \mu = 350000$
Hipótese alternativa	$H_1: \mu \neq 350000$
<u>Valor-T</u>	<u>Valor-p</u>
3.14	0.197
aceita	

Fonte: (MINITAB®, 2019)

Foi realizado o teste de hipótese - teste z comparando os resultados do experimento II, considerando a utilização de 667 dados censurados ( $c=667$ ) e aplicando o desvio padrão da população (grupo controle) conforme Figura 56, conclui-se que há significância para 95% de confiança (valor  $p > 5\%$   $H_0$  aceita).

Figura 56 – Teste de Hipótese - Teste z Experimento II

Teste	
Hipótese nula	$H_0: \mu = 350000$
Hipótese alternativa	$H_1: \mu \neq 350000$
<u>Valor-Z</u>	<u>Valor-p</u>
0,06	0,955

Fonte: (MINITAB®, 2019)

## 5 CONCLUSÃO

Com a aplicação da sistemática usada no experimento II, que combinou o método apresentado por (LIMON et al., 2016), o uso de teste de aderência para escolha da melhor distribuição de probabilidade no ajustes dos dados e considerou os conceitos de engenharia relacionada com a falha e seus modos e efeitos, conclui-se que o objetivo do presente trabalho foi atingido.

Com a proximidade dos resultados demonstrados no capítulo anterior entre os valores obtidos com a aplicação do método de censura por taxa de uso, comparados com os valores adotados neste estudo como referência, pode-se afirmar que o objetivo específico do presente trabalho também foi atingido.

O resultado encontrado no experimento II utilizando Weibull foi o que mais se aproximou do resultado de referência, sendo encontrado também significância estatística para 95% de confiança, portanto, é o que se mostrou mais eficaz.

Embora o experimento I, que utilizou o método de censura por uso, tenha sua execução simplificada por considerar apenas os dados das falhas, ou seja, dados mais fáceis de serem obtidos, e tenha atingido resultados com significância estatística para o tamanho de amostra de censura três vezes maior que o número de falhas, é recomendável mais pesquisas para a compreensão do efeito do tamanho da amostra de censuras nos resultados.

Os resultados encontrados nos grupos experimento I e II usando as distribuições Lognormal e Weibull tiveram resultados muito próximo do alvo, confirmando a constatação de Tudor e Watkins (2016) sobre a similariedade dos resultados com curvas de distribuição diferentes.

Os valores obtidos nos gráficos de probabilidades, conforme as Figura 28, para Weibull 2-p, Figura 33, para Weibull 3-p e Figura 38 para Lognormal, de correlação foram muito próximos, o que contribui para o efeito observado quanto à similariedade dos resultados de vida B10 encontrados no grupo experimento I.

Esperava-se, como recomendação da literatura conforme Limon et al. (2016) e outros, que a melhor distribuição de probabilidade encontrada fosse lognormal, porém foi encontrada tanto para o grupo controle I e o II a distribuição de Weibull como melhor ajuste. Ou seja, a avaliação do melhor ajuste deve ser sempre executada para garantir a escolha da melhor curva de distribuição.

A adoção do software (MINITAB®), 2019), que é um software usado comumente pelas empresas no mercado, para aplicação desta sistemática proposta permite a sua disseminação no mercado.

Constatou-se que vários métodos acadêmicos que usam dados de campo para estimativas de confiabilidade do produto, utilizam uma alta complexidade estatística e algébrica no desenvolvimento de suas fundamentações. E, para a aplicação destes, é necessário o conhecimento profundo do funcionamento e dos modos de falha do produto. Desta forma, para se obter os resultados de previsibilidade que a engenharia da confiabilidade possibilita, a junção deste dois elementos de conhecimento são imprescindíveis.

## 5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Como sugestão de temas para as próximas pesquisas sugere-se a influência do tamanho da amostra de dados censurados na utilização do método de censura por uso em função do efeito das mesmas observado nos resultados do experimento I.

Outro tema sugerido é como obter dados com a qualidade necessária para aplicação em estudos de confiabilidade com os recursos atuais de Big Data e a Indústria 4.0.

Por fim, para se obter os resultados de previsibilidade que a engenharia da confiabilidade possibilita, se faz necessário o desenvolvimento permanente de pesquisas aplicadas utilizando dados e problemas reais da indústria.

