

**ROGÉRIO DE JESUS HULTMANN**

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE DE PNEUS DE RODAGEM**

**CURITIBA  
2011**

**ROGÉRIO DE JESUS HULTMANN**

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE DE PNEUS DE RODAGEM**

**Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, área de concentração em Programação Matemática mantido pelo Setor de Ciências Exatas e pelo Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.**

**Orientador: Prof. Dr. Eng. Anselmo Chaves Neto**

**CURITIBA  
2011**

## DEDICATÓRIA

A Deus, cuja infinita sabedoria contém toda a ciência conhecida e também aquela que ainda esta por ser revelada.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Anselmo Chaves Neto por acreditar na realização deste trabalho apoiando incondicionalmente a conclusão do mesmo com sua elevada competência e exemplo de tenacidade.

Ao estatístico Marco Antônio Bunesi pela cessão dos dados.

Ao Rogério de Jesus Hultmann Filho pelo apoio na digitação e conferência dos dados e digitalização das imagens.

A minha esposa Bernali Alessandra e filho Rogério pela compreensão pelos momentos de ausência.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia que conferem a este programa a elevada qualidade com que ele é distinguido.

Aos meus colegas sempre companheiros de jornada e sócios nas dificuldades.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>17</b>
1.1	O Problema.....	17
1.2	Objetivo .....	23
1.3	Justificativa .....	24
1.4	Estrutura do Trabalho .....	24
<b>2</b>	<b>Revisão de Literatura .....</b>	<b>25</b>
2.1	Histórico .....	27
2.2	Conceitos.....	30
2.3	Definições .....	31
2.3.1	Probabilidade .....	34
2.4	Finalidade .....	35
2.5	Aplicações .....	38
2.6	Desenvolvimento .....	40
2.7	Custos .....	41
2.8	Benefícios .....	43
2.9	Falha .....	44
2.9.1	Tipos de Falha .....	44
2.9.2	Custo de Falha.....	45
2.9.3	Detecção de Falhas .....	45
2.9.4	Redundância.....	49
2.9.5	Falha de Modo Comum .....	50
2.10	Projeto Robusto .....	50
2.10.1	Presença de Ruído em Projeto Robusto .....	51
2.10.2	Tipos de Ruídos.....	51
2.11	Curva da Banheira.....	52
2.12	Função de Confiabilidade .....	56
2.13	Função Probabilidade de Falha .....	59
2.14	Função de Risco .....	60
2.15	Relacionamento entre a Função de Confiabilidade e a Função de Risco	61
2.16	Tempo de Falha.....	62
2.17	Tempo de Falha.....	63
2.18	Censuras .....	63
2.19	Parâmetros da Confiabilidade.....	64
2.19.1	Tempo Médio Entre Falhas .....	64

2.19.2	Tempo Médio Até Falhar .....	64
2.19.3	Tempo Médio de Reparo .....	64
2.19.4	Disponibilidade .....	65
2.19.5	Mantenabilidade .....	67
2.20	Análise do Tempo de Falha .....	68
2.21	Análise paramétrica e Análise não paramétrica.....	68
2.22	Estimadores Não Paramétricos da Função de Confiabilidade .....	70
2.22.1	Estimador da Tabela de Vida .....	71
2.22.2	Estimador de Kaplan-Meier .....	71
2.22.3	Comparação entre Estimador Tempo de Vida e Estimador de Kaplan-Meier .....	73
2.22.4	Intervalo de Confiança Para o Estimador de Kaplan-Meier da Confiabilidade.....	74
2.22.5	Transformação Para Valores Extremos de $R(t)$ .....	74
2.24	Métodos Paramétricos Para Análise de Tempo de falha .....	75
2.24.1	Métodos Para Estimativa de Parâmetros .....	76
2.24.2	Testes de Aderência.....	80
2.24.3	Distribuição Normal de Probabilidade.....	82
2.24.4	Distribuição Exponencial de Probabilidade.....	87
2.24.5	Distribuição Weibull de Probabilidade .....	90
2.24.6	Distribuição Log-normal de Probabilidade .....	96
2.25	Modelos Para Dados Acelerados de Falha.....	100
2.25.1	Suposições Comuns aos Modelos Para Dados Acelerados de Falha.....	100
2.26	Distribuições de Valores Extremos .....	101
2.26.1	Distribuição Gumbel (extremo valor) .....	101
2.26.2	Distribuição de Extremo Valor Logaritmico.....	104
2.26.3	Distribuição Weibull .....	105
2.27	Testes Acelerados de Confiabilidade.....	105
2.27.1	Objetivos.....	107
2.27.2	Variáveis de Estresse .....	108
2.27.3	Aumento do Estresse .....	109
2.27.4	Degradação .....	110
2.27.5	Modelo do Produto .....	110
2.27.6	Forma de Aplicação do Teste Acelerado de Confiabilidade .....	111
2.27.7	Modelos Para a Relação Estresse e Resposta .....	114
2.28	Teste log-rank.....	118
2.29	Pneus .....	120
2.30	Partes de um Pneu .....	122

2.31	Estrutura de um Pneu .....	123
2.32	Principais tamanhos de pneus e aplicações .....	126
2.33	Processo de fabricação do pneu.....	127
2.34	Relação entre pressão e carga .....	129
2.35	Relação entre velocidade e calor.....	130
2.36	Modos de falha do pneu .....	131
2.37	Testes em pneus .....	133
<b>3</b>	<b>Material e Método.....</b>	<b>135</b>
3.1	Material .....	135
3.2	Método .....	137
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão.....</b>	<b>140</b>
4.1	Valores estatísticos da quilometragem das marcas e modelos rodadas em cada vida pelos pneus estudados .....	140
4.2	Verificação do ajuste dos dados às distribuições de probabilidade .....	140
4.3	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para pneus novos	141
4.4	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para pneus que sofreram uma recapagem .....	144
4.5	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para pneus que sofreram duas recapagens.....	147
4.6	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para pneus que sofreram três recapagens.....	151
4.7	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para pneus que sofreram mais de três recapagens.....	153
4.8	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 291 3/06 .....	156
4.9	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 291 7/06 .....	158
4.10	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 358 5/06 .....	160
4.11	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 358 7/06 .....	163
4.12	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 359 3/06 .....	165
4.13	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 359 7/06 .....	168
4.14	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Michelin Xze 2 8/06 .....	170
4.15	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Michelin Xzu 2 7/06 .....	172
4.16	Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para todos os pneus .....	175

4.17 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para Quilometragem Total de Pneus Que Sofreram Três Recapagens.....	177
<b>5 Conclusão .....</b>	<b>181</b>
<b>6 Referências Bibliográficas.....</b>	<b>1813</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– DIAGRAMA DE ISHIKAWA: CAUSAS DA VARIABILIDADE..	20
FIGURA 2	– CUSTOS DE GARANTIA PARA TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE VALORES CRÍTICOS PARA TRANSMISSÕES .....	21
FIGURA 3	– OS DIVERSOS ASPECTOS DA CONFIABILIDADE .....	22
FIGURA 4	– ETAPAS ONDE É POSSÍVEL OCORRER FALHA.....	37
FIGURA 5	– ETAPAS DE APLICAÇÃO DA CONFIABILIDADE.....	38
FIGURA 6	– RELAÇÃO ENTRE CONFIABILIDADE E CUSTO .....	42
FIGURA 7	– CONFIABILIDADE X CUSTOS.....	43
FIGURA 8	– PROCESSO DE INVESTIGAÇÃO DE CAUSAS BÁSICAS DE FALHA .....	47
FIGURA 9	– CURVA DA BANHEIRA TEÓRICA .....	54
FIGURA 10	– CURVA DA BANHEIRA COM DADOS REAIS .....	55
FIGURA 11	– CURVA DA BANHEIRA CARACTERÍSTICA PARA <i>SOFTWARE</i> .....	55
FIGURA 12	– CURVA DA BANHEIRA CARACTERÍSTICA PARA COMPONENTES ELETRÔNICOS .....	56
FIGURA 13	– CURVA DA BANHEIRA CARACTERÍSTICA PARA EQUIPAMENTOS MECÂNICOS .....	56
FIGURA 14	– EXEMPLO DE FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE .....	57
FIGURA 15	– FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE PARA DOIS PRODUTOS.....	58
FIGURA 16	– GRÁFICO DA FUNÇÃO DENSIDADE DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	83
FIGURA 17	– GRÁFICO DA PROBABILIDADE ACUMULADA DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL .....	84
FIGURA 18	– GRÁFICO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL .....	86
FIGURA 19	– GRÁFICO DA FUNÇÃO DE RISCO DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	86
FIGURA 20	– GRÁFICO DA FUNÇÃO DENSIDADE DA DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL .....	87

FIGURA 21	– GRÁFICO DA PROBABILIDADE ACUMULADA DA DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL .....	88
FIGURA 22	– GRÁFICO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE DA DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL .....	88
FIGURA 23	– GRÁFICO DA FUNÇÃO DE RISCO DA DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL .....	89
FIGURA 24	– RELAÇÃO DO PARÂMETRO $\beta$ DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL COM AS FASES DA CURVA DA BANHEIRA .....	91
FIGURA 25	– GRÁFICO DA FUNÇÃO DENSIDADE DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL .....	92
FIGURA 26	– GRÁFICO DA PROBABILIDADE ACUMULADA DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL.....	93
FIGURA 27	– GRÁFICO DA FUNÇÃO CONFIABILIDADE DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL.....	94
FIGURA 28	– GRÁFICO DA FUNÇÃO DE RISCO DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL .....	94
FIGURA 29	– GRÁFICO DA FUNÇÃO DENSIDADE DA DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL.....	97
FIGURA 30	– GRÁFICO DA FUNÇÃO PROBABILIDADE ACUMULADA DA DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL .....	98
FIGURA 31	– GRÁFICO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE DA DISTRIBUIÇÃO LOG- NORMAL .....	99
FIGURA 32	– GRÁFICO DA FUNÇÃO DE RISCO DA DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL.....	99
FIGURA 33	– DISTRIBUIÇÃO DE VALOR EXTREMO.....	103
FIGURA 34	– FUNÇÃO DISTRIBUIÇÃO DE EXTREMO VALOR COM MÁXIMOS E MÍNIMOS E RESPECTIVOS PARÂMETROS .	104
FIGURA 35	– FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE DE UMA DISTRIBUIÇÃO DE EXTREMO VALOR DE MÁXIMOS E MÍNIMOS .....	104
FIGURA 36	– ESTRESSE CONSTANTE.....	112
FIGURA 37	– ESTRESSE NA FORMA ESCADA .....	113
FIGURA 38	– ESTRESSE NA FORMA PROGRESSIVA.....	114
FIGURA 39	– PARTES DE UM PNEU .....	122

FIGURA 40 – DIFERENÇA DE ESTRUTURA ENTRE PNEUS RADIAIS E DIAGONAIS.....	124
FIGURA 41 – SEÇÃO DE PNEU RADIAL DE CARGA.....	125
FIGURA 42 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA PNEUS NOVOS ....	142
FIGURA 43 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS NOVOS.....	144
FIGURA 44 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA PNEUS QUE SOFRERAM UMA RECAPAGEM .....	145
FIGURA 45 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS QUE SOFRERAM UMA RECAPAGEM.....	146
FIGURA 46 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA PNEUS QUE SOFRERAM DUAS RECAPAGENS .....	147
FIGURA 47 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS QUE SOFRERAM DUAS RECAPAGENS.....	150
FIGURA 48 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA PNEUS QUE SOFRERAM TRÊS RECAPAGENS .....	151
FIGURA 49 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS QUE SOFRERAM TRÊS RECAPAGENS .....	153
FIGURA 50 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA PNEUS QUE SOFRERAM MAIS DE TRÊS RECAPAGENS .....	154
FIGURA 51 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS QUE SOFRERAM MAIS DE TRÊS RECAPAGENS.....	155
FIGURA 52 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 291 3/06 .....	156
FIGURA 53 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 291 3/06 .....	157
FIGURA 54 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 291 7/06 .....	158
FIGURA 55 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 291 3/06 .....	159
FIGURA 56 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 358 5/06 .....	160
FIGURA 57 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 358 5/06 .....	162

FIGURA 58 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 358 7/06 .....	163
FIGURA 59 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 358 7/06 .....	165
FIGURA 60 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 359 3/06 .....	166
FIGURA 61 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 359 3/06 .....	167
FIGURA 62 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 359 7/06 .....	168
FIGURA 63 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 359 7/06 .....	169
FIGURA 64 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU MICHELIN Xze 2 8/06.....	170
FIGURA 65 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU MICHELIN Xze 2 8/06.....	172
FIGURA 66 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU MICHELIN Xzu 2 7/06.....	173
FIGURA 67 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU MICHELIN Xzu 2 7/06.....	174
FIGURA 68 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA TODOS OS PNEUS .....	175
FIGURA 69 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA TODOS OS PNEUS .....	177
FIGURA 70 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA QUILOMETRAGEM TOTAL DE PNEUS COM TRÊS RECAPAGENS .....	178
FIGURA 71 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS COM TRÊS RECAPAGENS .....	179

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– FATORES AVALIADOS NA AQUISIÇÃO DE UM NOVO VEÍCULO .....	36
TABELA 2	– DESCRIÇÃO DA ESCALA DE SEVERIDADE.....	46
TABELA 3	– ESCALA DE AVALIAÇÃO DE OCORRÊNCIA .....	48
TABELA 4	– ESCALA DE DETECÇÃO DE FALHA.....	48
TABELA 5	– DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA CURVA DA BANHEIRA .....	54
TABELA 6	- COMPORTAMENTO DA FUNÇÃO TAXA DE FALHAS COM O VALOR DE $\beta$ .....	95
TABELA 7	– INTERPRETAÇÃO FÍSICA SOBRE OS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL.....	95
TABELA 8	– MEDIDAS DE DESEMPENHO E FATOR DE ESTRESSE...	109
TABELA 9	– QUANTIDADE INICIAL DE UNIDADES NAS AMOSTRAS CONFORME MARCA/MODELO DE PNEU.....	137
TABELA 10	– MARCAS E MODELOS UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DAS FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE.....	137
TABELA 11	– ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM DOS PNEUS UTILIZADOS NO ESTUDO .....	140
TABELA 12	– P-VALOR PARA VERIFICAÇÃO DO AJUSTAMENTO DOS DADOS AOS MODELOS CLÁSSICOS DE PROBABILIDADE .....	141
TABELA 13	- VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA POR CADA MODELO DE PNEU NOVO .....	142
TABELA 14	– P-VALOR DO TESTE <i>LOG-RANK</i> ENTRE CADA MODELO DE PNEU NOVO .....	143
TABELA 15	- VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA POR CADA MODELO DE PNEU APÓS PRIMEIRA RECAPAGEM .....	145
TABELA 16	– P-VALOR DO TESTE <i>LOG-RANK</i> ENTRE CADA MODELO DE PNEU APÓS PRIMEIRA RECAPAGEM.....	146

TABELA 17 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA POR CADA MODELO DE PNEU APÓS SEGUNDA RECAPAGEM .....	148
TABELA 18 - P-VALOR DO TESTE <i>LOG-RANK</i> ENTRE CADA MODELO DE PNEU APÓS SEGUNDA RECAPAGEM .....	149
TABELA 19 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA POR CADA MODELO DE PNEU APÓS TERCEIRA RECAPAGEM .....	152
TABELA 20 - P-VALOR DO TESTE <i>LOG-RANK</i> ENTRE CADA MODELO DE PNEU APÓS TERCEIRA RECAPAGEM .....	152
TABELA 21 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA POR CADA MODELO DE PNEU APÓS MAIS DE TRÊS RECAPAGENS.....	154
TABELA 22 - P-VALOR DO TESTE <i>LOG-RANK</i> ENTRE CADA MODELO DE PNEU APÓS MAIS DE TRÊS RECAPAGENS .....	155
TABELA 23 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 291 3/06.....	157
TABELA 24 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 291 3/06.....	157
TABELA 25 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 291 7/06.....	159
TABELA 26 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 291 7/06.....	159
TABELA 27 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 358 5/06.....	161
TABELA 28 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 358 5/06.....	161

TABELA 29 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 358 7/06.....	164
TABELA 30 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 358 7/06.....	164
TABELA 31 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 359 3/06.....	166
TABELA 32 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 359 3/06.....	167
TABELA 33 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 359 7/06.....	168
TABELA 34 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 359 7/06.....	169
TABELA 35 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU MICHELIN Xze 2 8/06.....	170
TABELA 36 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU MICHELIN Xze 2 8/06.....	171
TABELA 37 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU MICHELIN Xzu 2 7/06.....	173
TABELA 38 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU MICHELIN Xzu 2 7/06.....	174
TABELA 39 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DE TODOS OS PNEUS .....	175

TABELA 40 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DE TODOS OS PNEUS .....	176
TABELA 41 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM TOTAL RODADA NAS TRÊS PRIMEIRAS FASES DE VIDA DOS PNEUS .....	178
TABELA 42 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE A QUILOMETRAGEM TOTAL DE PNEUS COM TRÊS RECAPAGENS .....	179

# 1 Introdução

## 1.1 O Problema

A evolução da sociedade é conseqüência do ímpeto para o atendimento das necessidades do ser humano. No atendimento dessas necessidades o intelecto humano desenvolveu os mais diversos engenhos nas áreas de atuação humana, tais como: agronomia, saúde, engenharia, biologia, entre outras. Neste contexto foram desenvolvidos componentes eletro-eletrônicos cuja confiança de funcionamento depende em parte de fator aleatório. Segundo Piazza (2000) alguns parâmetros básicos, tais como, massa, dimensões, coeficiente de atrito, resistência a tensões, não são exatamente determinísticos, estando sujeitos à variações associadas ao processo, aos materiais, aos fatores humanos e às aplicações, sendo que alguns parâmetros também variam com o tempo.

Todos os elementos deste complexo conjunto precisam ter asseguradas características específicas que os qualificam para o uso. Uma das características mais importantes é a confiabilidade que o elemento possui.

De acordo com Piazza (2000) “o estudo de confiabilidade refere-se a ocorrências aleatórias de eventos indesejáveis”. Através da confiabilidade é possível avaliar as questões de segurança e de durabilidade. Isto é a base para se dimensionar a garantia do produto e, conseqüentemente, se estimar os custos com essa garantia.

De acordo com Lafraia (2001) a Confiabilidade tem relação com a confiança que o consumidor tem em um produto, equipamento ou sistema de tal forma que não apresentem falhas durante sua utilização.

Segundo Pugsley (1966) *apud* Chaves Neto (2005) o risco é uma característica implícita a todos os sistemas de engenharia.

Todos os produtos apresentam um grau de incerteza em seu funcionamento devido à variabilidade presente no processo de fabricação por causas que podem ser resumidas como 6M, ou seja: matéria prima, mão de obra, método de trabalho, meio ambiente, meios de medição, máquinas. Pode ocorrer, ainda, alguma falha na concepção do projeto. De forma que é sempre

possível ocorrerem imprevisibilidades no desenvolvimento e na produção de bens.

Conforme conceitua Paranhos Filho (2007), a mão de obra é frequentemente indicada como a causa da maioria das falhas, contudo uma análise mais profunda pode apontar a causa dos problemas relacionados a mão de obra: falta de treinamento, adaptação, tipo físico, competência e habilidade. Também a fadiga do operador ou o decréscimo da vigilância podem contribuir negativamente no processo. Em relação ao material existem muitos aspectos a serem considerados como qualidade, especificação e condições de armazenagem entre outros. As falhas relacionadas às máquinas podem ser identificadas mais facilmente porque apresentam sinais visíveis em situações de problema, porém situações como folgas e vibrações excessivas podem demorar a serem descobertas. Em relação às causas da variação nas máquinas é necessário verificar se:

- atende às necessidades de tolerância;
- atende à capacidade do processo;
- está em perfeitas condições;
- possui folgas que precisam ser compensadas com manobras do operador durante a operação;
- possui nível de vibração e de ruído;
- o *layout* é adequado com espaço suficiente para a manutenção ser feita com facilidade.

Em relação ao método um estudo bem feito pode ser fundamental para a qualidade de um processo e minimização de falhas observando e respondendo às seguintes questões:

- sequência correta do método;
- estabelecimento correto de padrões;
- clareza de padrões para os executores do processo;
- segurança do método;
- correta especificação dos instrumentos;

- calibração de instrumentos de acordo com as tolerâncias exigidas;
- garantia da qualidade do produto pelo método;
- garantia da eficiência do processo pelo método.
- *layout* adequado da área de trabalho espaço para operador, materiais, ferramentas;
- existência de instrumentos e dispositivos suficientes e adequados para o trabalho.

O meio ambiente influi na operação, no aspecto físico frio, calor, ventilação ou qualquer outra alteração física ambiental. E, também, quanto à administração do trabalho observa-se que o aspecto psicológico recebe influência do clima organizacional do local de trabalho.

Em relação aos meios de medição os mesmos são importantes para indicar se uma peça está dentro da tolerância de projeto e, conseqüentemente, os instrumentos de medição devem estar muito bem calibrados. Assim, em relação aos meios de medição é importante avaliar:

- se as instruções de medição estão corretas e feitas de forma que possam ser entendidas perfeitamente pelo operador;
- se os instrumentos são adequados para as condições necessárias à peça;
- se os instrumentos estão calibrados adequadamente dentro da tolerância projetada;
- se existe um plano de calibração periódica para os instrumentos e estes têm uma identificação clara das datas de calibração de forma a assegurar a garantia do processo.

As indústrias de porte médio ou grande, geralmente, possuem laboratório de metrologia para calibrar todos os seus instrumentos. As outras empresas de menor porte costumam levá-los a algum laboratório para serem calibrados. Em Curitiba, este trabalho costuma ser feito pelo Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR).

O método 6M pode ser representado pelo diagrama de *Ishikawa*, através do qual as verdadeiras causas de um problema podem ser identificadas. A figura 1, adiante, ilustra essa afirmação.

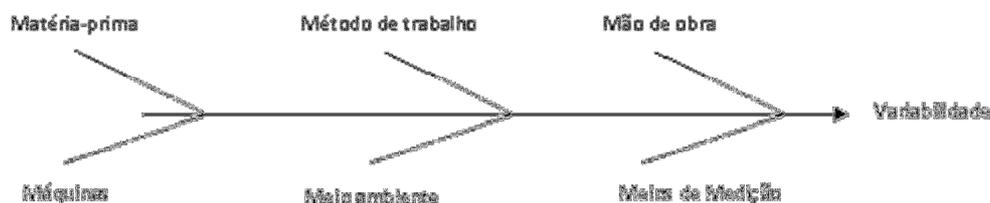


FIGURA 1 – DIAGRAMA DE ISHIKAWA: CAUSAS DA VARIABILIDADE  
 FONTE: adaptado de PARANHOS FILHO (2007)

As características construtivas dos produtos irão determinar sua durabilidade, que pode ser traduzida na quantidade de usos nas quais estes produtos desempenham satisfatoriamente as funções para as quais foram projetados.