## REFERÊNCIAS

- ALAM, M. M.; SUZUKI, K. Lifetime estimation using only failure information from warranty database. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 58, p. 573–582, 2009.
- ALKAHTANIA, M. et al. A decision support system based on ontology and data mining to improve design using warranty data. **Computers & Industrial Engineering**, v. 128, p. 1027–1039, 2019.
- ALSINA, E. F. et al. On the use of machine learning methods to predict component reliability from data-driven industrial case studies. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, p. 2419–2433, 2017.
- AMIN, M. T.; KHAN, F.; ZUO, M. J. A bibliometric analysis of process system failure and reliability literature. **Engineering Failure Analysis**, v. 106, p. 1–24, 2019.
- ANASTASIADIS, S.; ANDERSON, B.; CHUKOVA, S. Auto warranty and driving patterns. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 116, p. 126–134, 2013.
- ANDERSON, B.; CHUKOVA, S.; HIROSE, Y. Using copulas to model and simulate two-dimensional warranty data. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 33, p. 595–605, 2017.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 22, p. 241 – 264, 2002.
- BERTSCHE, B. **Reliability in automotive and mechanical engineering**. Berlin: Springer, 2008.
- BETTINI, G.; GIANANTE, R.; TUCCI, M. Forecasting fleet warranty returns using modified reliability growth analysis. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, RAMS, 7., 2007, Orlando. **Proceedings**. Orlando: IEEE, 2007. p. 350–355.
- BIROLINI, A. **Reliability Engineering Theory and Practice**. Firenze: Springer, 2014.
- BLISCHKE, W. R.; KARIM, M. R.; MURTHY, D. N. P. **Warranty Data Collection and Analysis**. New York: Springer, 2011.
- COIT, D.; DEY, K. Analysis of grouped data from field-failure reporting systems. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 65, p. 95 – 101, 1999.
- DAI, A. et al. Field reliability modeling based on two-dimensional warranty data with censoring times. **Quality Engineering**, v. 29, p. 468 – 483, 2017.
- DHILLON, B. S. **Applied Reliability and Quality: Fundamentals, methods and procedures**. London: Springer, 2007.
- DURIVAGE, M. A. **Practical Engineering, Process, and Reliability Statistics**. Milwaukee: ASQ, 2015.
- GUPTA, S. K.; DE, S.; CHATTERJEE, A. Warranty forecasting from incomplete two-dimensional warranty data. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 126, p. 1–13, 2014.
- GUPTA, S. K.; DE, S.; CHATTERJEE, A. Some reliability issues for incomplete two-dimensional warranty claims data. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 157, p. 64 – 77, 2017.

- HONARI, B.; DONOVAN, J. Early detection of reliability changes for a non-poisson life model using field failure data. **IEEE**, v. 26, p. 346–349, 2007.
- HSU, N. J.; TSENG, S. T.; CHEN, M. Adaptive warranty prediction for highly reliable products. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 64, p. 1057 – 1067, 2015.
- JIANG, R. **Introduction to Quality and Reliability Engineering**. Piscataway: Springer, 2015.
- KARIM, R.; YAMAMOTO, W.; SUZUKI, K. Warranty claims forecasting based on a general imperfect repair model considering usage rate. **Lifetime Data Analysis**, v. 7, p. 173 – 186, 2001.
- KARIM, R.; YAMAMOTO, W.; SUZUKI, K. Analysis of warranty claim data: a literature review. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v. 22, p. 667 – 686, 2005.
- LAFRAIA, J. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- LAWLESS, J.; CROWDER, M.; LEE, K. A. Monitoring warranty claims with cusums. **Technometrics**, v. 54, p. 269–278, 2012.
- LIMON, S. et al. Reliability estimation considering usage rate profile and warranty claims. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability**, v. 230, p. 297 – 308, 2016.
- MA, Y.; XIE, L. Study on processing method and engineering application of censored data. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, v. 17, p. 354–362, 2017.
- MAJESKE, K. A non-homogeneous poisson process predictive model for automobile warranty claims. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 92, p. 243–251, 2007.
- MARCORIN, A. J.; ABACKERLI, A. J. Field failure data: an alternative solution for reliability analysis. **Revista de Ciência e Tecnologia, Piracicaba**, v. 11, p. 23 – 28, 2002.
- MARSHALL, S. E.; CHUKOVA, S. On analysing warranty data from repairable items. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 26, p. 43–52, 2010.
- MARTINS, R.; MELLO, C.; TURRIONI, J. **Guia para elaboração de monografia e TCC em Engenharia de Produção**. São Paulo: Atlas, 2014.
- MEEKER, W. Q.; HONG, Y. Reliability meets big data: opportunities and challenges. **Quality Engineering**, v. 26, p. 102–116, 2014.
- MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. São Paulo: Elsevier, 2012.
- MIKULEC, N.; FELKE, T.; BANGALE, S. Analysis of warranty data to identify improvements to vehicle reliability and service information. **SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems**, v. 126, p. 405–413, 2017.
- MINITAB®: Software estatístico. [S.l.]: MINITAB®. Versão 18, 2019. Disponível em: <http://minitab.com>. Acesso em: 20 set 2019.
- MITROFF, I. et al. On the use of machine learning methods to predict component reliability from data-driven industrial case studies. **Interfaces**, v. 4, p. 46–58, 1974.
- MOUBRAY, J. **Reliability Centred Maintenance**. London: Butterworth-Heinemann, 1997.