Em uma sociedade competitiva é necessário propiciar uma durabilidade maior aos equipamentos, a fim de que seus produtores possam ampliar o prazo de garantia que oferecem aos compradores dos mesmos. Além de garantir que os recursos utilizados na sua produção tenham um tempo de utilização mais prolongado, evitando o sucateamento recente e também a ampliação de resíduos industriais cuja reutilização pode ser inviável ou extremamente onerosa. De acordo com Freitas e Colosimo (1997) o rápido desenvolvimento tecnológico e a competição mundial implicaram na elevação dos padrões de consumo e ampliação da quantidade de opções de compra pelos consumidores. Para Piazza (2000) a confiabilidade tem um grande efeito na determinação de vendas futuras para os fabricantes.

A confiabilidade de um produto interfere favoravelmente na satisfação do consumidor e influencia, ainda que inconscientemente nas decisões de compra pelos consumidores. A idéia de confiabilidade aparece naturalmente, embutida nos requisitos de qualidade intrínseca do produto, sobretudo os de uso doméstico, em geral associada à sua durabilidade. Uma empresa que objetiva a geração de produtos deve ter a preocupação com a confiabilidade do produto, seja no aspecto da durabilidade, manutenibilidade ou segurança. (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

Muitas vezes, para muitos produtos, a segurança é alcançada através de estruturas super dimensionadas, projetadas para suportar esforços muitas vezes muito superiores aos quais elas serão realmente submetidas. Este fato impacta em um maior custo para os produtos, além do uso de insumos de forma exagerada. A confiabilidade é obtida através de materiais mais espessos, maiores, melhores, mais nobres, e até mesmo pelo uso de equipamento reserva para atuar como substitutos no caso de falha do equipamento principal. (KARDEC; LAFRAIA, 2002)

Um projeto estrutural deve assegurar o desempenho do sistema observando as restrições econômicas existentes. A primeira responsabilidade da engenharia é a garantia do desempenho, incluindo a segurança. (CHAVES NETO, 2005).

Os processos de produção devem ser estatisticamente controlados e com as causas de variabilidade eliminadas a medida que as técnicas estatísticas as apontam. Isto fará com que os custos com desperdício em retrabalho, sucata e produtos defeituosos variados sejam minimizados. O custo com a garantia de um produto é fundamental para a produtividade de uma empresa. A figura 2, adiante, ilustra este argumento no caso da peça automobilística de transmissão nos automóveis. Observa-se, pelas curvas, que o produto japonês possui um desvio padrão muito menor que o produto americano, curva mais delgada, conseqüentemente o custo japonês com a garantia do produto é muito menor.

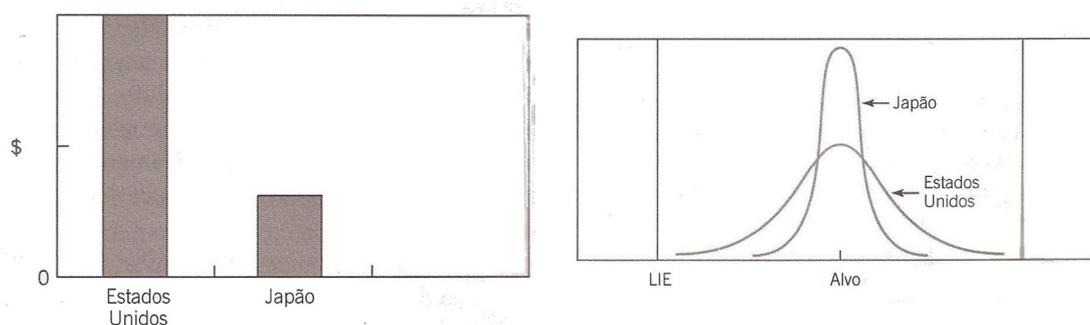


FIGURA 2 – CUSTOS DE GARANTIA PARA TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE VALORES CRÍTICOS PARA TRANSMISSÕES  
 FONTE: MONTGOMERY (2001)

Kardec e Lafraia (2002) afirmam que a probabilidade de funcionamento de um componente aumenta conforme ele seja bem dimensionado, ou seja, de

modo que a carga aplicada ao mesmo seja menor que a resistência do material empregado no mesmo.

A Confiabilidade é uma das técnicas estatísticas empregadas com sucesso na Engenharia que permite a abordagem sistemática dos problemas de funcionamento de produtos e estabelecendo bases comuns para estudo, discussão e terminologia apropriada para referências ao assunto.

A busca por essa segurança é consequência da aleatoriedade dos esforços e da aleatoriedade da resistência dos materiais aos quais os produtos podem ser submetidos.

É necessário avaliar as incertezas inerentes às variáveis de projeto, obtendo uma avaliação da probabilidade de falha da estrutura e a sensibilidade do projeto em relação à estas variáveis, para a finalização dos projetos de engenharia. A falta de conhecimento dessas informações impede que a garantia do desempenho seja completa na maioria das vezes dada a incerteza com que são tomadas as decisões no processo de planejamento. “Segundo FREUDENTHAL (1947), sob tais condições, não é possível (praticamente ou economicamente) assegurar absoluta segurança ou desempenho de sistemas de engenharia”. (CHAVES NETO, 2005).

Segundo Lafraia (2001) a Confiabilidade serviria para definir a margem de segurança que deve ser usada para os produtos, pois no projeto original o coeficiente de segurança é escolhido arbitrariamente em vista do desconhecimento de todas as variáveis do projeto, exceto em produtos simples.

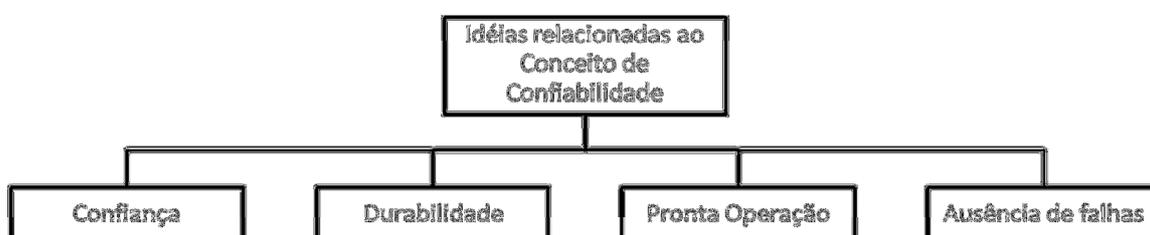


FIGURA 3 – OS DIVERSOS ASPECTOS DA CONFIABILIDADE  
FONTE: adaptado de LAFRAIA (2001)

Nesse contexto podem se incluídas estruturas de construção civil, estruturas mecânicas e, entre outras, pode-se citar o caso dos pneus de rodagem. Os pneus de rodagem são dimensionados, principalmente, visando as necessidades e tipos de performance desejada para os veículos.

Diversos são os produtos que fazem parte da composição de um pneu: borracha, óleos, carbono preto, pigmentos, antioxidantes, silicone e outros aditivos além de poliéster e aço. É bem conhecido que a qualidade dos materiais utilizados, bem como a mão-de-obra aplicada, influenciam a confiabilidade que o pneu inspira ao usuário.

Nesta dissertação discute-se a aplicação dos conceitos de Confiabilidade aos pneus de diferentes marcas e modelos para avaliar as suas várias respostas às condições de uso.

O pneu é um importante item de segurança de um veículo.

Segundo Gillespie (1992) *apud* Haviaras (2005) nos veículos modernos, exceto no que se refere às forças aerodinâmicas, todas as forças atuantes que determinam como o veículo efetua uma curva, freia ou acelera, são geradas pelo contato entre as pequenas áreas do solo e os pneus.

De acordo com o citado pode-se concluir que os pneus afetam diretamente a estabilidade, o conforto, a capacidade de frenagem e segurança dos veículos.

Devido à importância deste componente, sua manutenção em condições de funcionamento é necessária para que o veículo funcione de forma segura e eficaz.

Aragão Costa (2000) *apud* Haviaras (2005) afirma que dos custos com combustível e mão de obra, os custos relativos aos pneus é o de maior importância nas frotas de veículos de carga.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é construir as funções de confiabilidade de pneus de diferentes marcas e modelos e comparar sua durabilidade, ou melhor, a quilometragem rodada quando novos e após os recapes sofridos, bem como verificar as funções de confiabilidade de cada um dos modelos de pneus estudados em cada uma de suas fases de vida.

### 1.3 Justificativa

A construção de uma função de confiabilidade servirá para que as empresas que utilizam este produto de forma mais intensiva possam tomar decisões que propiciem maior eficácia às suas operações. Tais decisões poderão servir tanto para tomada de decisões quando da realização de futuras compras, através da comparação de sua durabilidade e custos de operação, bem como na programação das necessidades de manutenção e até mesmo da viabilidade econômica de fazê-la.

### 1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação é composta por esta introdução seguida pelo Capítulo 2 onde é feita uma revisão de literatura na qual são abordados os conceitos de Confiabilidade pertinentes à realização do trabalho e também da manufatura do pneu. Na sequência da dissertação são descritos os materiais e os métodos utilizados no Capítulo 3, no capítulo seguinte apresentam-se os resultados obtidos e se faz uma discussão. Finalmente apresenta-se a conclusão do trabalho e as referências bibliográficas utilizadas.

## 2 Revisão de Literatura

Segundo Inkotte (2003) melhorar incessantemente as operações, processos, estratégias e produtos ou serviços é o mote do princípio da melhoria contínua.

Há algum tempo as descobertas científicas permitiam que se dessem saltos na evolução tecnológica de produtos e serviços. A partir do estabelecimento de um patamar científico mais elaborado, as grandes descobertas - feitas esporadicamente - deram lugar ao desenvolvimento da ciência a passos menores, porém constantes e sua aplicabilidade na oferta de soluções para as necessidades da sociedade.

A aplicação das novas conquistas tecnológicas traz melhorias aos produtos ofertados pelas empresas que devem buscar a garantia de desempenho dos produtos, incluindo aí a segurança, observando a existência de restrições econômicas que são impostas pela realidade do mercado, conforme conceitua Chaves Neto (2005). O princípio da melhoria contínua garante que, a partir das ações de correção e de prevenção, as empresas sigam na busca da excelência de seus processos e demonstrem, efetivamente, foco no atendimento às necessidades dos clientes ao entender, atender e superar as expectativas dos mesmos, sendo esta a principal estratégia para manterem-se competitivas dentro do mercado.

Após o processo de globalização as empresas passaram a produzir seus produtos em plantas industriais localizadas em lugares diferentes e também a venda destes produtos passou a ser feita para mercados com características bastante diversas em condições climáticas e de usos diferentes e estes produtos devem ter assegurada a confiabilidade de seu uso em diferentes condições.

Conforme Freitas e Colosimo (1997) a decisão de compra é resultado da ponderação dos seguintes fatores:

- qualidade intrínseca: característica dos bens ou serviços que satisfazem às necessidades das pessoas que os recebem

tais como qualidade de som, imagem, estética e outras características;

- custo: num primeiro momento, somente o preço de compra;
- entrega: condições de entrega (local, prazo, quantidade).

Em última análise o que vai determinar a satisfação dos clientes e sua conseqüente retenção é o desempenho das características técnicas do produto ao longo do seu período estimado de vida.

O primeiro passo para o estabelecimento deste processo é o reconhecimento da existência da probabilidade de falha dos produtos cuja produção é sujeita à condições de produção cada vez mais rígidas. A partir do reconhecimento de que os produtos podem falhar é necessário compreender as causas das falhas e estabelecer estratégias para a diminuição dos impactos interno e externo das mesmas aumentando a credibilidade das empresas.

Lafraia (2001) afirma que a maior parte das variáveis que envolvem um projeto, tais como tolerâncias, material, solicitações, não são valores definidos pontualmente, mas sim podem variar. No desenvolvimento do produto, na fase de projeto, deve ser especificado um intervalo de variação com seus extremos denominados limites de especificação. Esses limites correspondem à faixa de tolerância, ou seja, dentro da qual o produto funcionará adequadamente. Estes limites são definidos pelos projetistas dependendo da variabilidade das características de qualidade do produto e da funcionabilidade do mesmo. Dessa forma as características de qualidade do produto são variáveis aleatórias e modelos probabilísticos podem ser ajustados a observações de valores dessas características. Portanto, é comum na indústria o uso de procedimentos estatísticos para monitorar as ocorrências de falhas. Segundo Lafraia (2001) esta maneira de tratar com o fenômeno “deve ser considerada mais próxima à realidade”.

A relevância deste processo se amplia com a inclusão de conceitos estatísticos mais complexos aos problemas. São esses conceitos que permitirão estabelecer critérios para mensurar taxas de falha e também estabelecer condições de previsibilidade de funcionamento adequado.

Muito já foi feito em prol do atendimento às necessidades do ser humano e atualmente a sociedade não tem sua evolução ocorrendo aos solavancos, mas como resultado de um processo contínuo de melhoria. A Confiabilidade é mais uma contribuição para que esse processo se refine cada vez mais. Segundo James R. Schesinger, Secretário de Estado de Defesa dos Estados Unidos da América, a “Confiabilidade é engenharia na sua forma mais prática”.

## 2.1 Histórico

Os esforços desenvolvidos durante a II Guerra Mundial ampliaram, por volta de 1940, maiores solicitações para o uso de sistemas eletrônicos que se tornaram mais complexos implicando na necessidade de uma abordagem metódica para a solução dos problemas operacionais, o que fez com que as forças armadas americanas criassem comitês para a avaliação de problemas de confiabilidade. A evolução dos esforços levou o Departamento de Defesa americano a criar, em 1952, o *Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment* (AGREE). Segundo Piazza (2000) a influência do AGREE foi determinante para toda a abordagem científica sobre confiabilidade através da publicação dos trabalhos realizados, especialmente os relacionados a equipamentos eletrônicos militares. De acordo com Lafraia (2001), HENLEY e KUMAMOTO foram os criadores da análise de confiabilidade enquanto o desenvolvimento das teorias matemáticas ocorreu na década de 1940 quando Robert Lusser desenvolveu uma equação associada à Confiabilidade de um sistema em série. Também os ingleses contribuíram para a evolução da teoria de Confiabilidade utilizando suas técnicas no desenvolvimento do Colossus, que foi desenvolvido em 1943 por *Tommy Flowers* no Centro de Pesquisa dos Correios em Londres com a finalidade de analisar mensagens criptografadas pelos alemães.

O grande salto no desenvolvimento de metodologia de cálculo e aplicações da confiabilidade ocorreu na década de 1950 com o surgimento da indústria aeroespacial e eletrônica junto com a indústria nuclear, foi nesta época que a necessidade da aplicação da Confiabilidade, especialmente na fase de projeto ao invés de concentrarem-se recursos para manutenção após a ocorrência de falhas. Ainda nesta época foram publicados os primeiros artigos

relacionados à análise de sistemas a três estados (modo de operação normal, modo de falha aberto e modo de falha fechado de DHILLON e SINGH e iniciaram os estudos sobre a aplicação de Confiabilidade relacionada ao comportamento humano. Em seguida, na década de 1960, houveram avanços nos desenvolvimentos de natureza prática e teórica entre eles a teoria da “Análise de Árvore de Falhas” (1961) de H. A. Watson e os trabalhos de COX e LEWIS que divulgaram importantes conceitos como renovação, estacionariedade, tendência, entre outros. Na mesma época surgiram várias publicações relativas ao assunto com um grau maior de maturidade. No campo de aplicações práticas foram estabelecidos os fundamentos da análise de Confiabilidade em sistemas mecânicos (estruturas) baseados em modelos denominados esforços e resistência e os estudos preliminares sobre confiabilidade em *hardware* computacional. A consolidação da análise de Confiabilidade em diversas áreas ocorreu a partir de 1970, com destaque para a área nuclear. Foi nessa época que *R. Billinton* publicou um texto voltado à aplicações específicas em sistemas eletroenergéticos e os primeiros modelos de análise de Confiabilidade em *software* computacional. A implantação definitiva das técnicas de análise de Confiabilidade ocorreu a partir de 1980 pelos países que adotavam tecnologia de ponta em seus processos. Lafraia (2001).

A partir do desenvolvimento dos conceitos de qualidade, principalmente no Japão, ampliou-se a utilização da confiabilidade tanto da indústria bélica como na produção de bens e serviços cuja produção cada vez mais se orientava na busca do atendimento às necessidades de operação, manutenção, assistência técnica e satisfação do cliente.

Atualmente a Confiabilidade é um importante campo de estudo, especialmente após a ocorrência de desastres de vulto cujas conseqüências foram de grande impacto:

- implosão, em 9 de abril de 1963, do submarino americano *The USS Thresher*, considerado à época como o mais avançado do mundo, causando a morte de 129 pessoas;

- explosão, em 1979, de um avião comercial DC-10, matando todos os passageiros, cuja causa diagnosticada foi a falta de manutenção;
- falha na válvula de um coração mecânico implantado em um cirurgia realizada em *Salt Lake City*, em 2 de dezembro de 1982;
- retirada de mercado do coração Jarvik (primeiro coração artificial do mundo), em abril de 1990, pela *Food and Drug Administration*, devido à deficiência na qualidade de fabricação que afetou a vida de 157 pacientes em um período de oito anos;
- vazamento de 25 toneladas de isocianeto de metila devido à defeito em uma válvula em uma fábrica de defensivos agrícolas da UNION CARBIDE em Bhopal, na Índia, causando a morte de 2.500 pessoas e outras 25.000 vítimas com lesões em 2 de dezembro de 1984;
- duas explosões em um reator nuclear em uma usina em Chernobyl, Ucrânia-U.R.S.S., causando a morte de 310 trabalhadores e necessidade de evacuação de 300.000 pessoas causando perdas econômicas de 3 bilhões de dólares e 2.634 quilômetros quadrados de área interdita, em 26 de abril de 1986;
- explosão da nave espacial *Challenger*, em 1986, e perda de dois reservatórios externos da nave *Columbia*, com custo estimado em 25 bilhões de dólares. A avaliação da probabilidade de acidente com esse ônibus espacial era perfeitamente possível de ser realizada com os dados existentes em 24 lançamentos anteriores. O modelo estatístico para avaliar essa chance é o logístico relacionando a temperatura (t) ambiental no momento do lançamento com a variável resposta dicotômica, acidente (1) e sucesso (0), usando os referidos dados. A chance estimada é de 99,6%.

No Brasil, as aplicações práticas de confiabilidade podem ser verificadas nos setores de telecomunicação, elétrico, militar, nuclear, automotivo, petrolífero e industrial em geral.

## 2.2 Conceitos

A argüição do que seja Confiabilidade não leva a respostas exatas; os consumidores a requerem nos produtos, porém não conseguem definir precisamente seu significado. Alguns respondem que o produto deve operar sem falhas, ou que o produto deverá funcionar sempre que os usuários quiserem utilizá-lo. De acordo com Piazza (2000), a Confiabilidade é um conceito abstrato.

Todo produto tem atributos que são utilizados para determinar a decisão de sua utilização. Assim o design, durabilidade, manuseabilidade, potência, capacidade, entre outras, são características que, de acordo com as necessidades do usuário, levarão à aquisição de um produto ou outro. A Confiabilidade é mais um destes atributos, assim como a capacidade e a potência, e é buscada por projetistas e construtores de sistemas de todo o tipo, sendo seu nível estabelecido na fase de projeto. A Confiabilidade está implicitamente incluída no conceito de qualidade não sendo conveniente dissociá-los. Assim, existe a necessidade de se quantificar a Confiabilidade de um ou produto, tendência que assumiu maiores proporções a partir da Segunda Guerra Mundial. A Confiabilidade traduz de forma coletiva a confiança no equipamento, em seus operadores, no seu projeto, durabilidade e presteza em operar sem falhas.

A confiabilidade é uma característica historicamente buscada por projetistas e construtores de todos os tipos de sistemas. O que houve de novo na segunda metade do século XX é o movimento para quantificar a Confiabilidade. É um movimento similar, e provavelmente tão importante quanto o movimento de séculos atrás para quantificar as propriedades dos materiais. (JURAN, *apud* LAFRAIA, 2001).

Confiabilidade é um conceito global, que se decompõe nas seguintes variáveis: fiabilidade, disponibilidade, reparabilidade, segurança contra acidentes e segurança contra acesso não autorizado.

Estas variáveis são ameaçadas por diversos impedimentos tais como: faltas, erros e falhas.

A Confiabilidade é uma medida da qualidade e do desempenho dos produtos que depende do tempo. Um componente submetido a um esforço pode assumir um estado de falha. Se este componente foi posto sob condições de esforço durante um tempo a partir de um instante inicial, chamado  $t_0$ , e observado até que pare de funcionar adequadamente sob o esforço aplicado em um instante chamado  $t_f$  a duração até falhar (tempo de vida)  $T = t_f - t_0$  pode ser considerada como uma variável aleatória contínua com alguma função densidade de probabilidade. Para Piazza (2000) as provas de que  $T$  pode ser previsto a partir de modelos determinísticos são empíricas e o emprego de um modelo probabilístico, considerando  $T$  como uma variável aleatória, constitui-se no único tratamento realista do assunto. De acordo com Lafraia (2001) a Confiabilidade é “um aspecto da incerteza da engenharia” associando a capacidade de trabalho de um item durante um intervalo de tempo à uma questão probabilística.

## 2.3 Definições

Segundo Kardec e Nascif (2010) o termo confiabilidade, do inglês *Reliability*, é originário das análises de falha em equipamentos eletrônicos para uso militar e teria surgido durante a década de 50, nos Estados Unidos.

Bergamo Filho (1997) define a Confiabilidade como a probabilidade de um produto executar, sem falhas, uma determinada missão, sob certas condições, durante um determinado período de tempo.

Tal definição estende o conceito de Confiabilidade muito além da simples idéia de durabilidade: “O meu Chevrolet 47 era um carro bom, pois era muito forte”. (BERGAMO FILHO, 1997)

A ampliação deste conceito leva ao estabelecimento de uma missão para o produto e assumindo uma probabilidade de ele executar esta missão. Considerando a probabilidade total isto implica no reconhecimento da

probabilidade de seu não funcionamento, e também enfoca a questão da funcionalidade do produto, ou seja: tem de atender às necessidades de seu usuário. Assim, a Confiabilidade se constitui em uma característica importante para componentes, produtos e sistemas completos.

A Confiabilidade pode ser entendida como uma metodologia para avaliar a performance de vida de produtos associada a ferramentas estatísticas sofisticadas a fim assegurar que a função destes produtos seja executada sem falhas durante um período de tempo sob condições estabelecidas. Conforme conceitua Lafraia (2001) a Análise de Confiabilidade tem seu aspecto fundamental caracterizado pela avaliação probabilística do risco/falha de um sistema ou produto.

De acordo com Chaves Neto (2005) a Confiabilidade é a probabilidade de que um componente ou sistema exerça com sucesso sua função, ou seja, que o produto tenha um bom desempenho durante um período de tempo previsto, sob as condições de operação especificadas no seu projeto.

Na visão de Lafraia (2001) confiabilidade é a probabilidade de que um componente ou sistema funcionando dentro dos limites especificados de projeto, não falhe durante o período de tempo previsto para a sua vida, dentro das condições de agressividade do meio.

De acordo com a NBR 5462-1994 apud Kardec e Nascif (2010) Confiabilidade,  $R(t)$ , do inglês *Reliability*, é capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo, sendo usada como uma medida de desempenho do produto.

Organismos internacionais apresentam definições para Confiabilidade entre as quais figuram três definições básicas para caracterização da Confiabilidade.

Segundo a *European Organization for Quality Control* (1965) a Confiabilidade é medida como uma probabilidade, e definida como a habilidade de um produto operar com sucesso, quando necessário, por um período de tempo pré-determinado, sob condições ambientais específicas.

Na definição do *US Military Handbook* (1970) a Confiabilidade é definida como a probabilidade de um produto executar a sua função durante um

determinado período de tempo, de acordo com condições pré-definidas de uso e manutenção.

O *BS Institution* (1970) e *UK Army* (1976) definem Confiabilidade como “a habilidade de um item executar a sua função sob determinadas condições específicas, por um período pré-determinado”.

A *BS 4778 (British Standard, apud Freitas e Colosimo, 1997)* apresenta como definição para confiabilidade “a capacidade de um item desempenhar satisfatoriamente a função requerida, sob condições de operação estabelecidas, por um período de tempo predeterminado”.

Confiabilidade de um sistema é a probabilidade de que, quando em condições ambientais estabelecidas, o sistema apresentará uma *performance* desejada (sem falhas) para um intervalo de tempo especificado. (PIAZZA, 2000).

Das definições apresentadas, segundo Piazza (2000), é possível concluir que:

- a Confiabilidade é uma probabilidade e como tal deve ser admitida a existência da possibilidade de falha, sendo quantificada através de um valor, que varia entre 0 e 1, assim como a probabilidade;
- a Confiabilidade tem significado quando avaliada como função do tempo em que se requer o desempenho dos produtos;
- a Confiabilidade de um produto deve ser estabelecida considerando-se as condições ambientais especificadas para sua operação;
- existe real necessidade de que engenheiros e projetistas conheçam detalhadamente o ambiente de operação dos produtos.

A partir das definições apresentadas destacam-se quatro fatores básicos:

- quantificação de confiabilidade como uma probabilidade;

- definição do desempenho requisitado ao produto a partir da definição das especificações de produto, das condições de operação e da precisão exigida do sistema;
- definição de tempo de operação exigido entre falhas;
- definição das condições ambientais (umidade, vibrações, temperatura, impurezas, incidências de luz, choques, mão de obra) em que o produto deve funcionar.

Freitas e Colosimo (1997) afirmam que é importante dar destaque a alguns dos elementos que são importantes na definição de confiabilidade, tais como:

- definição das funções para as quais o produto foi projetado;
- definição do desempenho satisfatório do produto (especificação de desempenho, definição de falha);
- definição das condições de operação (temperatura, vibração, altitude, carga, alimentação e manuseio);
- definição do período de tempo durante o qual o produto deve funcionar (número de horas, ciclos).

Assim é importante citar que todo produto exerce sua função durante um determinado período de tempo desde que seja utilizado dentro das especificações segundo as quais foi projetado, de forma conveniente, mediante correta instalação e condições de uso propícias.

### 2.3.1 Probabilidade

De acordo com Walpole *et al.* (2009) “Se um experimento pode resultar em qualquer um de  $N$  diferentes resultados equiprováveis, e se exatamente  $n$  desses resultados correspondem ao evento  $A$ , então a probabilidade do evento  $A$  é:

$$P(A) = \frac{n}{N} \quad (1)$$

Esta definição é conhecida como definição frequentista de probabilidade. Conforme cita James (1981) o matemático russo Andrei Nikolaevich Kolmogorov propôs uma definição que proporciona à Teoria da Probabilidade uma base matemática firme, baseada em três axiomas matemáticos:

1.  $P(A) \geq 0$  onde  $A$  é um evento de interesse em um experimento
2.  $P(\Omega) = 1$  onde  $\Omega$  é o espaço amostral do experimento
3. Se  $A_n \in \mathcal{A}$ , onde  $\mathcal{A}$  é uma sigma-álgebra, são disjuntos então:

$$P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n) \quad (2)$$

Esta definição é conhecida como definição axiomática de probabilidade.

## 2.4 Finalidade

A indústria atingiu um elevado nível de sofisticação, a possibilidade de novas invenções se torna menor à medida que novas descobertas são feitas. Atualmente a indústria necessita minorar seus custos tanto financeiros como ambientais.

Uma forma de avaliarmos o custo de um produto é através de seu tempo de vida, o mesmo pode ser estendido para equipamentos e processos nas empresas.

O uso dessa informação (Confiabilidade) serve para mensurar o impacto financeiro e incrementar as finanças das organizações maximizando a satisfação do consumidor e evitando a necessidade de efetuar retrabalho sobre os produtos e equipamentos produzidos.

Assael (1992) indica que uma das variáveis que interferem nos benefícios buscados pelos consumidores são suas experiências passadas: se o consumidor tiver uma experiência positiva com um determinado produto, este produto estará mais propenso a ser incluído entre as opções da próxima compra.

De acordo com *Polk's Manufacturer Loyalty Excelsior™* na primeira metade do ano 2000 a confiabilidade era um fator avaliado como de alta importância em 94% dos casos.

TABELA 1 – FATORES AVALIADOS NA AQUISIÇÃO DE UM NOVO VEÍCULO

<b>Fatores Avaliados na Aquisição de um Novo Veículo</b>	<b>Criticidade/Alta Importância</b>	<b>Experiência Alcançada/Expectativa Superada</b>
Reputação da empresa	81,9%	96,0%
Qualidade dos produtos	92,8%	92,9%
Confiabilidade	94,0%	96,3%
Inovações no produto	59,9%	96,6%

FONTE: RELIASOFT (2010)

O aumento do nível de exigência do consumidor está levando as empresas a encarar a Confiabilidade como estratégia de permanência no mercado. Trata-se de uma variável importantíssima a ser considerada no mercado.

Acima da questão financeira está também a segurança da utilização de produtos, especialmente em setores como indústria automobilística, aérea e farmacêutica. A responsabilidade por produtos não confiáveis é muito alta e pode trazer ônus muito maiores que os lucros auferidos quando não se aplica a metodologia da confiabilidade aos produtos e serviços produzidos.

De acordo com Lafraia (2001) os esforços tradicionais desenvolvidos nas atividades de projeto não estavam resultando em redução do índice de falhas de equipamentos cada vez mais complexos, assim a aplicação da Análise de Confiabilidade visa proporcionar um bom desempenho funcional dos produtos aliado à uma redução do índice de falhas.

A Confiabilidade é uma técnica a ser aplicada na fase de projeto de um produto, pois para produtos prontos pouco pode ser feito para a melhoria de sua confiabilidade. (LAFRAIA, 2001)

De acordo com Piazza (2000) o projetista precisa ter familiaridade com os princípios básicos da Confiabilidade, pois é quem está na melhor posição para aplicar a filosofia da mesma.

Durante a fase de projeto o projetista precisa identificar as necessidades do cliente com precisão evitando a seleção de materiais inadequados ao uso ou o dimensionamento inadequado de peças. Na fase de fabricação também

podem existir falhas quando os processos de fabricação e montagem são feitos por pessoal incapacitado, equipamentos inadequados ou materiais de qualidade inferior. Também o uso incorreto do produto, inclusive manutenção inadequada, por falta de instrução do fabricante ou então treinamento do cliente. (LAFRAIA, 2001).

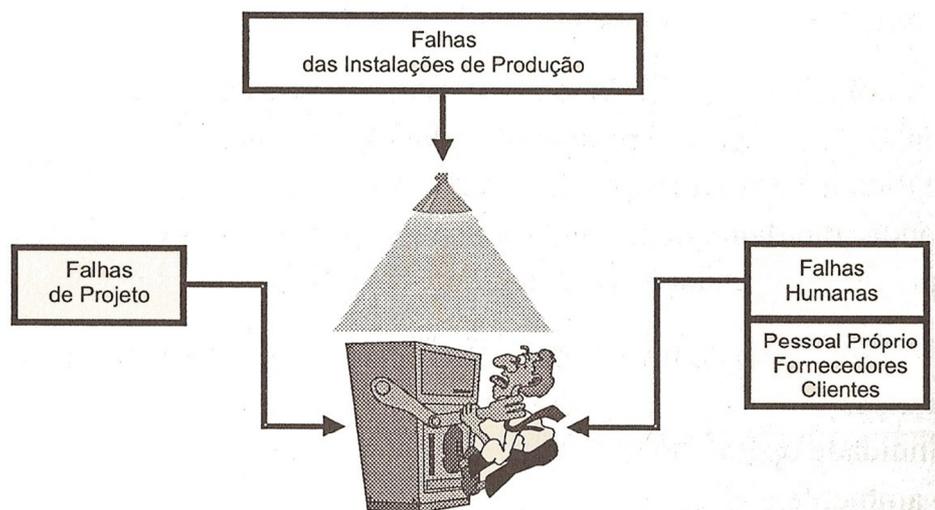


FIGURA 4 – ETAPAS ONDE É POSSÍVEL OCORRER FALHA  
 FONTE: LAFRAIA (2001)

Um produto, sistema ou equipamento pode ser estudado observando as suas partes ou componentes ou sendo analisado como um todo, fazendo-se, neste caso, a interação entre as diversas partes que o compõem para a demonstração de seu funcionamento de modo geral. A aplicação da confiabilidade fornece parâmetros que subsidiam a tomada de decisões mais coerente na solução dos problemas existentes. Um programa de Confiabilidade é formado por um conjunto de tarefas que precisam ser realizadas para se chegar a um determinado grau de confiabilidade. Entre estas etapas pode-se citar: coleta de dados e análise, especificação, projeto & desenvolvimento, fabricação, operação & manutenção falhas, alienação.

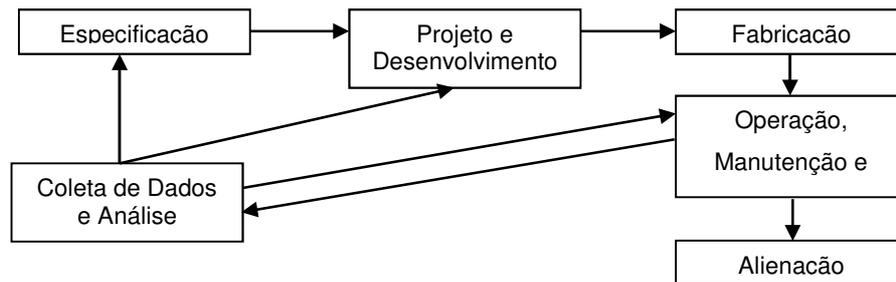


FIGURA 5 – ETAPAS DE APLICAÇÃO DA CONFIABILIDADE  
 FONTE: LAFRAIA (2001)

Alguns requisitos básicos devem ser observados para a obtenção da Confiabilidade nas diversas etapas da vida de um produto. Na fase de projeto deve-se buscar redução da complexidade, redundância para assegurar tolerância à falha, eliminação dos fatores de tensão, teste de qualificação e revisão do projeto, análise de falhas. Na fase de produção é necessário observar o controle de materiais, métodos e alterações e o controle de métodos de trabalho e especificações. Existe também a necessidade de instruções adequadas de uso e manutenção, análise de falhas em serviço e estratégias de reposição e de apoio logístico.

## 2.5 Aplicações

A expectativa de vida dos componentes é um dado importante no desenvolvimento de um produto, seja ele uma máquina, uma ferramenta ou qualquer outro tipo de equipamento. Com os dados de vida, pode-se calcular a confiabilidade dos conjuntos, individualmente, ou do equipamento todo, determinar o prazo de garantia, estimar os custos com reposição de peças em garantia, elaborar listas de materiais sobressalentes e fornecer informações para a manutenção preventiva do equipamento, entre outras coisas. (SASSERON; ABACKERLI, 2003)

A Confiabilidade não pode ser adquirida ou mesmo conquistada pelas empresas, ela tem de ser desenvolvida e continuamente mantida pelas organizações. A Confiabilidade deve fazer parte da estratégia da empresa desde o desenvolvimento do produto durante o qual devem ser elaborados testes de durabilidade sendo seu custo integrante do custo final dos produtos desenvolvidos.

Também na manutenção de equipamentos, sistemas e produtos a Confiabilidade por propiciar condições para maximizar o tempo de funcionamento dos mesmos, minimizando custos e transtornos pelo não funcionamento ou pelo funcionamento inadequado.

De acordo com Piazza (2000) a Confiabilidade pode ser aplicada aos processos de FMEA (*Failure Method Effect Analysis* ou Análise dos Modos de Falhas e Efeitos) e Análises de Tempos de Falhas.

Segundo Freitas e Colosimo (1997) a Confiabilidade abrange quatro técnicas: FMEA, FTA (*Fault Tree Analysis* ou Análise de Árvore de Falhas), Análise de Tempo de Falha (*Weibull Analysis*) e Testes de Vida Acelerados. A FMEA tem por finalidade a identificação das falhas críticas em cada componente, suas causas e conseqüência no sistema e no produto como um todo bem como estabelecer a hierarquia das falhas. Através da FTA podem ser verificadas as possíveis causas primárias das falhas permitindo a elaboração de uma relação lógica entre falhas primárias e a falha final do produto. A técnica de Análise de Tempo de Falha utiliza dados amostrais referentes a tempos de falha do produto (ou seus componentes) e os modela segundo a distribuição de probabilidade (Weibull, Log-normal ou outra) que melhor explicar o comportamento do tempo de falha do produto, através da qual será possível estimar percentis, frações de falha, taxas de falha, etc. O uso de Testes de Vida Acelerados é feito objetivando obter mais rapidamente falhas em testes de vida feitos com os produtos sendo seus resultados obtidos a partir da realização sob condições de estressamento para a estimativa das principais figuras de mérito nas condições do projeto. (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

De acordo com Lafraia (2001) a Confiabilidade fornece parâmetros para subsidiar a tomada de decisões mais coerentes. A análise de Confiabilidade tem aplicação e é campo de pesquisa em diversas áreas:

- controle de qualidade (equipamentos em geral, indústria mecânica, química e eletrônica).
- sistemas eletroenergéticos.
- sistema de telecomunicações.
- centrais nucleares.

- sistemas aeroviários (aeroportos e ferrovias)
- sistemas mecânicos (estruturas)
- sistemas industriais (refinarias)
- sistemas computacionais (redes de processamento, *software, hardware*).
- sistemas de defesa (aplicações militares).
- comportamento humano.

## 2.6 Desenvolvimento

A adoção de um programa de Confiabilidade é tarefa que deve concentrar os interesses de todos os segmentos da empresa a fim de assegurar o seu sucesso. Assim o envolvimento de todos no setor de produção, técnicos, engenheiros, gerentes e executivos é a forma de assegurar a qualidade de produtos e serviços ao longo do ciclo de vida do produto. De acordo com Piazza (2000) o grupo dedicado à Confiabilidade deve entender os conhecimentos da matemática básica da confiabilidade e possuir um bom conhecimento dos princípios e programas de projetos, problemas de *interface*, fatores humanos como ergonomia e capacidade de análise da relação custo benefício. Segundo o mesmo autor é função do grupo dedicado à Confiabilidade “fornecer assistência na análise, estabelecimento de objetivos, relatórios de desempenho para a tomada de decisão”,

A Confiabilidade estuda o comportamento da taxa de falha ao longo do tempo, portanto pode ser entendida como a qualidade ao longo do tempo.

A fim de efetuar o cálculo da Confiabilidade são necessários dados, modelos, diagnóstico para escolha do modelo apropriado e uma forma para comunicar seus resultados: gráficos, informações numéricas, volume de custos. Para monitorar a *performance* do sistema de confiabilidade é necessária uma coleção de dados eficiente e bem organizada, um sistema de relatórios e uma base de dados contendo dados de confiabilidade em configurações e projetos passados, de sua experiência. (PIAZZA, 2000).

Os dados devem ser completos em relação ao tipo de estudo que estiver sendo desenvolvido, é necessário ter um conjunto completo dos relacionados com as variáveis que interferem no processo em estudo. Os dados podem ser

obtidos através de bancadas de prova de ensaios acelerados de vida ou no campo via amostras gerenciadas ao longo de um período, retornos em garantia e ordens de serviço. Após obter os dados é necessário qualificá-los e tabulá-los.

Os modelos são representações matemáticas dos dados dadas por uma função contínua que permite interpolações e algumas extrapolações (com reservas), consistem em uma maneira de descrever adequadamente os dados, na maioria dos casos é um modelo probabilístico que irá descrever a Confiabilidade. Através dos modelos é estimada a probabilidade de falha ao longo do tempo e o comportamento da taxa de falha. Para a escolha do modelo são feitos testes estatísticos que verificam a aderência dos dados ao modelo.

A partir da análise do modelo pode ser estabelecido um resultado de interesse que é a projeção do número de componentes em falha para os próximos períodos de tempo e estabelecer planos de manutenção preventiva com o objetivo de minorar os custos de manutenção. É importante o conhecimento destes resultados a fim de determinar, ou não, a execução da manutenção preventiva. De acordo com Palady (1997) as organizações devem lançar mão de atividades que assegurem o cumprimento das metas de qualidade e confiabilidade, pois a realização de “manutenção preventiva programada pode ser muito cara e às vezes superar os lucros”.

## 2.7 Custos

“Confiabilidade sempre custa dinheiro”, afirmam Kardec e Lafraia (2002). O uso dos coeficientes de segurança ainda é mais prático para aplicações de baixo custo por serem mais baratos. Contudo quando se projetam equipamentos mais sofisticados e caros, tais como usinas nucleares, aviões a jato, plataformas petrolíferas, equipamentos automotivos, entre outros, o uso de coeficientes de segurança faria com que o custo destas aplicações fosse excessivamente alto. No desenvolvimento destes sistemas complexos a Confiabilidade permite economia de materiais.

De acordo com Kardec e Lafraia (2002) o equipamento com menor custo de aquisição possui maiores custos de manutenção e perdas por lucro cessante implicando em ônus maiores durante o ciclo de vida. Enquanto o

equipamento com alta confiabilidade, e também alto custo de aquisição, possui baixo custo operacional e de manutenção, assim como baixas perdas por lucros cessantes. Alguns equipamentos representam uma combinação adequada entre custo de aquisição, custo de manutenção e lucro cessante implicando no menor custo de ciclo de vida.

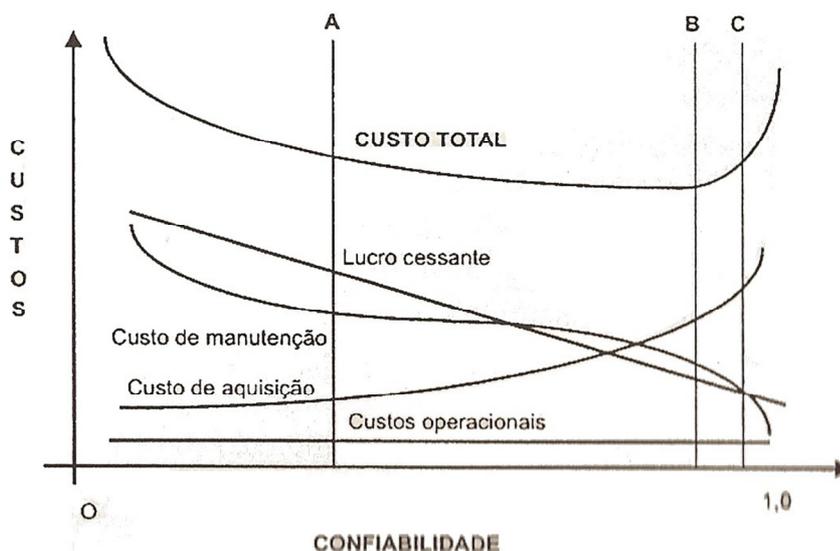


FIGURA 6 – RELAÇÃO ENTRE CONFIABILIDADE E CUSTO  
 FONTE: LAFRAIA (2001)

A figura 7, adiante, ilustra um exemplo da relação entre confiabilidade e custos de produção e custos de manutenção. Quanto maior a confiabilidade de um equipamento, menores serão os custos de manutenção, relação que se verifica inversa no caso dos custos de produção. A figura mostra que com a redução da Confiabilidade os custos de produção diminuem enquanto se verifica o aumento dos custos de manutenção.

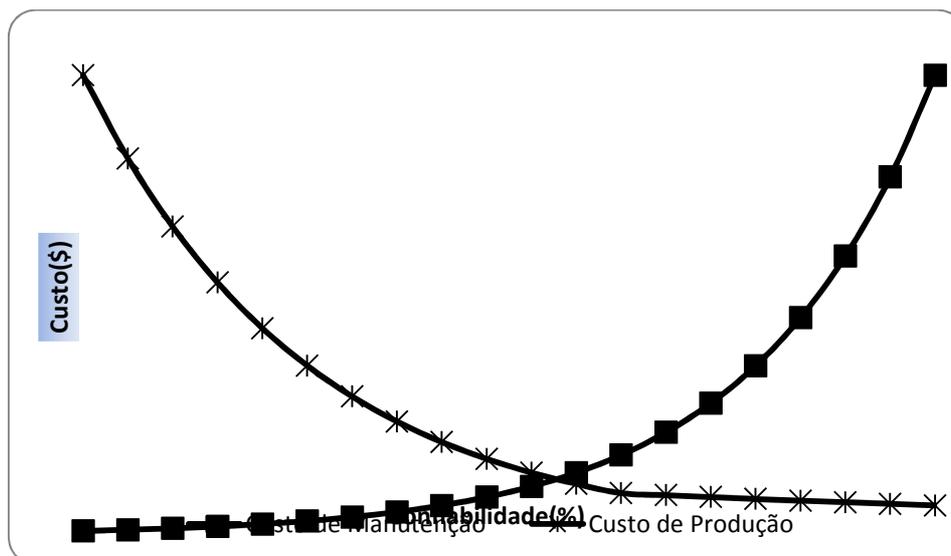


FIGURA 7 – CONFIABILIDADE X CUSTOS  
 FONTE: KARDEC e NASCIF (2002)

## 2.8 Benefícios

A adoção de uma ferramenta tecnológica por uma empresa necessita ter seu custo justificado por algum benefício trazido. É a avaliação positiva de resultados entre custos e benefícios que determinará o sucesso da adoção desta tecnologia. Para Lafraia (2001) a aplicação da Confiabilidade contribui de forma decisiva para a obtenção de uma série de benefícios relacionados a seguir:

- menor quantidade de interrupções não programadas;
- custos menores com atividades de manutenção, operação e apoio;
- perdas menores devido a lucros cessantes;
- menor incidência de acidentes;
- aumento da produção de produtos mais lucrativos;
- flexibilidade nas cargas;
- mudanças rápidas nas especificações dos produtos;
- cumprimento de normas legais de segurança, higiene e meio ambiente;
- continuidade operacional;
- aumento da manutenibilidade das instalações;

- ampliação da possibilidade de determinação de causas básicas de falhas;
- prevenção de falhas em equipamentos similares;
- determinação de fatores críticos para a manutenibilidade de equipamentos.