- MURTHY, D. N. P. Product reliability and warranty: an overview and future research. **Produção**, v. 17, p. 426 – 434, 2007.
- MURTHY, D. N. P.; BLISCHK, W. **Reliability**: modeling, prediction, and optimization. Hoboken: John Wiley & Sons, 2000.
- NACHLAS, J.; KUMAR, A. Reliability estimation using doubly-censored field data. **IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY**, v. 42, p. 268–279, 1993.
- O’CONNOR, P.; KLEYNER, A. **Practical reliability engineering**. United Kingdom: A John Wiley and Sons, 2012.
- ORACLE®: Software estatístico. [S.l.]: Oracle Crystal Ball®. Versão 11.1.2.4, 2019. Disponível em: <https://www.oracle.com/middleware/technologies/crystalball/downloads.html>. Acesso em: 20 set 2019.
- O’CONNOR, A. N.; MODARRES, M.; MOSLEH, A. **Probability Distributions Used in Reliability Engineering**. Maryland: Center for Risk and Reliability University of Maryland, 2016.
- PENG, Y. et al. Dynamic reliability assessment and prediction for repairable systems with interval-censored data. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 159, p. 301–309, 2017.
- RAI, B.; SINGH, N. Hazard rate estimation from incomplete and unclean warranty data. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 81, p. 79–92, 2003.
- RAI, B.; SINGH, N. Customer-rush near warranty expiration limit, and nonparametric hazardrate estimation from known mileage accumulation rates. **IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY**, v. 55, p. 480–489, 2006.
- RAI, B. K.; SINGH, N. **Reliability - Modeling, Prediction, and Optimization - Issues, Strategies, and Methods**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2009.
- RAJPATHAK, D.; DE, S. A data- and ontology-driven text mining-based construction of reliability model to analyze and predict component failures. **Knowledge and Information Systems**, v. 46, p. 87–113, 2016.
- REGATTIERI, A.; MANZINI, R.; BATTINI, D. Estimating reliability characteristics in the presence of censored data: A case study in a light commercial vehicle manufacturing system. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 95, p. 1093–1102, 2010.
- RUHI, S.; SARKER, S.; KARIM, M. Mixture models for analyzing product reliability data: a case study. **SpringerPlus**, v. 4, p. 634–648, 2015.
- SCIENCE, W. O. **Base de dados bibliográficos**.: Mapa de palavras-chave "warranty data", "censored data" e "reliability". 2019. Disponível em: <<https://login.webofknowledge.com>>. Acesso em: 25 de Junho 2019.
- SCIENCE, W. O. **Base de dados bibliográficos**.: Mapa de palavras-chave "warranty data", "censored data" e "reliability". 2019. Disponível em: <<https://login.webofknowledge.com>>. Acesso em: 30 maio 2017.
- SCOPUS. **Base de dados bibliográficos**.: Mapa de palavras-chave "warranty data", "censored data" e "reliability". 2019. Disponível em: <<https://www.scopus.com/>>. Acesso em: 25 de Junho 2019.
- SCOPUS. **Base de dados bibliográficos**.: Mapa de palavras-chave "warranty data", "censored data" e "reliability". 2019. Disponível em: <<https://www.scopus.com/>>. Acesso em: 30 maio 2017.

- SRINIVASAN, R. et al. Modelling an optimized warranty analysis methodology for fleet industry using data mining clustering methodologies. **Procedia Computer Science**, v. 87, p. 240 – 245, 2016.
- TUDOR, P.; WATKINS, A. J. Does distribution choice matter in practical reliability analysis? **2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium IEEE**, p. 1–6, 2016.
- WANG, L.; SUZUKI, K.; YAMAMOTO, W. Age-based warranty data analysis without date-specific sales information. **Applied Stochastic Models in Business and Industry**, v. 18, p. 323–337, 2002.
- WANG, X.; XIE, W. Two-dimensional warranty: A literature review. **Journal Risk and Reliability**, v. 232(3), p. 284–307, 2018.
- WASSERMAN, G. S. **Reliability Verification, Testing, and Analysis in Engineering Design**. New York: Marcel Dekker, 2002.
- WU, S. Warranty data analysis: a review. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 28, p. 795 – 805, 2012.
- WU, S. A review on coarse warranty data and analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 114, p. 1 – 11, 2013.
- YANG, D.; HE, Z.; HE, S. Warranty claims forecasting based on a general imperfect repair model considering usage rate. **Reliability Engineering and System**, v. 145, p. 147 – 154, 2016.
- YANG, G.; ZAGHATI, Z. Two-dimensional reliability modeling from warranty data. **Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium**, p. 272–278, 2002.
- YE, Z.; NG, H. K. T. Annals of applied statistics. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 8, p. 1713–1727, 2014.
- ZHANG, M.; YE, Z.; XIE, M. c. A stochastic em algorithm for progressively censored data analysis. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 30, p. 711–722, 2014.