## 2.9 Falha

A falha representa o fim da capacidade que um produto tem para a realização da(s) função(ões) a que se destina. A norma americana MIL-STD-721C, de 1981, define oito tipos de falhas: catastrófica, crítica, dependente, intermitente, sem responsabilidade, irrelevante e aleatória. Em relação à segurança as falhas são vinculadas aos níveis de probabilidade de ação dos riscos existente. Os níveis de gravidade destes riscos são estabelecidos pela norma americana MIL-STD-822A, de 1977. Piazza (2000). Para Lafraia (2001), as falhas devem sua origem a três fatores básicos: falha de projeto, falha na fabricação ou falha da utilização.

São quatro as categorias em que as falhas se enquadram de acordo com a gravidade do risco associado.

- categoria I – catastrófica: pode causar morte ou perda do sistema;
- categoria II – crítica: pode causar grave lesão, grave doença ocupacional ou dano secundário ao sistema;
- categoria III – marginal: pode causar lesão secundária, moléstia ocupacional secundária ou dano secundário ao sistema;
- categoria IV – desprezível: não resultará em lesão, moléstia ocupacional ou dano ao sistema.

### 2.9.1 Tipos de Falha

Conforme Chaves Neto (2005), quanto à sua ocorrência, as falhas podem ser classificadas em 3 tipos: aleatórias, por deterioração e catastróficas. Por falhas aleatórias podemos entender aquelas que ocorrem a qualquer momento, associadas a uma probabilidade de ocorrência. As falhas por deterioração

ocorrem de forma crescente à medida que o tempo evolui, causadas por agentes físicos e químicos. Falhas catastróficas são repentinas e não têm condições de serem monitoradas ou previstas e sua ocorrência determina a incapacidade total de um produto desempenhar sua ação.

### 2.9.2 Custo de Falha

Um fator importante nos resultados de uma empresa é o custo de falha: necessidades de mudança de engenharia baseada nas falhas ocorridas, custos adicionais resultantes de planejamento deficiente, classificação, sucata, retrabalho e demais custos resultantes de falha entre eles os mais dispendiosos, duradouros e prejudiciais como a insatisfação do cliente, a reputação da empresa e perda de fatia de mercado. (PALADY, 1997).

De acordo com Palady (1997) todas as organizações que buscam eficiência e qualidade devem adotar ferramentas de análises de falhas e seus efeitos, exigindo dos funcionários e fornecedores esforços de “previsão dos problemas potenciais e implantação das melhores opções possíveis para prevenção e controle desses modos de falha potenciais”.

### 2.9.3 Detecção de Falhas

A condução de um estudo acerca das falhas de um processo deve considerar claramente três questões:

1. de que forma a falha pode ocorrer?
2. qual(is) a(s) causa(s) da falha?
3. qual(is) a(s) consequência(s) da falha?

O projeto de um produto insensível às variações as quais o produto será exposto durante sua vida é denominado de Projeto Robusto. São exemplos de variações às quais o produto é submetido o ambiente, os hábitos do cliente e a variação descontrolada no processo de produção, em geral chamada de ruído.

Quando o ruído influencia significativamente o projeto distorcendo completamente o modelo ou as previsões de desempenho os efeitos dessa variação devem ser eliminados pela incorporação de características que

deixarão o projeto mais robusto a essas fontes de variação descontrolada. (PALADY, 1997).

Vários são os critérios através dos quais a ocorrência de falhas pode ser analisada. Entre eles estão a severidade, a ocorrência e a detecção.

A severidade das falhas pode ser avaliada de acordo com a tabela 2, adiante:

TABELA 2 – DESCRIÇÃO DA ESCALA DE SEVERIDADE

<b>Descrição da escala de severidade</b>	<b>Grau</b>
Efeito não percebido pelo cliente.	1
Efeito bastante insignificante percebido pelo cliente; entretanto, não faz com que o cliente procure o serviço.	2
Efeito insignificante, que perturba o cliente, mas não faz com que procure pelo serviço.	3
Efeito bastante insignificante, mas perturba o cliente, fazendo com que procure o serviço.	4
Efeito menor, inconveniente para o cliente; entretanto, não faz com que o cliente procure o serviço.	5
Efeito menor, inconveniente para o cliente; fazendo com que o cliente procure o serviço.	6
Efeito moderado, que prejudica o desempenho do projeto levando a uma falha grave ou a uma falha que pode impedir a execução das funções do projet.	7
Efeito significativo, resultando em falha grave; entretanto, não coloca a segurança do cliente em risco e não resulta em custo significativo de falha.	8
Efeito crítico que provoca a insatisfação do cliente, interrompe as funções do projeto, gera custo significativo da falha e impõe um leve risco de segurança (não ameaça a vida nem provoca incapacidade permanente) ao cliente.	9
Perigoso, ameaça a vida ou pode provocar incapacidade permanente ou outro custo significativo da falha que coloca em risco a continuidade operacional da organização.	10

FONTE: PALADY (1997)

A investigação de causas básicas de falhas deve considerar o custo associado à sua realização. De acordo com Bajarria and Copp (1991) *apud* Palady (1997) esta investigação pode ser conduzida a partir de um fluxograma que inicia com os métodos mais rápidos e de custo menor até aqueles mais caros e que consomem mais tempo para esta investigação.

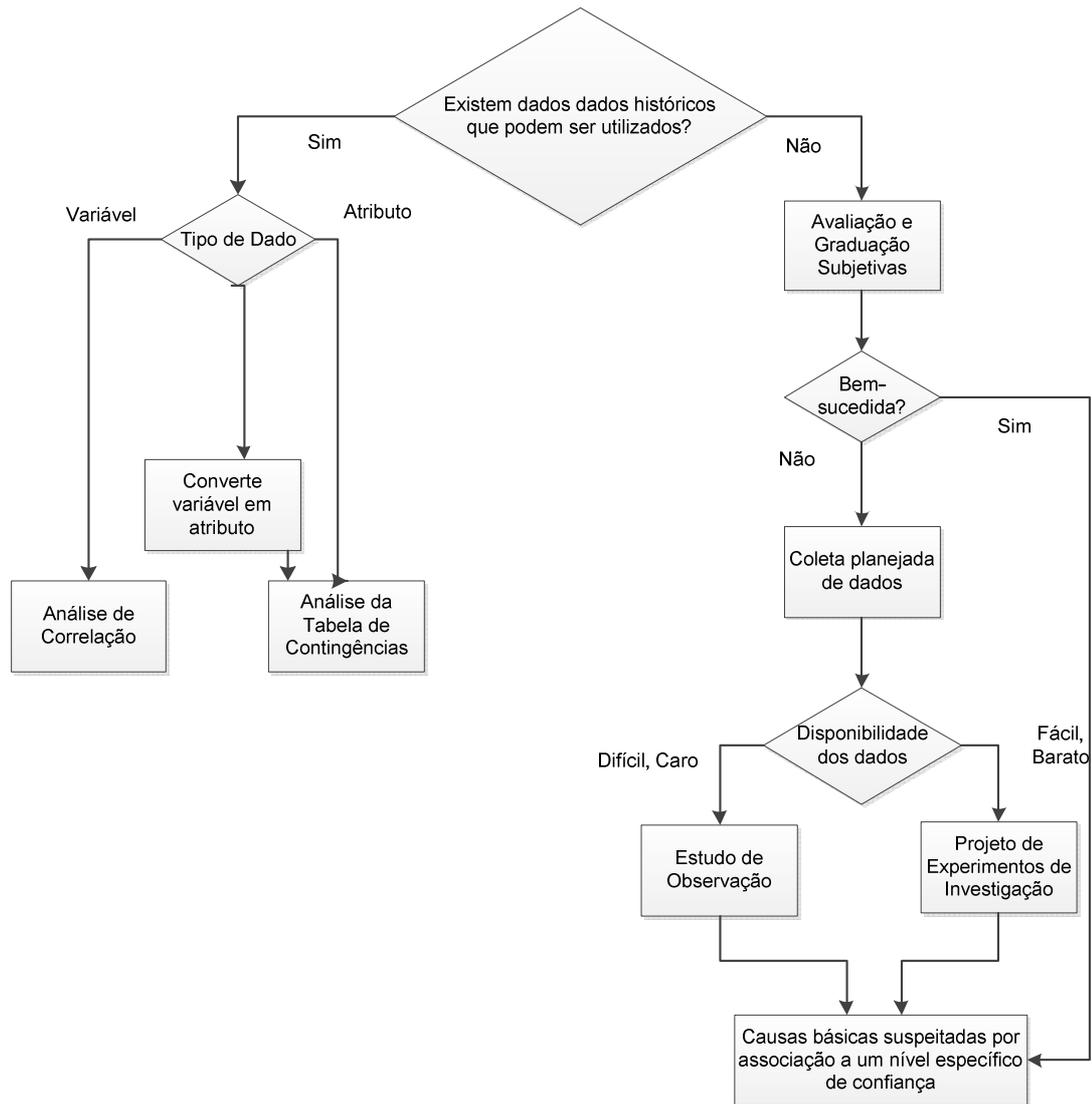


FIGURA 8 – PROCESSO DE INVESTIGAÇÃO DE CAUSAS BÁSICAS DE FALHA  
 FONTE: adaptado de PALADY (1997)

Em relação à ocorrência (frequência com que a(s) falha(s) ocorre(m)) Palady(1997) cita duas abordagens com que se pode questionar a ocorrência:

- através da avaliação da frequência em que o modo de falha ocorrerá e;
- através da avaliação da frequência em que a causa do modo de falha ocorrerá.

Utilizando a abordagem através da avaliação da ocorrência do modo de falha obtém-se um valor estimado mais preciso da frequência com que o modo

de falha ocorre. Pode-se chegar a uma avaliação das causas básicas quando se tenta obter uma redução para esse número enquanto a avaliação da ocorrência da causa básica do modo de falha não implica necessariamente na ocorrência estimada do modo de falha.

Uma vez compreendida a distinção entre estas duas abordagens uma delas deve ser adotada. E, ela poderá avaliar a ocorrência ou selecionar um valor que corresponda às definições da Escala de Avaliação de Ocorrência apresentada a seguir:

TABELA 3 – ESCALA DE AVALIAÇÃO DE OCORRÊNCIA

<b>Escala de Avaliação de Ocorrência</b>	<b>Grau</b>
Extremamente remoto, altamente improvável.	1
Remoto, improvável.	2
Pequena chance de ocorrência.	3
Pequeno número de ocorrências.	4
Espera-se um número ocasional de falhas.	5
Ocorrência moderada.	6
Ocorrência freqüente.	7
Ocorrência elevada.	8
Ocorrência muito elevada.	9
Ocorrência certa.	10

FONTE: PALADY (1997)

Sob o ponto de vista da detecção de falhas questiona-se acerca da chance de se detectar o modo de falha ou das causas que resultam nesse modo de falha. A detecção pode acontecer antes do problema chegar ao cliente ou ser detectada pelo cliente antes que provoque uma falha catastrófica. De acordo com Palady (1997) a distinção entre detecção do problema antes de chegar ao cliente e a detecção do problema pelo cliente pode ser feita pela tabela:

TABELA 4 – ESCALA DE DETECÇÃO DE FALHA

<b>Escala de Detecção</b>	<b>Grau</b>
É quase certo que será detectado.	1
Probabilidade muito alta de detecção.	2
Alta probabilidade de detecção.	3
Chance moderada de detecção.	4
Chance média de detecção.	5
Alguma probabilidade de detecção.	6
Baixa probabilidade de detecção.	7
Probabilidade muito baixa de detecção.	8
Probabilidade remota de detecção.	9
Detecção quase impossível	10

FONTE: PALADY (1997)

Segundo Palady (1997) a medida que os valores do grau da escala de detecção sobem, as chances da falha ser detectada antes de chegar ao cliente diminuem. Os valores mais altos na escala de detecção ampliam a possibilidade de que só se tome conhecimento das falhas através das reclamações dos clientes. Normalmente o grau de detecção é diretamente proporcional aos custos da falha, alguns de difícil mensuração como aqueles relacionados à insatisfação do cliente ou à perda de fatia de mercado.

Segundo Lafraia (2001) as técnicas de Confiabilidade podem contribuir para a redução das falhas fundamentadas em três ramos:

Técnicas de atividades para análise de falhas:

- investigação de acidentes, queixas e incidentes;
- confiabilidade do produto;
- FMEA (Análise de Modo de Falha e Efeito);
- análise de árvore de falhas.

Técnicas para eliminar no projeto dos pontos de falha potenciais na operação:

- construção de operações com recursos críticos redundantes;
- tornar as atividades da operação à prova de falhas;
- manutenção das instalações físicas das operações.
- Técnicas para melhorar a confiabilidade das operações:
- eliminar no projeto os pontos de falha potenciais na operação;
- construção de operações com recursos críticos redundantes;
- tornar as atividades da operação à prova de falhas;
- manutenção das instalações físicas das operações.

#### 2.9.4 Redundância

Quando dois ou mais itens realizam funções semelhantes de forma que a falha de um deles, isoladamente, não provoca um determinado conjunto de falhas de desempenho que pode ser observado quando a falha de todos

ocorre. Se a falha desse item não tem qualquer elemento de ligação com a falha de outro então se diz que existe independência absoluta. Contudo, pode surgir uma dependência relativa à medida que esta ligação aumenta. O uso de redundâncias é adotado mediante a análise da relação entre a confiabilidade dos subsistemas para a do sistema como um todo. Quanto à forma as redundâncias podem ser ativas ou em *stand by* e também uniformes ou diversificadas. (LAFRAIA, 2001).

### 2.9.5 Falha de Modo Comum

Um sistema é uma combinação de ligações em série e em paralelo desde as formas mais simples até as mais complexas. Sistemas que utilizam redundâncias podem tolerar um determinado tipo ou quantidade de falhas internas independentes e ainda continuarem a desempenhar sua função de forma adequada. Todavia, esses sistemas estão sujeitos à falha de modo comum. Esta falha tem sua origem em um ponto comum aos canais redundantes e impede que o sistema continue a oferecer resultados adequados. (LAFRAIA, 2001).

## 2.10 Projeto Robusto

Chaves Neto (2005) conceitua projeto robusto como um procedimento aplicado durante as etapas de pesquisa e desenvolvimento de um produto para aumentar sua produtividade de forma a obter produtos com alta qualidade e custo mínimo. Para isto utilizam-se modelos protótipos e com planejamento de experimentos procura-se obter:

- a redução da variabilidade de uma função do produto no ambiente para o produto foi projetado para funcionar;
- a garantia de que os resultados de experimentos laboratoriais sejam confiáveis para a fabricação e uso dos produtos;
- a melhoria da qualidade de um produto através da redução dos efeitos das causas de variabilidade.

### 2.10.1 Presença de Ruído em Projeto Robusto

As eventuais variações de desempenho de um produto podem ter origem em diversas fontes. Esta variabilidade é o ruído e suas causas são chamadas de fatores de ruído. Estes fatores são qualquer evento que determine o desvio do objetivo de uma característica funcional do produto, entre estes fatores de ruído podem ser citados alguns efeitos: presença de água em combustíveis de automóveis, interferência de linhas de transmissão em rádio AM, variações extremas de temperatura em medicamentos e alimentos assim como a ação da luz solar. (CHAVES NETO, 2005)

Chaves Neto (2005) afirma que quando do desenvolvimento de um produto é necessário estabelecer para este um nível de desempenho que deve resistir à variabilidade e manter-se constante, para tanto é necessário clareza acerca do entendimento da natureza do ruído.

Usualmente o ruído caracteriza-se como um problema de confiabilidade que podem ocorrer no início da vida de um produto, durante a vida útil deste produto ou no final de sua vida.

### 2.10.2 Tipos de Ruídos

Os fatores de ruído podem ser oriundos de fatores externos, de unidade para unidade ou de deterioração.

#### 2.10.2.1 Fatores de ruído externos

De acordo com Chaves Neto (2005) os fatores de ruído externo são aqueles que têm sua variabilidade motivada por uma fonte externa do produto. Entre estes fatores podem ser citados: temperatura e umidade média do ambiente de uso de um produto, cargas aleatórias à que o produto esteja sujeito, entradas não intencionais de energia (calor, vibração, radiação) às quais o sistema seja sensível, erros humanos por mau uso dado desconhecimento ou por abuso intencional, presença de poeira no ambiente, variações de voltagem, interferência eletromagnética e luz ultravioleta, entre outros.

### 2.10.2.2 Fatores de Ruído de Unidade Para Unidade

Os fatores de ruído de unidade para unidade são originados pela impossibilidade de serem reproduzidos dois itens exatamente iguais cuja variabilidade de unidade para unidade é causada principalmente pelo processo de fabricação e pelos materiais. As fontes habituais deste tipo de variabilidade são processo de fabricação não uniforme ou então processos sujeitos à tendências. Como exemplos podem ser relacionados: resistência de resistores elétricos, dimensões de formas metálicas, concentração de produtos químicos em lotes diferentes, variação na espessura de tecidos, entre outros. (CHAVES NETO, 2005).

### 2.10.2.3 Fatores de Ruído de Deterioração

Os fatores de deterioração são definidos como fontes de variabilidade interna que causam mudanças dentro do produto. Fatores como tempo de uso ou de armazenagem podem levar à deterioração da performance de um produto. Entre estes fatores podem ser relacionados a perda de massa no filamento da lâmpada incandescente, a corrente total produzida por uma bateria, o desgaste da pintura interna de uma casa, a quilometragem de um carro, etc. (CHAVES NETO, 2005)

## 2.11 Curva da Banheira

A curva da banheira é a figura obtida a partir dos valores da taxa de falha acumulada. Pela curva da banheira podemos identificar três fases distintas na vida de um produto: mortalidade infantil, vida útil e velhice.

Na fase da mortalidade infantil ocorrem falhas prematuras que podem ter sido originadas por: mão de obra inadequada, controle de qualidade deficiente, amaciamento insuficiente, pré-teste inadequado, depuração insuficiente, processos impróprios de manufatura, manuseio e transporte inadequados, materiais fora de especificação, componentes não especificados, componentes não testados, peças de baixo padrão, estocagem inadequada, embalagem defeituosa, transporte inadequado, contaminação, instalação inadequada, deficiências de projeto, partida deficiente, sobrecarga no primeiro teste, entre

outros. Nesta fase da vida do produto a taxa de falhas é decrescente. (LAFRAIA, 2001).

Segundo Kardec e Nascif (2009) as falhas nesta fase também podem ter sua origem em problemas de instalação.

Na fase de vida útil as falhas ocorrem aleatoriamente e com taxa de falhas constante. De acordo com Kardec e Nascif (2009) a taxa de falhas nesta fase é menor e apresenta pequena variação com o tempo mantendo-se relativamente constante. As falhas nesta fase da vida do produto normalmente são aleatórias e têm fontes externas (casuais) e pouco pode ser feito para evitá-las. Estas falhas podem ter como motivos: interferência indevida, tensão e deficiência, fator de segurança insuficiente, ocorrência aleatória de cargas acima do esperado, resistência menor que a esperada, defeitos abaixo do limite de sensibilidade dos ensaios que acabam escapando às inspeções, erros humanos no uso ou instalação do produto, aplicação (operação) indevida, falhas não detectáveis por testes, fenômenos naturais imprevisíveis, causas sem explicação definida. (CHAVES NETO, 2005).

Na velhice as falhas ocorrem devido à idade avançada do produto. Nesta fase o desgaste determina o início do término da vida útil do equipamento. Para Kardec e Nascif (2009) nesta fase o desgaste natural, que aumenta com o passar do tempo, é o responsável pelo aumento na taxa de falhas. Esta fase também recebe o nome de Degradação e caracteriza-se pelo crescimento contínuo das taxas de falhas entre as causas podemos citar: degradação por abrasão, corrosão, fluência, degradação da resistência, fadiga, fluência, deterioração mecânica, elétrica, química ou hidráulica, manutenção inadequada, vida de projeto curta. (CHAVES NETO, 2005)

TABELA 5 – DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA CURVA DA BANHEIRA

Falhas prematuras	Falhas Casuais	Falhas por Desgaste
Processos de fabricação deficientes	Interferência indevida tensão/resistência	Envelhecimento
Controle de qualidade deficiente	Fator de segurança insuficiente	Desgaste/abrasão
Mão-de-obra desqualificada	Cargas aleatórias maiores que as esperadas	Degradação da resistência
Amaciamento insuficiente	Resistência menor que a esperada	Fadiga
Pré-teste insuficiente	Defeitos abaixo do limite de sensibilidade dos ensaios	Fluência
<i>Debugging</i> insuficiente	Erros humanos durante o uso	Corrosão
Materiais fora de especificação	Aplicação indevida	Deterioração mecânica, elétrica, química ou hidráulica
Componentes não especificados	Abusos	Manutenção insuficiente ou deficiente
Componentes não testados	Falhas não detectáveis pelo melhor programa de manutenção preventiva	Vida de projeto muito curta
Componentes que falharam devido estocagem/transporte indevido	Falhas não detectáveis durante o melhor <i>debugging</i>	
Sobrecarga no primeiro teste	Causas inexplicáveis	
Contaminação	Fenômenos naturais imprevisíveis	
Erro humano		
Instalação imprópria		

FONTE: LAFRAIA (2001)

A curva da banheira pode apresentar aspectos característicos diferentes de acordo com o produto, pois nem todos os produtos apresentam sempre todas as fases. No caso dos programas para computador, por exemplo, as falhas aparecem apenas na fase da mortalidade infantil e vão desaparecendo na medida em que os erros de programação ou definição vão sendo corrigidos.

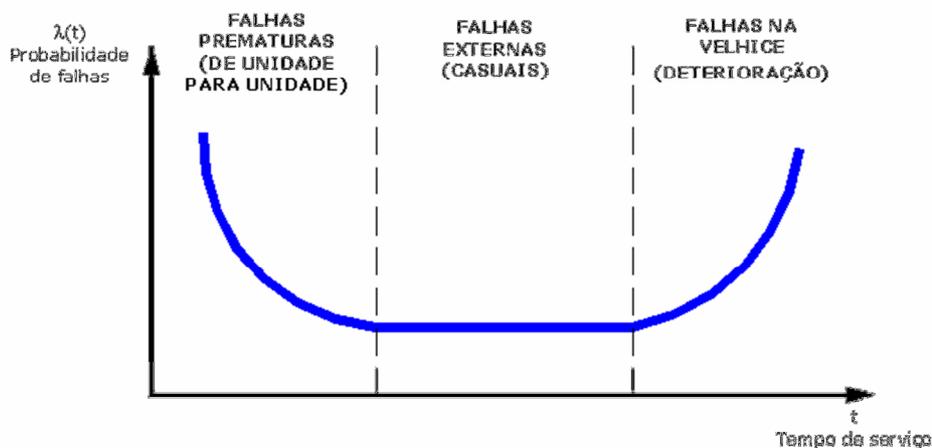


FIGURA 9 – CURVA DA BANHEIRA TEÓRICA  
FONTE: CHAVES NETO (2005)

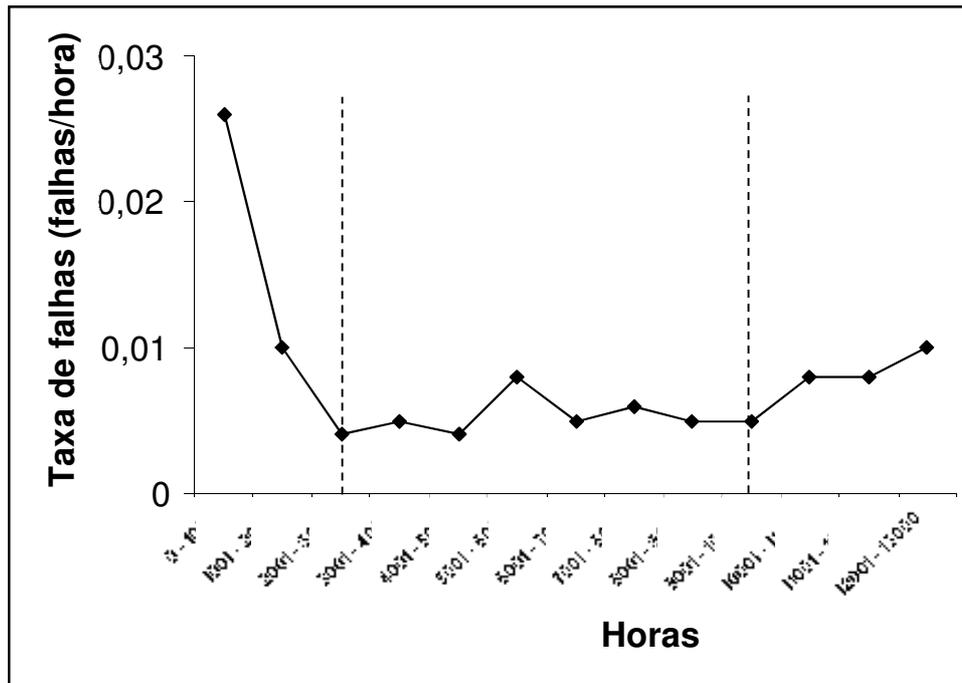


FIGURA 10 – CURVA DA BANHEIRA COM DADOS REAIS  
 FONTE: adaptada de BERGAMO FILHO (1997)

Normalmente um programa de computador tem o término de sua vida útil devido a características mercadológicas independentemente do aspecto de confiabilidade. No caso de componentes eletrônicos as falhas apresentadas normalmente são falhas aleatórias enquanto que componentes mecânicos apresentam as três fases de forma bem distinta. As figuras apresentam as curvas da banheira características para estes 3 tipos de produtos:

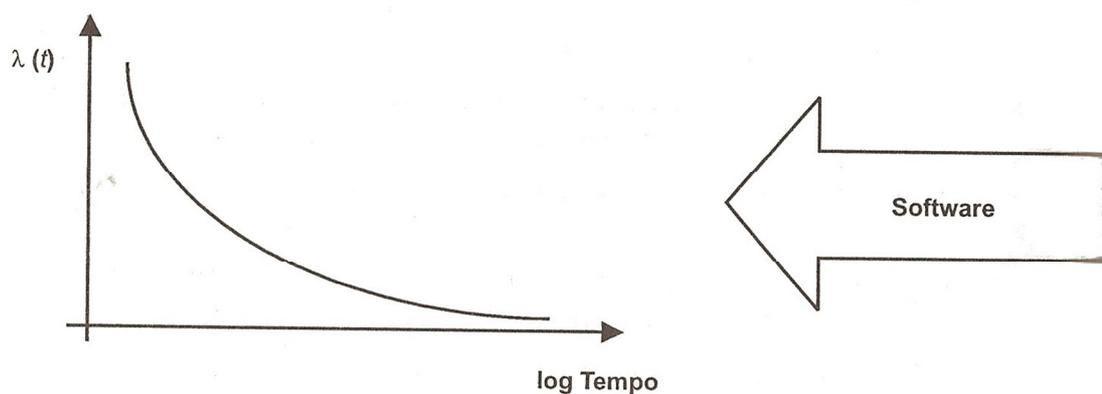


FIGURA 11 – CURVA DA BANHEIRA CARACTERÍSTICA PARA SOFTWARE  
 FONTE: LAFRAIA (2001)

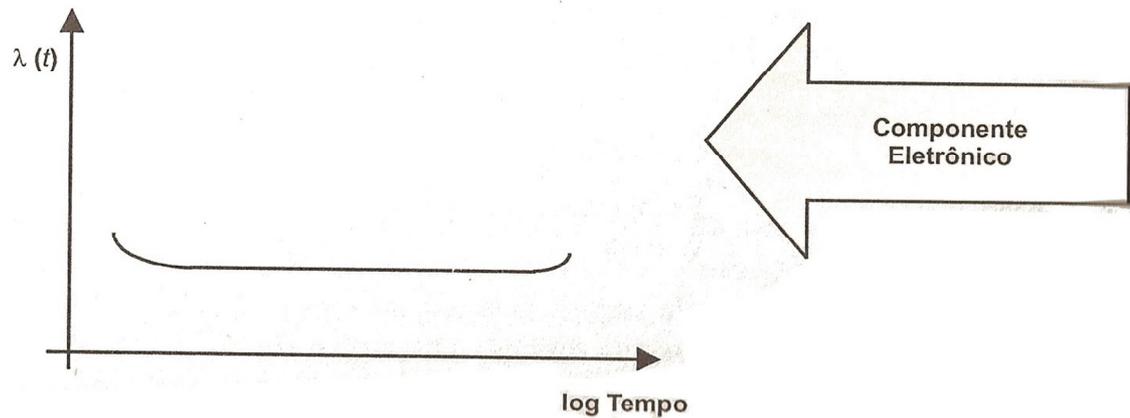


FIGURA 12 – CURVA DA BANHEIRA CARACTERÍSTICA PARA COMPONENTES ELETRÔNICOS  
 FONTE: LAFRAIA (2001)

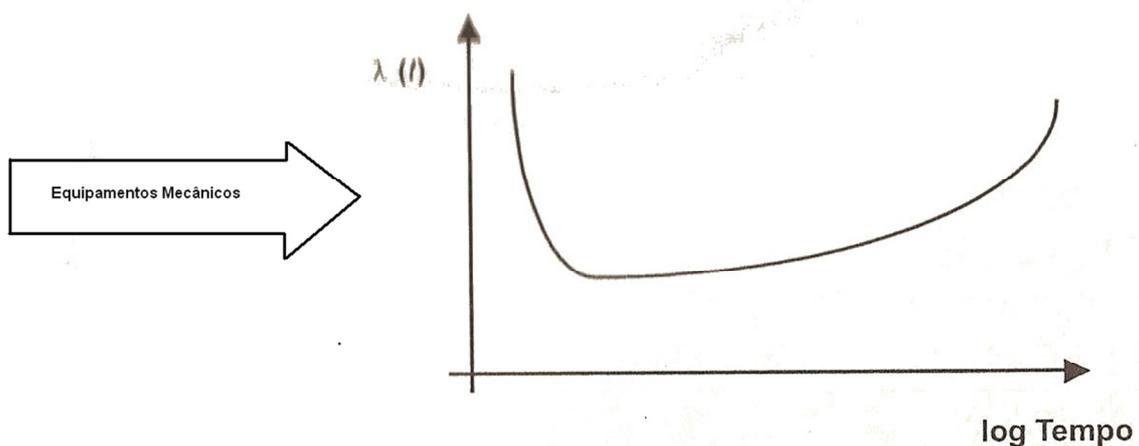


FIGURA 13 – CURVA DA BANHEIRA CARACTERÍSTICA PARA EQUIPAMENTOS MECÂNICOS  
 FONTE: LAFRAIA (2001)

## 2.12 Função de Confiabilidade

A função de confiabilidade é definida como a probabilidade de uma observação não falhar até um certo tempo  $t$ , ou seja, a probabilidade desta observação sobreviver ao tempo  $t$ . De acordo com Chaves Neto (2005) esta é a principal função em termos de probabilidade que é utilizada para descrever dados de durabilidade, na qual o tempo até falhar é uma variável aleatória. Em termos probabilísticos, isto é escrito como:

$$R(t) = P(T \geq t) \quad (3)$$

Logo, a probabilidade de uma observação não sobreviver ao tempo  $t$  é dada pelo complemento daquela função, ou seja:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (4)$$

De acordo com Freitas e Colosimo (1997) os dois elementos básicos que devem ser definidos através de estudos de confiabilidade são: o evento de interesse, usualmente chamado de falha, e a escala de medida.

Segundo Chaves Neto (2005) o objetivo geral em Confiabilidade é conhecer a probabilidade de que um produto não apresente falha dentro de um intervalo determinado, podendo este intervalo ser de tempo, de distância, de carga, de ciclos, entre outros, sendo então a Confiabilidade (Reability) dada por  $R(t)$  conforme a expressão:

(5)

Adiante é apresentado o Gráfico que mostra as funções de confiabilidade

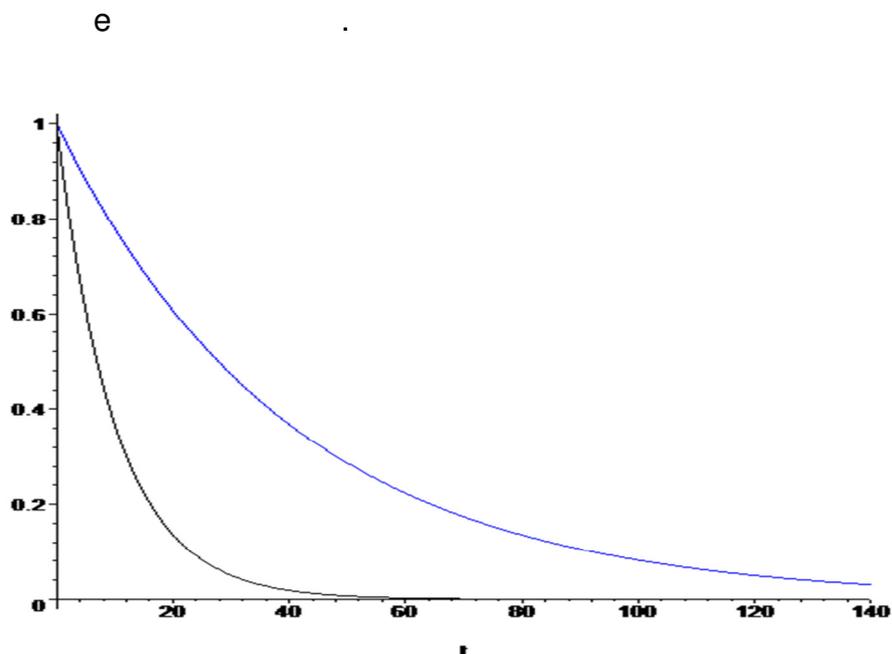


FIGURA 14 – EXEMPLO DE FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE  
 FONTE: CHAVES NETO (2005)

Freitas e Colosimo (1997) apresentam um exemplo de análise de duas funções de confiabilidade na figura seguinte;

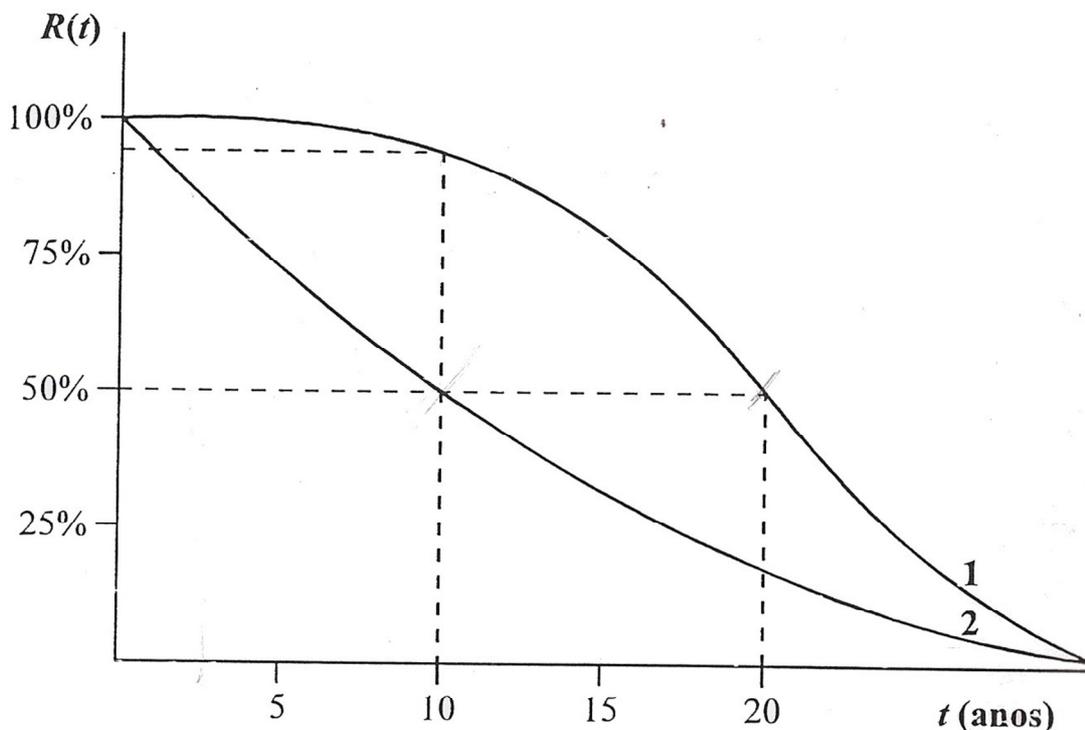


FIGURA 15 – FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE PARA DOIS PRODUTOS  
 FONTE: FREITAS; COLOSIMO (1997)

Da figura pode-se verificar que o produto um tem durabilidade superior ao produto dois, também pode ser verificado que o tempo para que a metade dos produtos falhe é de dez anos para o produto dois e de vinte anos para o produto um. Também é possível extrair o percentual de produtos que estará em operação até um tempo especificado. As curvas também permitem identificar a quantidade de produtos que podem apresentar defeito em um período de tempo.

De acordo com Piazza (2001) a Confiabilidade é considerada como a medida de sucesso de um sistema. Considerando a quantidade total de itens em estudo ( $n_0$ ) durante um período de tempo ( $t$ ), após este tempo esta

quantidade se divide em número de itens que falharam  $b(n_f)$  e o número de itens que sobreviveram  $(n_s)$ :

$$n_0 = n_f(t) + n_s(t) \quad (6)$$

Chamando a função de Confiabilidade de  $R$  tendo como variável independente o tempo  $(t)$  obtém-se:

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_0} \quad (7)$$

Em vista de (6) é obtida:

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} \quad (8)$$

Como  $(n_s(t) + n_f(t)) \leq n_0$  o valor de  $R(t)$  está no intervalo  $0 \leq R(t) \leq 1$  então a Confiabilidade está expressa na mesma forma de uma função de probabilidade.

## 2.13 Função Probabilidade de Falha

Estabelecendo a vida de um item como a soma do período em que ele está funcional com o período em que ele não está funcional tem-se que 100% do seu tempo de vida é dado por  $R(t) + F(t)$  onde  $R(t)$  representa o período em que o item está funcional e  $F(t)$  representa o período em que o item está não funcional. Em termos de probabilidade esta relação pode ser escrita como  $R(t) + F(t) = 1$ , o que permite que a Função Probabilidade de Falha (probabilidade de não funcionamento) seja obtida em termos da probabilidade complementar:

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

A partir das equações (7) e (8) chega-se à expressão:

$$F(t) = 1 - \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} \quad (10)$$

Resolvendo a equação (10) e considerando a equação (6) chega-se à equação a seguir que expressa a Função Probabilidade de Falha como o quociente entre o número de item que falharam e o número total de itens.

$$F(t) = \frac{n_f(t)}{n_0} \quad (11)$$

## 2.14 Função de Risco

A partir da função de confiabilidade é possível expressar a probabilidade de ocorrência de falha em um intervalo de tempo  $[t_1 - t_2)$  pela expressão:

$$P[t_1 \leq t \leq t_2) = R(t_1) - R(t_2) \quad (12)$$

A probabilidade de que a falha ocorra neste intervalo é a taxa de falha dado que não ocorreu antes de  $t_1$  dividida pelo comprimento do intervalo gerando a expressão abaixo:

$$\frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)} \quad (13)$$

Considerando que  $t_2$  ocorre em um tempo posterior a  $t_1$  e denominando este intervalo de tempo  $(t_2 - t_1)$  de  $\Delta_t$ , e representando a taxa de falhas por  $\lambda(t)$ , expressão pode ser escrita como:

$$\lambda(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta_t)}{\Delta_t R(t)} \quad (14)$$

A fim de obter a taxa de falha instantânea considera-se  $\Delta_t$  bem pequeno levando-se ao limite obtém-se a taxa de falha instantânea condicionada à não ocorrência de falha até o instante  $t$ :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta_t \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < (t + \Delta_t) | T \geq t)}{\Delta_t} \quad (15)$$

A expressão caracteriza a taxa de falha instantânea, ou taxa condicional de falha, como a probabilidade de um item de não falhar até o tempo  $(t + \Delta_t)$  dado que não falhou até o tempo  $t$ , condicionada à não ocorrência de falha até o instante  $t$  pode ser enunciada nos mesmos termos da probabilidade condicional como a probabilidade de ocorrer uma falha no intervalo  $(t_1, t_2)$  dado que não houve falha até  $t_1$ . De acordo com Lafraia (2001) esta função é conhecida como função de risco e pode ser alternativamente denominada de *hazard function* ou *hazard rate*.

## 2.15 Relacionamento entre a Função de Confiabilidade e a Função de Risco

Sendo  $f(t)$  a função de risco modelada estatisticamente pela função densidade de falha que representa a variação da probabilidade de falha de uma unidade dentro do tempo, representada pela expressão  $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$  na qual  $F(t)$  é a função distribuição da variável aleatória  $t$  (tempo). De acordo com Lafraia (2001)  $F(t)$  é a função acumulada de falhas, é representada graficamente por uma função de distribuição de densidade acumulada e representada matematicamente por:

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \quad (16)$$

Mediante estas expressões a probabilidade de falha  $p(f)$  de um produto em um determinado intervalo  $(a, b)$  é dada por:  $p(f) = F(b) - F(a)$  a qual pode ser escrita em termos da seguinte integral:

$$p(f) = \int_a^b f(t) dt \quad (17)$$

A partir da Função de Confiabilidade  $R(t)$  é possível também expressar de outra forma a Função de Risco:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (18)$$

## 2.16 Tempo de Falha

O tempo de falha pode ser analisado a partir de técnicas estatísticas aplicadas aos dados de durabilidade de um produto. Estes dados podem ser oriundos de observações de campo ou então de testes de vida realizados com uma fonte de estresse. Neste caso, é necessário que se usem modelos estatísticos para estimação do tempo médio até a falha e da fração esperada de falhas dentro de um determinado período, em especial o de garantia. (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

Diante da completa falta ou da escassez de dados de vida providos pelo fornecedor, torna-se necessário encontrar alternativas para a sua obtenção. Uma delas envolve testes que sejam capazes de fornecer as informações dentro de limites aceitáveis de confiabilidade, podendo ser convertidos para as condições de utilização do equipamento no campo. (SASSERON e ABACKERLI, 2003)

O tempo de início do estudo deve ser bem estabelecido. Os produtos devem ser comparáveis quando do início do estudo, respeitando-se diferenças que possam ser medidas pelas covariáveis.

A escala de medida é quase sempre o tempo real ou “de relógio”, apesar de existirem outras alternativas, tais como o número de ciclos executados da função. Em testes de engenharia podem surgir, como se escreveu, outras escalas de medida e como exemplos dessas alternativas pode-se citar o mecanismo do vidro das janelas de veículos, em que o número de ciclos de subida e descida dos vidros é uma medida da durabilidade do mecanismo; a quilometragem de um carro é outro exemplo. (COLOSIMO E GIOLO, 2006)

## 2.17 Tempo de Falha

A análise dos dados de durabilidade de um produto a partir de técnicas estatísticas conduz à análise do tempo de falha a qual é utilizada para estimar os seguintes valores de interesse:

MTTF (*mean time to failure*) – Tempo médio até a falha

MTBF (*mean time between failure*) – Tempo médio entre falhas

MTTR (*mean time to repair*) – Tempo médio de reparo.

## 2.18 Censuras

A realização de testes para obtenção de medidas de confiabilidade demanda tempo e também tem custos financeiros elevados. Normalmente os testes terminam antes que todos os produtos testados apresentem falhas o que leva à presença censuras que são observações incompletas ou parciais. Mesmo que existam estas censuras todos os resultados dos testes devem ser usados para a elaboração da análise estatística. Estas observações trazem informações importantes sobre o tempo de vida dos produtos. (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

De acordo com Freitas e Colosimo (1997) as Censuras podem ser de três tipos: Censura tipo I, Censura tipo II (por falha) e Censura tipo aleatório. A Censura tipo I acontece quando o teste tem um tempo determinado de realização e o produto não apresenta falha antes do término do teste, este tipo de censura é utilizado quando existem informações anteriores sobre o produto as quais permitem que seja planejado o tempo de duração do estudo. A Censura tipo II surge em casos em que o teste será terminado após um número previamente determinado de produtos falharem, então após o término do teste alguns produtos ainda não terão falhado, este tipo de censura é usada quando existe pouca ou nenhuma informação sobre o produto que está sendo estudado. A Censura do tipo aleatório acontece quando um item é retirado do conjunto em teste antes do mesmo acabar. Caso típico é quando o item apresenta uma falha diferente daquela para a qual está sendo desenvolvido o estudo. (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

## 2.19 Parâmetros da Confiabilidade

A definição de Confiabilidade não é de fácil assimilação e apresenta dificuldades principalmente na comunicação com o público consumidor. Assim, associam-se alguns parâmetros à Confiabilidade. Os principais são o MTBF, MTTF e a taxa de falhas.

### 2.19.1 Tempo Médio Entre Falhas

O MTBF (*Mean Time Between Failures*), Tempo Médio Entre Falhas é, como seu nome indica, é o tempo médio entre falhas sucessivas de um produto reparável. O MTBF é obtido pelo inverso da taxa de falhas:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (19)$$

### 2.19.2 Tempo Médio Até Falhar

O MTTF (*Mean Time To Failure*), Tempo Médio Até Falhar, é um parâmetro utilizado para medir o tempo médio até a falha de um produto não reparável (lâmpada incandescente) ou o tempo médio até a primeira falha de um produto reparável (bateria de automóvel). O MTTF é dado pela média aritmética dos produtos que fazem parte da amostra:

$$MTTF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (20)$$

Onde  $n$  é a quantidade de produtos presentes na amostra e  $t_i$  é o tempo até a falha de cada produto.

### 2.19.3 Tempo Médio de Reparo

O MTTR (*Mean Time To Repair*), Tempo Médio de Reparo, é o tempo médio para reparo do produto que é dado pela média aritmética dos tempos de reparo ( $\beta_i$ ) de cada produto da amostra. De acordo com Lafraia (2001) o MTTR é dados pela seguinte expressão:

$$MTTR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_i \quad (21)$$

#### 2.19.4 Disponibilidade

A disponibilidade (“*availability*”) mede a extensão de tempo que o consumidor pode utilizar o produto quando desejar. O produto está disponível quando está em estado operativo. Nesse estado o produto pode estar em uso ativo (disponível) ou não (espera). O estado operativo é dado pela soma do uso ativo mais espera.

Conforme Lafraia (2001) a Disponibilidade (*availability*) é dada pela probabilidade de que um componente funcione adequadamente para um dado tempo após ter sofrido manutenção. A Disponibilidade, na prática, é expressa para componentes que operam continuamente pelo percentual de tempo em que o sistema está operante. Para componentes de reserva a Disponibilidade é a probabilidade de sucesso quando for necessária a operação do sistema.

De acordo com a NBR 5462-1994 a Disponibilidade, do inglês *Availability*, é a capacidade de um item estar em condições de executar uma determinada função em um certo instante ou durante um período de tempo determinado, considerando-se os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo assegurada a disponibilidade dos recursos externos requeridos. O termo Disponibilidade é usado como uma medida de desempenho de disponibilidade. (NBR 5462-1994, *apud* KARDEC ; NASCIF, 2010).

A Disponibilidade é dada pelo quociente entre o estado operativo e a soma do estado operativo mais estado não operativo, o que resulta na fórmula:

$$Disponibilidade = \frac{EstadoOperativo}{EstadoOperativo + EstadonãoOperativo} \quad (22)$$

A Disponibilidade também pode ser calculada pela fórmula:

$$Disponibilidade = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (23)$$

De acordo com Kardec e Nascif (2009) a Disponibilidade por ser classificada em Disponibilidade Inerente (*Inherent Availability*), Disponibilidade Técnica (*Achieved Availability*) e Disponibilidade Operacional (*Operational Availability*).

#### 2.19.4.1 Disponibilidade Inerente

De acordo com Kardec e Nascif (2009) a Disponibilidade Inerente de um equipamento é obtida levando-se em conta apenas o tempo de reparo técnico para correção das falhas, não computando os tempos de logística, de espera de peças sobressalentes, deslocamentos e outros tempos que impactam no tempo em que o produto fica indisponível. Sua interpretação é o percentual de tempo que seria disponível se não ocorressem perdas de tempo ou atrasos. Para cálculo da Disponibilidade Inerente utiliza-se a fórmula adiante:

$$Disponibilidade\ Inerente(\%) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \cdot 100 \quad (24)$$

#### 2.19.4.2 Disponibilidade Técnica

Segundo Kardec e Nascif (2009) a Disponibilidade Técnica também é conhecida por Disponibilidade Obtida ou Encontrada, no seu cálculo não são computados tempos adicionais de logística, esperas, atrasos, entre outros, mas são incluídas as manutenções corretivas e preventivas.

$$Disponibilidade\ Técnica(\%) = \frac{MTBM}{MTBM + MTTR_{Ativo}} \cdot 100 \quad (25)$$

Onde:

$MTBM$ : tempo médio entre manutenções (em inglês *Mean Time Between Maintenance*).

$MTTR_{Ativo}$ : tempo médio para reparos – corretivos e preventivos (em inglês *Mean Time to Repair Active*).

#### 2.19.4.3 Disponibilidade Operacional

Conforme mencionado por Kardec e Nascif (2009) a Disponibilidade Operacional é a avaliação mais real da disponibilidade, sendo a informação mais interessante para a empresa pois considera além do tempo para manutenção preventiva e corretiva como também para esperas, atrasos, paradas para inspeções, deslocamentos e todos os demais tempos que contribuem para a indisponibilidade dos equipamentos. Para cálculo da Disponibilidade Operacional usa-se a fórmula:

$$\text{Disponibilidade Operacional (\%)} = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \cdot 100 \quad (26)$$

Onde:

*MDT*: é o tempo médio de paralisações (em inglês *Mean Down Time*)

#### 2.19.5 Manutenibilidade

A manutenibilidade (“*maintenability*”) é definida como a probabilidade da manutenção ser completada num tempo predeterminado, quando peças falham ou são substituídas preventivamente. Entende-se por manutenção qualquer ação que mantém em condições satisfatórias de operação as unidades que não falharam. A manutenção também pode ser entendida como a ação que traz para o estado operativo as unidades que falharam. A manutenção pode ser de dois tipos: preventiva ou corretiva. As ações corretivas e preventivas podem ser completadas em tempos diferentes, dependendo do tipo de componente necessário para reposição, das ferramentas existentes, do conhecimento técnico, dos esforços de deslocamento, etc. Os tempos dessas ações irão variar, com a consequente obtenção de distribuição de tempos de manutenção. Uma forma de mensurar a manutenibilidade é o uso do parâmetro MTTR.

Os parâmetros relacionados podem ser utilizados em conjunto com os da Confiabilidade entre eles manutenibilidade e disponibilidade. “Junto com o termo Confiabilidade, eles formam aquilo que é conhecido como R/A/M, do inglês, “*Reability*”, “*Availability*” e “*Maintenability*”. Isso quer dizer que eles devem ser analisados em conjunto” (BERGAMO FILHO, 1997).

Da associação entre estes parâmetros o consumidor pode escolher entre produtos considerando cada um deles. “Não adianta nada uma empresa

produzir produto com 'alta' confiabilidade, se o tempo médio de reparo for "alto" (BERGAMO FILHO, 1997).

## 2.20 Análise do Tempo de Falha

Para Freitas e Colosimo (1997) a Análise de Tempo de Falha é um conjunto de técnicas estatísticas aplicadas à análise de dados de durabilidade os quais podem ser oriundos de dados de campo ou de testes acelerados de vida. Através da análise de tempo de falha podem ser estimadas, entre outras informações, o tempo médio até a falha, a fração esperada de falhas no período de garantia.

## 2.21 Análise paramétrica e Análise não paramétrica

A análise de confiabilidade possibilita, através de estimativa, caracterizar os comportamentos da confiabilidade, da probabilidade de falha e da taxa de falha em relação ao tempo de um componente, equipamento ou sistema, e podem, basicamente, ser classificadas em duas categorias: paramétricas e não-paramétricas.

A escolha de um modelo, que descreva a distribuição do tempo de falha de um determinado componente, sistema ou produto, deve ser realizada com cautela, pois a utilização de forma inadequada de um modelo levará a conclusões errôneas nas estimativas de quantidades. Assim, é aconselhável que se determine, considerando as características de cada uma das distribuições, qual apresenta melhor aderência ao experimento, ou seja, fazendo a comparação das curvas de distribuição verifica-se qual modelo é assumido pela curva encontrada.

Independente de qual método de análise de dados for o eleito, o estudo deve ser realizado a partir da coleta experimental dos dados do fenômeno estudado. Se a análise for feita utilizando métodos estatísticos que permitam ajustar a distribuição que melhor apresenta a função da densidade de probabilidade dos tempos de falha  $f(t)$  e respectivas funções de confiabilidade  $R(t)$  e de taxa de falha  $h(t)$ , o método denomina-se paramétrico. Porém, quando as funções citadas são estimadas, mas sem a utilização de técnicas estatísticas de ajuste de uma distribuição específica ao fenômeno de interesse

e a respectiva determinação de seus parâmetros, a análise é denominada não-paramétrica.

Diversos fatores podem influenciar na escolha de qual tipo de análise utilizar para estimativa da confiabilidade  $R(t)$  e demais funções pertinentes em relação ao tempo. Entretanto é recomendado iniciar o experimento realizando a análise não-paramétrica, visto a paramétrica requerer, normalmente, maior disponibilidade de tempo e recursos para sua realização, e a não-paramétrica dará uma estimativa relativamente rápida e de menor custo para as funções de interesse, com resultados bastante significativos e muitas vezes suficientes para o objetivo que se deseja atingir.

Quando um produto encontra-se em desenvolvimento, usualmente inclui o uso de protótipos e permanece por um período em fase de testes. Seguindo as considerações acima, convém a aplicação de análises não-paramétricas (O'CONNOR, 1991).

Em análises buscando a melhoria da qualidade de um produto já em produção, bem como a fixação de período de garantia ou reposição de componentes defeituosos, é possível obter uma quantidade de elementos suficiente para compor uma amostra para ensaio de falhas, atendendo as exigências de critérios estatísticos. Se houver disponibilidade de recursos financeiros, de laboratório, de pessoal além de tempo para realização de todo o estudo, é recomendável que se utilize análise paramétrica para ajuste de uma distribuição específica visando caracterizar o fenômeno estudado. Nos experimentos realizados com um número de elementos da amostra, tanto no estudo de confiabilidade paramétrico como no não-paramétrico, deve-se reproduzir como condição de ensaio, a mesma condição de uso do produto, que induz a ocorrência de um modo de falha específico, objeto do estudo.

Para garantir a validade do experimento, as amostras ou protótipos devem ser fabricados em conformidade com o projeto do produto, empregando a mesma seqüência de fabricação e evitando-se ao máximo o uso de oficinas de protótipos ou ferramentaria para sua execução, pois a alteração do processo de fabricação pode causar influência sobre o modo de falha em estudo. Também é necessário que as amostras sejam submetidas ao mesmo tipo de solicitação externa, englobando condições ambientais, condições de

carregamento e mesmo condições de manutenção, caso seja previsto seu uso durante o ensaio, sendo que estas solicitações podem retratar uma condição normal de operação do produto, ou uma condição de operação mais severa, objetivando precipitar a ocorrência de falha.

Caso o objetivo do experimento seja definir a variação temporal da confiabilidade de um componente, equipamento ou produto ao longo de sua vida. Recomenda-se obter o máximo de informações sobre o comportamento das unidades que compõem a amostra, e para tanto é necessária a execução do ensaio até o instante em que ocorre a falha de todas as unidades empregadas no experimento.

As análises não-paramétricas podem ser realizadas considerando-se duas formas de coleta de dados: agrupada ou não-agrupada.

Considera-se que estão sendo realizados testes completos de confiabilidade, onde todas as unidades falharam para que o experimento seja concluído, ou seja: sem censuras.

No caso de dados agrupados, as quantidades de elementos que falharam estão agrupadas em intervalos de tempo correspondentes e não há informação do exato instante em que ocorreu a falha de um elemento específico, visto o teste considerar intervalos de tempo de falha nos quais são registradas as quantidades respectivas de elementos que falharam em cada um desses períodos.

Já nos testes utilizando dados não-agrupados, a partir da observação da sequência de falha dos elementos da amostra são obtidos os tempos de falha para cada um dos seus componentes.

## 2.22 Estimadores Não Paramétricos da Função de Confiabilidade

Quando da realização de um teste para obter as funções de confiabilidade e de taxa de falhas nem sempre se pode contar que todos os itens sob teste falhem. De acordo com Freitas e Colosimo (1997) na prática os dados apresentam censuras que fornecem apenas parte da informação sobre o tempo de falha dos itens sob teste. Os dados censurados informam que o tempo de falha daqueles itens que não falharam é maior do que aquele no qual a censura foi registrada.

A fim de analisar dados de tempo de falha em dados com presença de censuras podem ser utilizados dois estimadores não-paramétricos para a função de confiabilidade. Para a construção destes estimadores não é necessário especificar a distribuição da variável tempo até a falha. Estes estimadores são Tabela de Vida e Kaplan-Meier, sendo o segundo mais utilizado. (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

### 2.22.1 Estimador da Tabela de Vida

A construção deste estimador é feita dividindo-se o eixo do tempo em uma quantidade  $k+1$  de intervalos, sendo  $k$  a quantidade de itens que apresentaram falha. Em seguida marca-se sobre o eixo do tempo os pontos de corte  $t_0=0$  e  $t_1, t_2, \dots, t_k$ , isto irá gerar um conjunto com  $k$  intervalos para os quais deve-se estimar a probabilidade ( $q_i$ ) de um item falhar no intervalo  $[t_{i-1}, t_i)$  dado que não falhou até  $t_{i-1}$  pela expressão:

$$q_i = P(T \in [t_{i-1}, t_i) / T \geq t_{i-1}) \quad (27)$$

A expressão apresentada pode ser estimada em cada intervalo pelo estimador  $\hat{q}(i)$  dado pelo quociente entre o número de itens que falharam no intervalo e o número de itens sob risco no início do intervalo subtraído pela metade do número censurado no intervalo de acordo com a expressão:

$$\hat{q}(i) = \frac{\text{n}^\circ \text{ de itens que falharam no intervalo } [t_{i-1}, t_i)}{\text{n}^\circ \text{ sob risco em } [t_{i-1}, t_i) - \frac{\text{n}^\circ \text{ censurado em } [t_{i-1}, t_i)}{2}} \quad (28)$$

A função de confiabilidade tem o aspecto de uma função escada sendo que no primeiro intervalo seu valor é um e no último seu valor é zero. (FREITAS; COLOSIMO, 1997)

### 2.22.2 Estimador de Kaplan-Meier

De acordo com Chaves Neto (2005) este estimador também é conhecido como limite-produto. É um estimador não-paramétrico para a função de

confiabilidade que, nos casos em que não existem censuras nos dados, é definida por:

$$\hat{R}(t) = \frac{\text{número de itens em operação até o tempo } t}{\text{número de itens que estão sendo testados}} \quad (29)$$

Neste caso a função de Confiabilidade é uma função escada com degraus nos tempos observados de falha.

Segundo Freitas e Colosimo (1997) em aplicações práticas comumente existem censuras que fornecem apenas parte da informação sobre o tempo de falha dos itens sob teste. Nestes casos utilizam-se dois estimadores não paramétricos para a função de confiabilidade. Estes estimadores são: tabela de vida e Kaplan-Meier.

O estimador de Kaplan-Meier considera, na sua construção, um número de intervalos de tempo igual ao número de falhas distintas. Os limites para estes intervalos de tempo são os tempos de falha da amostra. A fórmula do estimador de Kaplan-Meier é a seguinte:

$$\hat{R}(t) = \left[ \frac{n_{t_1} - d_{t_1}}{n_{t_1}} \right] \left[ \frac{n_{t_2} - d_{t_2}}{n_{t_2}} \right] \dots \left[ \frac{n_{t_o} - d_{t_o}}{n_{t_o}} \right] \quad (30)$$

Onde:

$d_{t_i}$ : número de falhas no tempo  $t_i$

$n_{t_i}$ : número de itens sob risco (que não falhou e não foi censurado) em  $t_i$   
(exclusive)

$t_o$ : é o maior tempo de falha menor que  $t$

A fórmula é elaborada considerando a existência de  $n$  itens sendo testados e  $k$  falhas distintas ( $k \leq n$ ) nos tempos  $t_1 < t_2 < \dots < t_k$ . Podem acontecer alguns casos de empate nos quais ocorre mais de uma falha no mesmo tempo. Se acontecer ocorrência simultânea de censuras e falhas (empate) convencionou-se adotar o tempo de censura imediatamente posterior ao tempo de falha. Esta fórmula é importante quando existem censuras do tipo aleatório (que ocorre antes do término do teste), nos casos das Censuras tipo I(tempo) e II(falha) o estimador de Kaplan-Meier é o mesmo que o estimador da função de Confiabilidade da expressão (27). (FREITAS; COLOSIMO, 1997).

### 2.22.3 Comparação entre Estimador Tempo de Vida e Estimador de Kaplan-Meier

De acordo com Freitas e Colosimo (1997) tanto o estimador tempo de vida como o estimador de Kaplan-Meier oferecem respostas para a função de confiabilidade e para o tempo de vida, porém os valores são diferentes. O principal motivo da existência desta diferença é a quantidade de intervalos usados para o cálculo de cada um deles. No estimador de Kaplan-Meier o número de intervalos é igual ao número de tempos de falha distintos. No estimador da tabela de vida os tempos de falha são agrupados em intervalos adotados arbitrariamente. Em vista disto a quantidade de intervalos utilizada pelo estimador Kaplan-Meier é maior que a quantidade de intervalos obtida através do estimador da tabela de vida. A divisão dos intervalos de forma arbitrária é justificada para uso em amostras muito grandes o que não ocorre com frequência em amostras de testes de confiabilidade.

Freitas e Colosimo (1997) não recomendam o uso do estimador de tabela de vida para conjunto de dados com poucas observações. Contudo afirma que este estimador se ajusta bem em testes em que os tempos de falha exatos são desconhecidos, porém sabe-se que ocorreram dentro de um determinado intervalo de tempo.

O estimador da tabela de vida se utilizado com um número igual ou maior de intervalos fornece estimativas exatamente iguais àquelas geradas pelo estimador de Kaplan-Meier nos casos em que censura ocorre por tempo ou por falha. No caso de censura tipo aleatória, o estimador de Kaplan-Meier apresenta resultados superiores para a função de confiabilidade visto que é não viciado em grandes amostras, ao contrário do estimador da tabela de vida. O vício do estimador da tabela de vida em grandes amostras fica pequeno à medida que o comprimento dos intervalos diminui. Evidências empíricas mostram a superioridade do estimador de Kaplan-Meier também em amostras de pequeno ou médio porte.

#### 2.22.4 Intervalo de Confiança Para o Estimador de Kaplan-Meier da Confiabilidade

Segundo Freitas e Colosimo (1997) o Estimador de Kaplan-Meier está sujeito à variação amostral, sendo necessário conhecer sua precisão.

De acordo com Chaves Neto(2005) uma estimativa para a variância desse estimador é dada pela fórmula de Greenwood, apresentada adiante:

$$\hat{V}[\hat{R}(t)] = \hat{R}(t)^2 \left[ \frac{d_{t_1}}{n_{t_1}(n_{t_1} - 1)} + \frac{d_{t_2}}{n_{t_2}(n_{t_2} - 1)} + \dots + \frac{d_{t_o}}{n_{t_o}(n_{t_o} - 1)} \right] \quad (31)$$

Onde os elementos  $d_{t_1}$ ,  $n_{t_1}$  e  $t_o$  são os mesmos definidos na expressão de  $\hat{R}(t)$ .

A partir da variância do estimador pode ser estimado o erro padrão dessa estatística:

$$\hat{e}_p[\hat{R}(t)] = \sqrt{\hat{V}[\hat{R}(t)]} \quad (32)$$

De acordo com Chaves Neto(2005) para o cálculo do intervalo de confiança para  $\hat{R}(t)$  é obtido com base no Teorema Central do Limite através do uso de um pivô cuja expressão é:

$$\frac{R(t) - \hat{R}(t)}{\hat{e}_p[\hat{R}(t)]} \sim N(0,1) \quad (33)$$

Assim, de acordo com Chaves Neto (2005) é possível enunciar o intervalo de confiança de nível  $(1-\alpha)$ :

$$P \left\{ \hat{R}(t) - z_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \hat{e}_p[\hat{R}(t)] \leq R(t) \leq \hat{R}(t) + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \hat{e}_p[\hat{R}(t)] \right\} = 1-\alpha \quad (34)$$

#### 2.22.5 Transformação Para Valores Extremos de R(t)

De acordo com Chaves Neto(2005) quando o valor real de R(t) está próximo dos extremos do intervalo (0,1) os limites inferior e superior do intervalo de confiança podem ser inferiores a zero ou superiores a um. Neste

caso efetua-se a construção de um novo intervalo baseado na transformação na qual uma variável  $\hat{U}(t)$ , função de  $\hat{R}(t)$ , é definida como:

$$\hat{U}(t) = \ln\{-\ln[\hat{R}(t)]\} \quad (35)$$

A variância de  $\hat{U}(t)$  é dada por:

$$\hat{V}[\hat{U}(t)] = \frac{\hat{V}[\hat{R}(t)]}{\hat{R}(t)^2} \quad (36)$$

$$\left\{ \ln \left[ \frac{n_{t_1} - d_1}{n_{t_1}} \right] + \ln \left[ \frac{n_{t_2} - d_2}{n_{t_2}} \right] + \dots + \ln \left[ \frac{n_{t_0} - d_0}{n_{t_0}} \right] \right\}$$

A partir desta expressão enuncia-se o erro padrão para  $\hat{U}(t)$  pela expressão:

$$\hat{e}_p[\hat{U}(t)] = \sqrt{\hat{V}[\hat{U}(t)]} \quad (37)$$

Então, segundo Chaves Neto (2005) o intervalo de confiança de nível  $(1-\alpha)$  para  $R(t)$  é, neste caso, dado por:

$$P\{\hat{R}(t)^{z \cdot \hat{e}_p[\hat{U}(t)]} \leq R(t) \leq \hat{R}(t)^{-z \cdot \hat{e}_p[\hat{U}(t)]}\} = 1-\alpha \quad (38)$$

Onde:  $Z \sim N(0,1)$ .

## 2.23 Métodos Paramétricos Para Análise de Tempo de falha

O uso dos estimadores da tabela de vida e de Kaplan-Meier podem ser utilizados para estimar a função de confiabilidade e o tempo de falha no caso em que não é necessário especificar nenhuma distribuição de probabilidade para a variável em estudo, por isso estes estimadores são chamados de não paramétricos.

De acordo com Freitas e Colosimo (1997) outras técnicas estatísticas podem ser aplicadas na análise de dados de confiabilidade. Estas técnicas são chamadas de técnicas paramétricas e requerem o conhecimento da distribuição de probabilidade para o tempo de falha. A distribuição de probabilidade deve ser bem escolhida para estimar os dados de interesse, neste caso as técnicas paramétricas apresentam uma eficiência maior que as

técnicas não paramétricas. A distribuição de probabilidade é chamada de modelo probabilístico para o tempo de falha. Quando se utilizam técnicas paramétricas os parâmetros dos modelos são estimados a partir do método da máxima verossimilhança cujas propriedades possibilitam a construção de intervalos de confiança para as informações de interesse. Entre os modelos probabilísticos existentes os mais usados são o exponencial, o de Weibull e o log-normal.

A escolha do modelo probabilístico pode levar a resultados diferentes e induzir a erros na estimativa das informações de confiabilidade.

Os modelos de probabilidade são caracterizados por parâmetros, que são valores desconhecidos que devem ser observados a partir das observações amostrais.

### 2.23.1 Métodos Para Estimativa de Parâmetros

Quando a análise paramétrica é a escolhida, o estudo visa estimar os parâmetros de uma função distribuição de probabilidade que se supõe modelar o fenômeno em estudo, ou seja, a confiabilidade do componente ou sistema em análise.

Para execução da estimativa dos parâmetros de uma distribuição de probabilidade, pode-se optar por três métodos: método dos momentos, método da máxima verossimilhança e método gráfico (MARTHA DE SOUZA, 2003).

Sendo que os parâmetros em questão são propriedades de uma distribuição de probabilidade, a qual rege o comportamento de uma dada população, ou seja: estão associados com o comportamento da população e, portanto fixos para uma população específica, deve-se considerar que dificilmente tem-se acesso a todos os elementos de uma população, logo devem ser obtidas estimativas dos parâmetros da distribuição a partir da análise dos dados de amostras retiradas de uma população. Assim, a estimativa dos parâmetros da população é obtida em função da amostra retirada da população, e para cálculo da estimativa deve-se empregar uma formulação, a qual é denominada estimador.

No método dos momentos, a partir dos dados obtidos, com o estudo de uma amostra e com a utilização de formulações específicas, definem-se os momentos amostrais, que representam as estimativas dos momentos da

população. A partir da formulação da distribuição de probabilidade que se pretende empregar para representar a confiabilidade do produto em estudo, pode-se determinar os momentos da mesma, os quais são representados por fórmulas, dependentes dos parâmetros que norteiam a distribuição em estudo. Conhecendo-se o valor numérico dos momentos amostrais, pode-se igualá-los aos momentos da distribuição, ou seja, há uma igualdade entre os valores numéricos e suas correspondentes formulações, obtidas da análise da distribuição. Dessa forma, tem-se um sistema de equações, cujas variáveis são os parâmetros da distribuição de probabilidade, sendo que a solução do sistema de equações fornece a estimativa dos parâmetros da distribuição que rege o comportamento da população da qual a amostra faz parte. Portanto, o sistema de equações acima citado deve ser composto por um número de equações igual ao número de parâmetros que caracterizam a função densidade de probabilidade em estudo.

O método dos momentos é bastante simples de ser aplicado, havendo a necessidade do cálculo dos momentos da amostra e dos correspondentes momentos da distribuição, formando um sistema de equações cuja solução fornece os parâmetros da distribuição. A maior dificuldade reside na solução do sistema de equações, que pode vir a ser bastante complexo, em função das formulações que permitem o cálculo dos momentos da distribuição.

Já o método da máxima verossimilhança permite a determinação de uma formulação denominada estimador, a qual permite o cálculo da estimativa de um parâmetro da população a partir dos valores de tempo até a falha definidos nos ensaios com as amostras, ou seja, a partir das características amostrais.

Para estimar os parâmetros de um modelo probabilístico envolvendo estudos de confiabilidade o uso do método da máxima verossimilhança é apropriado pelo fato de incorporar as censuras, ser de simples entendimento e possuir propriedades que permitem a construção de intervalos de confiança para as quantidades de interesse. (FREITAS; COLOSIMO, 1997)

O método da máxima verossimilhança considera a existência de uma amostra de  $n$  elementos  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , extraída de uma população, cuja distribuição de probabilidade é regida por um parâmetro, representada pela função densidade de probabilidade  $f(x|\theta)$ .

Considerando-se que o sorteio de cada um dos elementos da amostra representa um evento independente, ou seja, o sorteio de um dado valor amostral não influencia a probabilidade de ser sorteado o valor do componente seguinte, pode-se construir a função de verossimilhança,  $L(X_1, X_2, \dots, X_n | \theta)$ , da seguinte maneira:

$$L(X_1, X_2, \dots, X_n | \theta) = f(X_1 | \theta) \cdot f(X_2 | \theta) \cdot \dots \cdot f(X_n | \theta) = \prod_{i=1}^n f(X_i | \theta) \quad (39)$$

Onde:

$f(X_i | \theta)$  é a função densidade de probabilidade  $f(x | \theta)$  calculada no ponto  $X_i$ .

A função de verossimilhança representa a probabilidade da amostra ter sido extraída da população, cuja função densidade de probabilidade é regida pelo parâmetro  $\theta$ . O estimador para o parâmetro  $\theta$ , denominado  $\hat{\theta}$ , é aquele que maximiza a função de uma população com um parâmetro  $\theta$ , cujo estimador é  $\hat{\theta}$ .

Como a função de verossimilhança é dependente de  $\theta$ , para definir o ponto de máximo da mesma deve-se calcular a sua derivada parcial em relação a  $\theta$ , e igualando-a a zero, define-se as raízes da função, que são os possíveis pontos de inflexão (máximo ou mínimo) de uma função. Através da aplicação de conceitos de cálculo define-se o ponto de máximo, o qual é representado por uma formulação, que representa o estimador de  $\theta$ , ou seja  $\hat{\theta}$ . Uma vez sorteada a amostra, define-se os valores numéricos de  $X_i$ , obtendo-se a estimativa de  $\theta$ , ou seja, seu valor numérico, simplesmente com a aplicação da fórmula do estimador.

Através do método da máxima verossimilhança busca-se a distribuição que tem maior possibilidade de ter gerados os resultados obtidos pela amostra.

Chaves Neto (2005) propõe que a escolha do modelo mais adequado para se ajustar ao tempo de falha deve ser feita entre os modelos Gaussiano (Normal), Exponencial, Weibull e Log-normal. O critério utilizado para esta escolha é o uso do valor-p resultante da aplicação do teste de aderência de

Kolmogorov-Smirnov, escolhendo-se o modelo cuja aplicação do teste produza o maior valor-p. Outros testes podem ser utilizados como o Qui-quadrado e o teste de normalidade de Shapiro-Wilks no caso em que se deseja testar a aderência do conjunto de dados com a distribuição Gaussiana.

O terceiro método que pode ser empregado na estimação de parâmetros de uma distribuição de probabilidade é o denominado método gráfico. A essência deste método envolve a transformação da equação da função distribuição acumulada em uma equação de reta, do tipo:

$$Y = aX^* + b \quad (40)$$

Sendo que o parâmetro  $Y$  está relacionado com o valor numérico da função distribuição acumulada, calculada no ponto  $x_i$ , onde  $x_i$  é um possível valor da variável aleatória  $X$ . Já os coeficientes  $a$  e  $b$  estão relacionados com os parâmetros da distribuição de probabilidade em estudo. A variável  $X^*$  está diretamente relacionada com a variável  $X$ .

Portanto, neste método é necessária a transformação da função densidade de probabilidade, permitindo o cálculo dos valores  $X^*$  e de posse dos pares  $(X^*, Y)$  pode-se aplicar o método dos mínimos quadrados para determinar os coeficientes  $A$  e  $B$  e o próprio coeficiente de correlação. Caso o ajuste da reta seja considerado satisfatório, a partir dos coeficientes  $A$  e  $B$  define-se os parâmetros da distribuição de probabilidade que representa o fenômeno em estudo.

Visando facilitar a avaliação dos parâmetros de uma distribuição a partir dos métodos gráficos podem ser empregados os denominados papéis de probabilidade, os quais estão elaborados de forma a permitir ao usuário traçar de uma forma bastante simples a reta que representa o processo em análise. Existem papéis representando distribuições de probabilidade específicas.

As principais vantagens do método gráfico são a facilidade de seu emprego, que não demanda técnicas analítico-estatísticas mais complexas e, sobretudo, a possibilidade de visualizar o comportamento da série de dados no tocante a representatividade da distribuição assumida por hipótese e aumentar a compreensão do fenômeno estudado.

### 2.23.2 Testes de Aderência

A aderência pode ser testada estatisticamente através de três métodos: qui quadrado ( $\chi^2$ ), Kolmogorov-Smirnov (K-S) e coeficiente de correlação (R). Outro teste que pode ser utilizado para identificação do modelo é o Critério de Informação de Akaike.

O qui quadrado é um teste de aderência muito versátil e utilizado para dados agrupados. Para maior credibilidade, é desejável que possua pelo menos três classes, sendo cada uma delas formada por pelo menos cinco dados da amostra, entretanto, pode ser dividida em classes, de acordo com a necessidade que os valores impõem, para que se possa assumir uma correta distribuição (O'CONNOR, 1991).

A fórmula para cálculo para o qui quadrado é:

$$\chi^2 = \sum_i^n \frac{(x_i - E_i)^2}{E_i} \quad (41)$$

Onde:

$x_i$  : classificação do valor acumulado

$E_i$  : classificação do valor estimado acumulado para a distribuição assumida

A definição de valor elevado para  $\chi^2$ , tende a resultar em hipótese duvidosa, que é rejeitada quando o valor de  $\chi^2$  apresenta grau de confiança inferior ao desejado. Se  $\chi^2$  for inferior a este valor, a informação é insuficiente para rejeitar a hipótese de uma suposta distribuição de dados.

Outro teste de aderência é o Kolmogorov-Smirnov, também conhecido como K-S. Sua utilização é tão simples quanto o teste  $\chi^2$ , e pode trazer melhores resultados com menor quantidade de informações.

É adequado no uso em conjunto com curvas probabilísticas, desde que baseado em uma classificação acumulada das informações, procedendo da seguinte forma:

1. tabular a classificação dos intervalos de dados (calculando os valores de  $|x_i - E_i|$ );
2. determinar o valor máximo;

3. comparar com o valor apropriado de K-S que pode ser obtido na tabela de valores críticos para a estatística do teste Kolmogorov-Smirnov a partir do tamanho da amostra e do nível de significância desejado.

O método dos mínimos quadrados é utilizado para medir a correlação linear da informação com a equação da reta com melhor aderência aos dados inseridos. A linha mais próxima a distribuição apresentada pelos dados é chamada de linha de retorno, e a aderência obtida pelo método dos mínimos quadrados, chamado de coeficiente de correlação.

O coeficiente de correlação é dado por:

$$R = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (42)$$

Sabendo-se que:

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (43)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (44)$$

$$S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (45)$$

Onde:

X e Y são coordenadas de inserção de dados.

A linha de inserção de dados é dada por:

$$(y - \bar{y}) = \frac{S_{xy}}{S_x^2} (x - \bar{x}) \quad (46)$$

Se for positivo indicará uma correlação de dados positiva com reta de retorno crescente; subentende-se que se  $R$  for negativo, indicará uma correlação negativa com reta de retorno decrescente; se  $R$  for igual um, indicará uma perfeita correlação, com todos os pontos inseridos na linha de retorno; se  $R$  for igual a zero, as variáveis não serão correlacionadas linearmente.

O coeficiente de determinação  $R^2$ , é freqüentemente usado em substituição ao  $R$  para indicar a correlação, apresentando uma indicação mais precisa, particularmente na inserção probabilística de dados. Este valor determina o quanto a variação do fenômeno em estudo é explicada pelo modelo linear, ou seja, por uma equação de reta.

A regressão linear pode ser usada para informações de correlações não lineares se  $x$  for transformado para tornar linear a equação. Portanto, o método pode ser utilizado para estimar a aderência dos dados inseridos em papéis de probabilidade.

### 2.23.3 Distribuição Normal de Probabilidade

A distribuição normal de probabilidade tem sua função densidade de probabilidade (fdp) dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu_t}{\sigma_t}\right)^2\right], -\infty \leq t \leq \infty \quad (47)$$

Onde:  $t$  é a variável aleatória e  $\mu \in \mathbb{R}$ ,  $\sigma \in \mathbb{R}^+$ .

### Função Distribuição da Variável Aleatória Normal Padrão

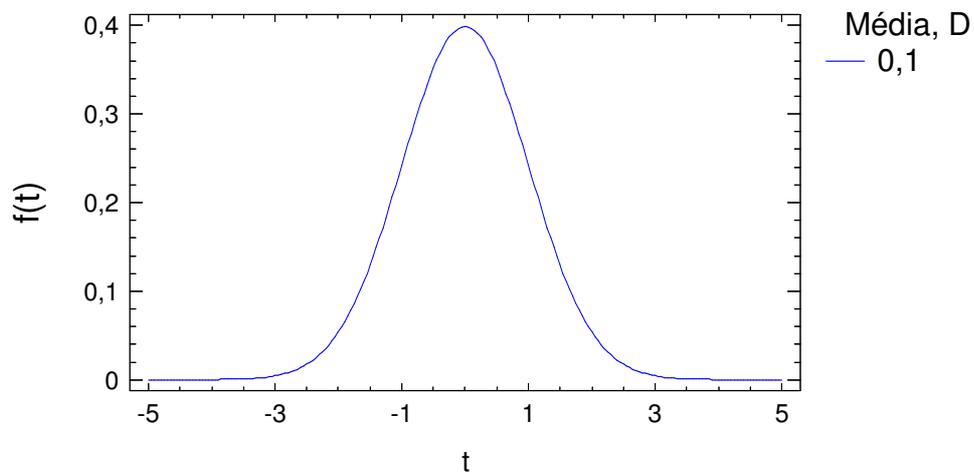


FIGURA 16 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DENSIDADE DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL  
 FONTE: O autor (2011)

A distribuição normal é caracterizada por dois parâmetros: a média da população ( $\mu_t$ ) e o desvio padrão da população ( $\sigma_t$ ), considerando parâmetros os elementos que devem ser conhecidos para obter-se a completa definição de uma função densidade de probabilidade.

Entre as razões para a distribuição normal ser considerada importante está a enunciada pelo Teorema Central do Limite. De acordo com este teorema qualquer distribuição para grandes amostras terá a distribuição da média próxima à distribuição normal.

A função distribuição acumulada da distribuição normal é obtida pela seguinte operação de integração:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu_t}{\sigma_t}\right)^2\right] dt, -\infty \leq t \leq \infty \quad (48)$$

### Função Distribuição Acumulada da Variável Aleatória Normal Padrão

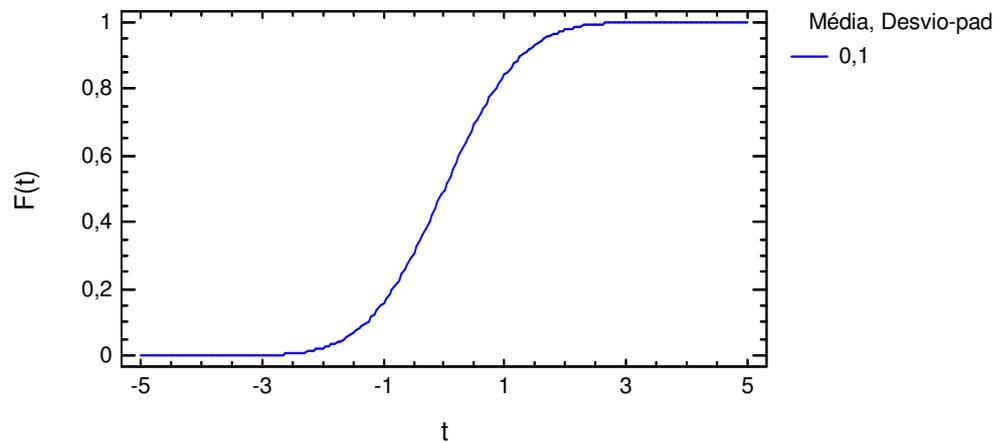


FIGURA 17 – GRÁFICO DA PROBABILIDADE ACUMULADA DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL  
 FONTE: O autor (2011)

Considerando as dificuldades envolvidas na integração da função densidade de probabilidade da distribuição normal, a função distribuição acumulada é obtida através da denominada distribuição normal padrão, para a qual aplica-se:  $\mu_t = 0$  e  $\sigma_t = 1$ .

O cálculo de probabilidade e da função distribuição acumulada baseado na utilização da distribuição normal padrão é efetuado com o emprego das seguintes relações:

$$P(t < t_0) = F(t_0) = \Phi\left(\frac{t_0 - \mu_t}{\sigma_t}\right) \quad (49)$$

Onde:

$\Phi$  : distribuição acumulada da distribuição normal padrão

$\mu_t$  : média da população

$\sigma_t$  : desvio-padrão da população

A distribuição normal padrão é caracterizada pela seguinte mudança de variáveis:

$$u = \frac{t_0 - \mu_t}{\sigma_t} \quad (50)$$

A distribuição normal reduzida é encontrada em tabelas de publicações diversas, relacionadas a conceitos de probabilidade, estatística, controle de qualidade e confiabilidade, embora possa haver alguma variação na forma de apresentação dos dados.

O valor esperado, também conhecido como a média da distribuição, é determinado utilizando a equação:

$$E[t] = \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot f(t) dt = \mu_t \quad (51)$$

E o desvio-padrão é obtido extraindo-se a raiz quadrada da variância, que é dada por:

$$Var[t] = E[t^2] - E^2[t] = \sigma_t^2 \quad (52)$$

Pelos resultados percebe-se que a média e a variância caracterizam totalmente a distribuição normal.

A distribuição normal é simétrica, centrada na própria média da população, sendo coincidentes os valores da moda, mediana e média. Desta forma, tem-se que 50% da distribuição encontram-se à direita da média e os restantes 50% à esquerda desse parâmetro. Outrossim, as caudas da distribuição são abertas em ambas as extremidades, ou seja, para as situações em que a região de interesse para a análise de confiabilidade localiza-se próximo às caudas, qualquer variação nas condições dos dados experimentais implica em alterações sensíveis de probabilidade, o que influencia sobremaneira a análise de confiabilidade.

O achatamento da função distribuição de probabilidade é determinado pela variância, sendo que quanto maior este valor, maior será a dispersão da distribuição e mais achatada será a curva da função densidade de probabilidade.

Utiliza-se a distribuição normal, tipicamente, para representar erros de medição, variabilidade dimensional e propriedades mecânicas de materiais.

### Função de Confiabilidade da Variável Aleatória Normal Padrão

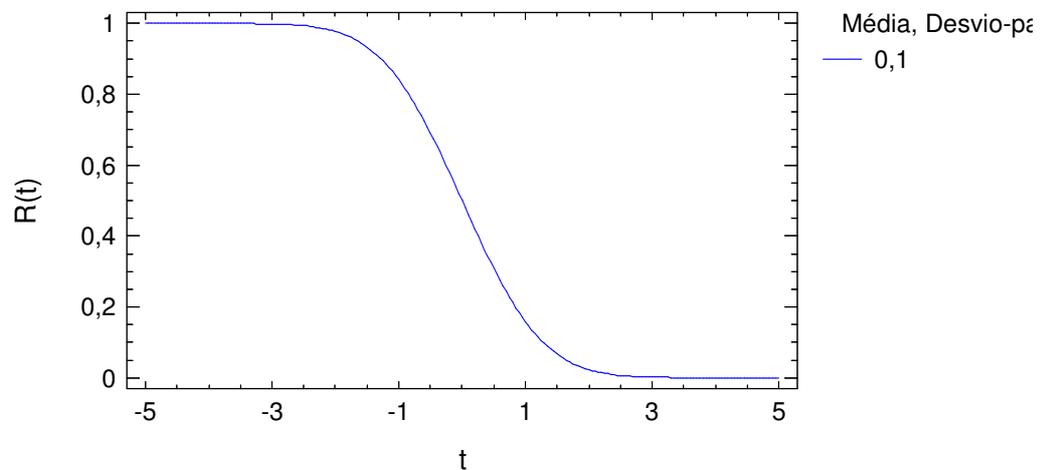


FIGURA 18 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL  
 FONTE: O autor (2011)

### Função Risco Acumulado da Variável Aleatória Normal Padrão

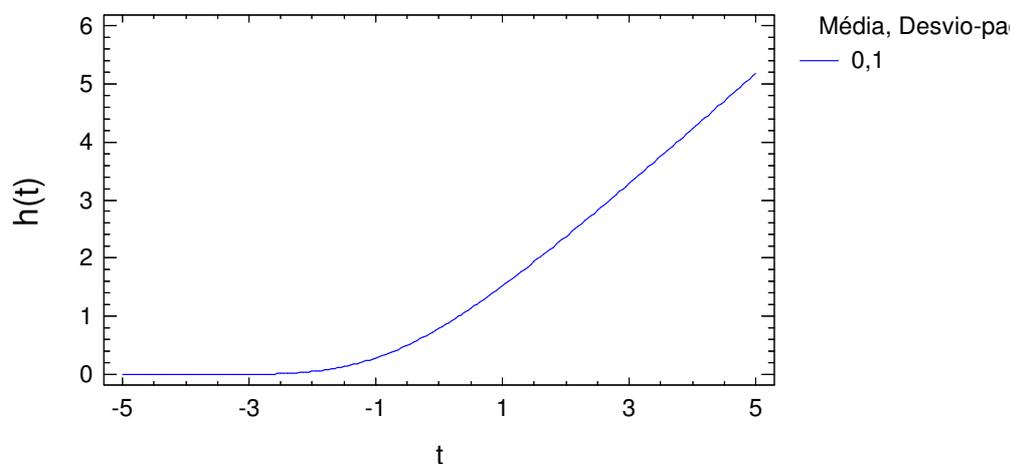


FIGURA 19 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DE RISCO DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL  
 FONTE: O autor (2011)

Piazza (2000) afirma que a distribuição normal é aplicada quando existe uma concentração de dados em torno da média com a mesma probabilidade de que ocorram acima ou abaixo da média, sendo a variação nas observações resultante de várias causas pequenas.

De acordo com Lafraia (2001) uma população que se tem variações simétricas e dispostas ao redor da média se ajusta a uma distribuição normal.

### 2.23.4 Distribuição Exponencial de Probabilidade

A distribuição exponencial se caracteriza por ter uma função de taxa de falha constante, e é a única com esta propriedade. É uma das mais simples em termos matemáticos e empregada em casos onde as falhas ocorrem de forma aleatória com uma taxa fixa e sem um considerável mecanismo de desgaste.

A distribuição exponencial de probabilidade tem aplicação como modelo para tempo de vida de produtos eletrônicos, óleos isolantes e dielétricos.

A função de densidade para o tempo de falha  $t$  com distribuição exponencial é dada por:

$$f(t) = (1/\alpha)e^{-t/\alpha}, \quad t \geq 0 \quad (53)$$

Onde  $\alpha=0$  é o tempo médio de vida medido na mesma unidade do tempo de falha  $t$ .

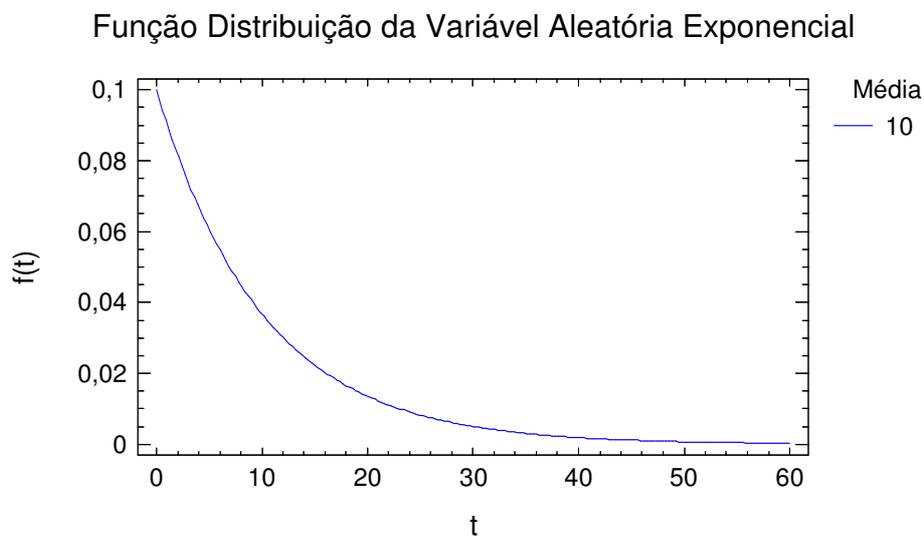


FIGURA 20 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DENSIDADE DA DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL  
 FONTE: O autor (2011)

Função Distribuição Acumulada da Variável Aleatória Exponencial

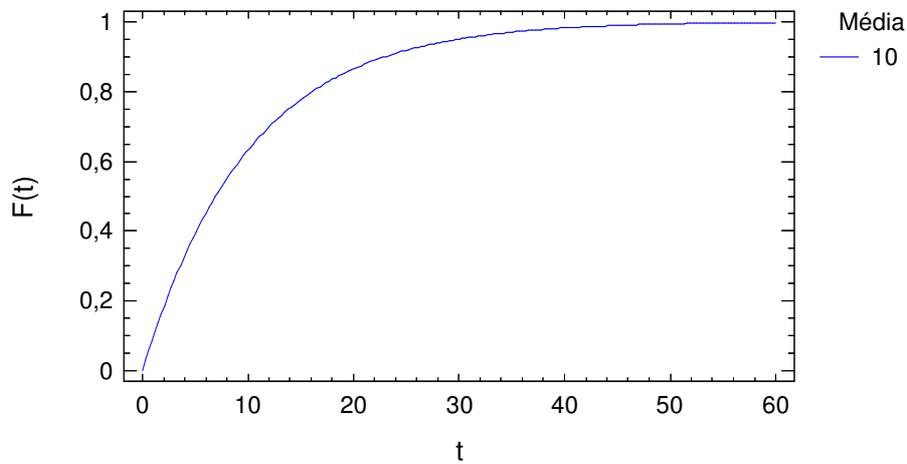


FIGURA 21 – GRÁFICO DA PROBABILIDADE ACUMULADA DA DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL

FONTE: O autor (2011)

A função de confiabilidade  $R(t)$ , que é a probabilidade de o produto persistir além do tempo  $t$ , é dada para a distribuição exponencial por:

$$R(t) = e^{-t/\alpha} \quad (54)$$

Função de Confiabilidade da Variável Aleatória Exponencial

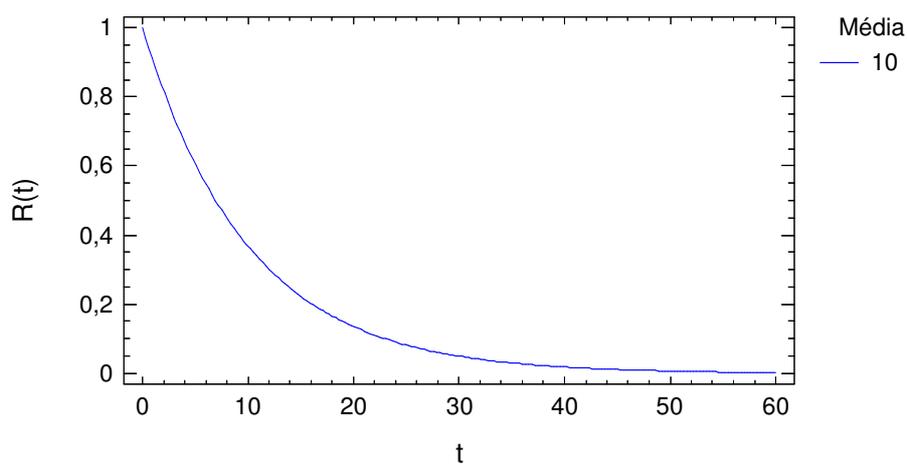


FIGURA 22 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE DA DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL

FONTE: O autor (2011)

Sendo a função de taxa de falha associada à distribuição exponencial constante e igual a  $1/\alpha$ , ou seja, uma unidade da amostra velha, que ainda não falhou, tem mesma probabilidade de falhar em um intervalo futuro que uma unidade nova. Esta propriedade é chamada de falta de memória da distribuição exponencial. (FREITAS; COLOSIMO, 1997)

Função Risco Acumulado da Variável Aleatória Exponencial

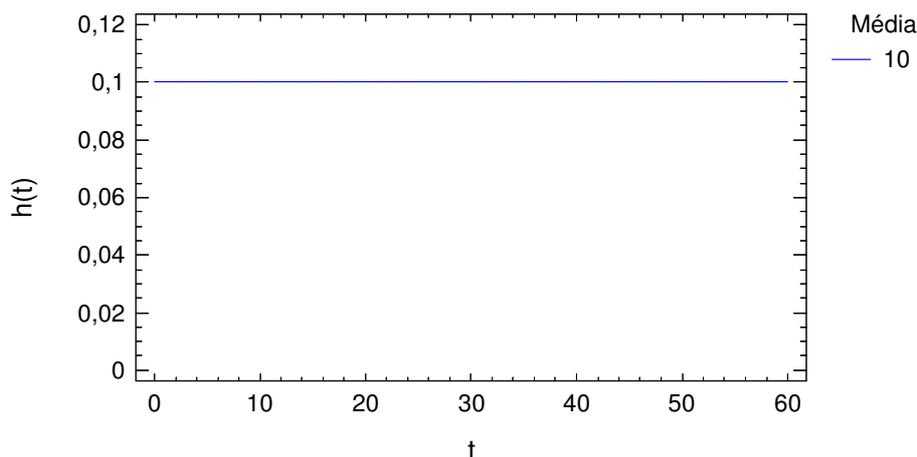


FIGURA 23 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DE RISCO DA DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL  
 FONTE: O autor (2011)

Também são características de interesse para o estudo da confiabilidade a média, a variância e os percentis. A média da distribuição exponencial representa o MTTF ou o MTBF e é dada pelo valor de  $\alpha$ , e a variância é dada por  $\alpha^2$ . Os percentis podem ser obtidos a partir da função de densidade ou da função de confiabilidade e pode ser usados para fornecer informações a respeito de falhas prematuras. Dada uma taxa de falha um dos objetivos pode ser a obtenção de um determinado percentil de falha dos equipamentos dentro de uma fração da taxa de falha, o percentil de interesse é dado por:

$$t_p = -\alpha \ln(1 - p) \quad (55)$$

Onde:  $p$  é o percentil de interesse.

Como exemplo é possível citar o caso do ventilador de um motor a diesel com taxa de falha com distribuição exponencial e igual a 28700 horas. Para o

caso de desejar-se obter em quantas horas de uso o percentil de 1% apresentará falhas aplica-se a fórmula substituindo-se os valores indicados:

$$t_{0,01} = -28700 \ln(1 - 0,01) = 288 \text{ horas}$$

Logo, para o exemplo citado, pode-se esperar que 1% dos ventiladores de motores diesel produzidos apresente falha nas primeiras 288 horas de uso.

Lafraia (2001) enuncia as seguintes aplicações para a Distribuição Exponencial:

- falhas de equipamentos com mais de duzentos componentes sujeitos a mais de três manutenções corretivas/preventivas;
- sistemas complexos não redundantes;
- sistemas complexos com componentes com taxas de falhas independentes;
- sistemas com dados de falha mostrando causas muito heterogêneas;
- sistemas de vários componentes, com substituições antes de falhas devido à manutenção preventiva.

#### 2.23.5 Distribuição Weibull de Probabilidade

A distribuição de Weibull foi proposta originalmente pelo pesquisador sueco Waloddi Weibull (1939) em estudos referentes ao tempo de falha devido a fadiga de metais e exposta posteriormente em outro estudo (1951) denominado “*A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*”, onde o modelo foi aplicado para tipos distintos de amostras, tais como: resistência a deformação e fadiga de aços, comprimento de fibras de algodão, estatura de homens adultos, entre outras. (WEIBULL, 1951, *apud* HAVIARAS, 2005)

O modelo de Weibull é amplamente utilizado para descrever o tempo de vida de sistemas formados por vários componentes cuja falha ocorre quando um primeiro componente falhar, ou ainda como “uma corrente que falha como um todo se um de seus elos falhar” (WEIBULL, 1951, *apud* HAVIARAS, 2005)

Outro motivo pela preferência por este modelo em aplicações práticas, é o fato da distribuição de Weibull ser bastante flexível na descrição de processos aleatórios e permitir grande variedade de formas, sendo que todas apresentam uma propriedade básica, que é a função de taxa de falha monotônica, podendo ser decrescente constante ou crescente, sendo a única distribuição de probabilidade, dentre as analisadas, que pode ser utilizada na descrição de processos que correspondem aos três períodos da curva da banheira. (WEIBULL, 1951, *apud* HAVIARAS, 2005)

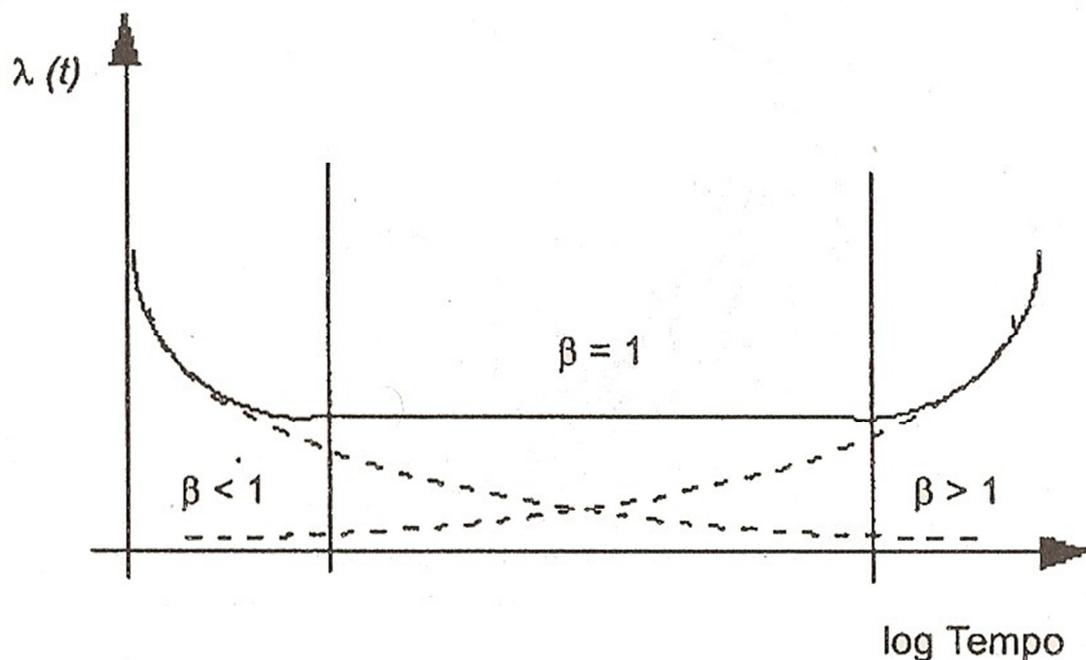


FIGURA 24 – RELAÇÃO DO PARÂMETRO DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL COM AS FASES DA CURVA DA BANHEIRA  
 FONTE: LAFRAIA (2001)

Freitas e Colosimo (1997) afirmam que a distribuição Weibull foi proposta inicialmente para aplicação em estudos relacionados ao tempo de falha devido a fadiga de metais, sendo empregada com frequência na descrição de tempo de vida de produtos industriais. Esta distribuição também pode ser usada para descrever o tempo de vida de produtos compostos de várias partes que falham quando a primeira parte falhar. A distribuição Weibull é adequadamente empregada na análise de vida de vida de mancais, componentes eletrônicos, cerâmicas, capacitores e dielétricos.

De acordo com Lafraia (2001) a distribuição Weibull tem três parâmetros que podem ser utilizados para determinar a probabilidade de falha, a confiabilidade e a função de risco.

A distribuição de falhas é dada pela função de densidade da distribuição Weibull a partir da expressão:

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta^\beta}\right) (t - t_0)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta}, \text{ para } t \geq 0 \quad (56)$$

A probabilidade acumulada de falhas é dada pela fórmula adiante:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (57)$$

Tanto o parâmetro de forma  $\beta$  como o de escala  $\eta$  sendo que este apresenta a mesma unidade de  $t$  enquanto  $\beta$  é adimensional.

Função Distribuição da Variável Aleatória Weibull

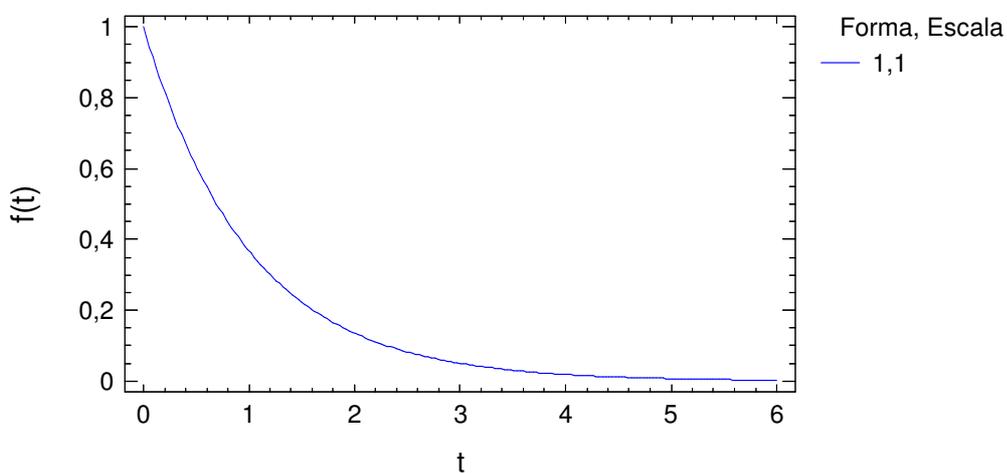


FIGURA 25 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DENSIDADE DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL  
 FONTE: O autor (2011)

### Função Distribuição Acumulada da Variável Aleatória Weibull

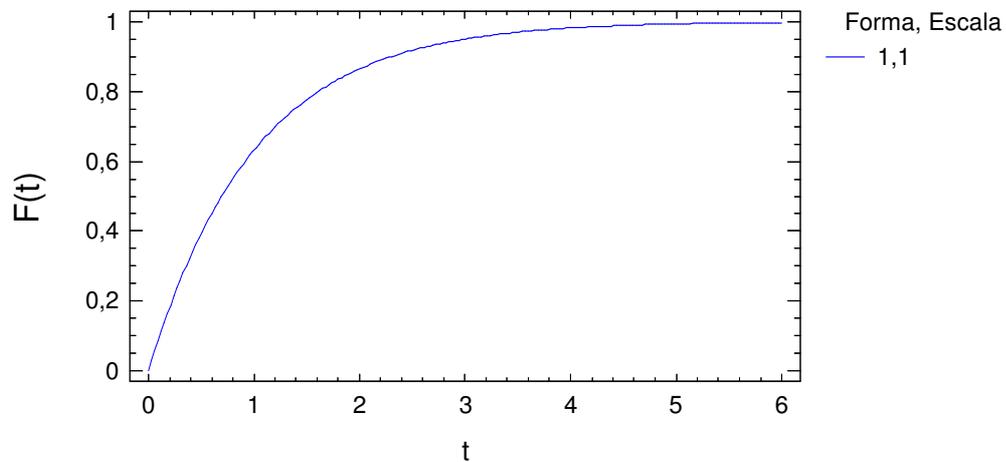


FIGURA 26 – GRÁFICO DA PROBABILIDADE ACUMULADA DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL  
 FONTE: O autor (2011)

Observa-se na representação gráfica da distribuição Weibull, que:

- para valores de  $\beta < 1$  a função densidade de probabilidade é decrescente para um aumento de magnitude de  $t$ ;
- para valores de  $\beta = 1$  a distribuição de Weibull é a própria distribuição exponencial;
- para valores de  $\beta > 1$  a curva da função densidade de probabilidade apresenta picos bem definidos;
- para valores de  $\beta = 3,44$  a distribuição de Weibull aproxima-se da distribuição normal (mediana=média).

A função de confiabilidade é dada por:

$$R(t) = e^{\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right]} \quad (58)$$

### Função de Confiabilidade da Variável Aleatória Weibull

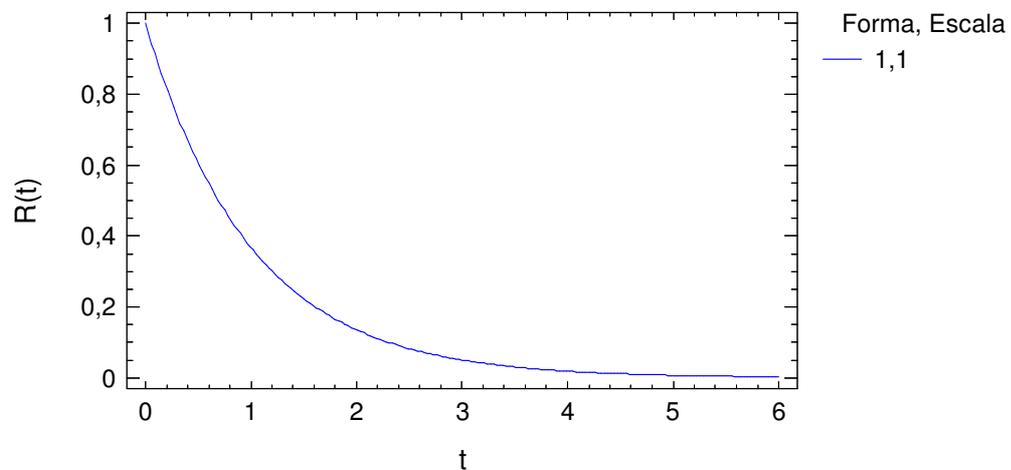


FIGURA 27 – GRÁFICO DA FUNÇÃO CONFIABILIDADE DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL  
FONTE: O autor (2011)

A taxa de falhas instantânea é dada pela função de risco que tem a seguinte fórmula:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - t_0}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (59)$$

### Função Risco Acumulado da Variável Aleatória Weibull

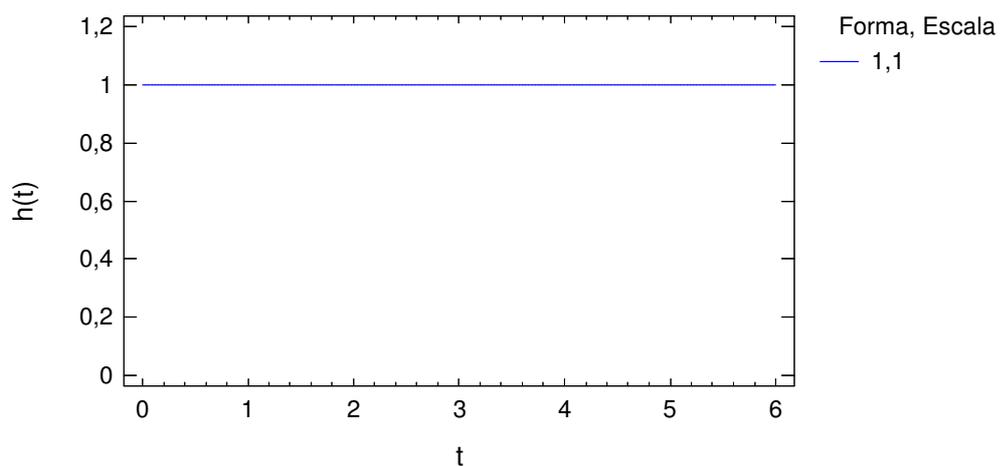


FIGURA 28 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DE RISCO DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL  
FONTE: O autor (2011)

Lafraia (2001) estabelece que de acordo com o parâmetro de forma da distribuição Weibull ( $\beta$ ) a função taxa de falhas assume comportamentos diferentes, a tabela 6, adiante, descreve estes comportamento da função de acordo com o valor de  $\beta$ .

TABELA 6 – COMPORTAMENTO DA FUNÇÃO TAXA DE FALHAS COM O VALOR DE  $\beta$

Valor de $\beta$	Comportamento da Função de Taxa de Falhas
< 1	Taxa de falha crescente com o tempo – fase de mortalidade infantil
= 1	Taxa de falha constante – falhas aleatórias – função exponencial
> 1	Taxa de falha crescente com o tempo
= 2	Taxa de falha linearmente crescente
> 2	Taxa de falha cresce a uma taxa proporcional à potência (-1); distribuição de frequência tornando-se mais simétrica com o crescimento de $\beta$ .
= 3,2	Distribuição de frequência aproxima-se da distribuição normal, tornando-se menos dispersa à medida que $\beta$ cresce.

FONTE: LAFRAIA (2001)

Lafraia (2001) fornece uma interpretação física para os parâmetros da distribuição Weibull que podem ser vistos na tabela 7, a seguir:

TABELA 7 – INTERPRETAÇÃO FÍSICA SOBRE OS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL

$t_0$	$\beta$	Significado
=0		Não há confiabilidade intrínseca. Significa que em $t=0$ a probabilidade de falha é 0
	< 1	Taxa de falhas decrescente, possivelmente devida a baixos coeficientes de segurança na carga
	= 1	Taxa de falhas constante, falhas de origem aleatórias
	> 1	Taxa de falhas crescente, desgaste iniciando logo que o componente entre em serviço
>0		Há período de garantia, durante o qual não ocorre falha. O componente possui confiabilidade intrínseca
	< 1	Desgaste do tipo fadiga ou similar
	$\cong 0,5$	Fadiga de baixo ciclo
	$\cong 0,8$	Fadiga de alto ciclo
	> 1	Desgaste do tipo erosão
< 0		Há vida de prateleira, o componente pode falhar antes de ser usado
	< 1	Desgaste do tipo fadiga, iniciado antes do componente entrar em serviço
	> 1	Desgaste devido à contínua redução da resistência

FONTE: LAFRAIA (2001)

### 2.23.6 Distribuição Log-normal de Probabilidade

Segundo Lafraia (2001) a distribuição log-normal tem mais versatilidade do que a distribuição normal pelo fato de sua forma ser mais variada o que possibilita melhor ajuste da população e não apresenta possibilidade de resultar valores negativos.

De acordo com Freitas (1997) a distribuição log-normal é utilizada para caracterizar tempo de vida de produtos e materiais, e é a que melhor descreve os mecanismos de falha por fadiga em materiais e os tempos de vida de componentes semi condutores com mecanismos de falha que envolvem interações químicas tais como as existentes em processos de corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas, degradação de contatos, entre outros. É bastante empregada em casos onde há um aumento do distanciamento entre os valores dos dados experimentais à medida que a magnitude dos mesmos aumenta.

A função de densidade de probabilidade para uma distribuição log-normal é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi t}\sigma} \exp\left\{-\frac{[\ln(t) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (60)$$

Onde:

$\mu$  é a média do logaritmo do tempo de falha,

$$\mu \in \mathbb{R}$$

$\sigma$  é o desvio-padrão no domínio logarítmico,  $\sigma \in \mathbb{R}_+$

Adiante é apresentado o gráfico que ilustra a forma geral da função de densidade de probabilidade para uma distribuição log-normal.

### Função Distribuição da Variável Aleatória Log-normal

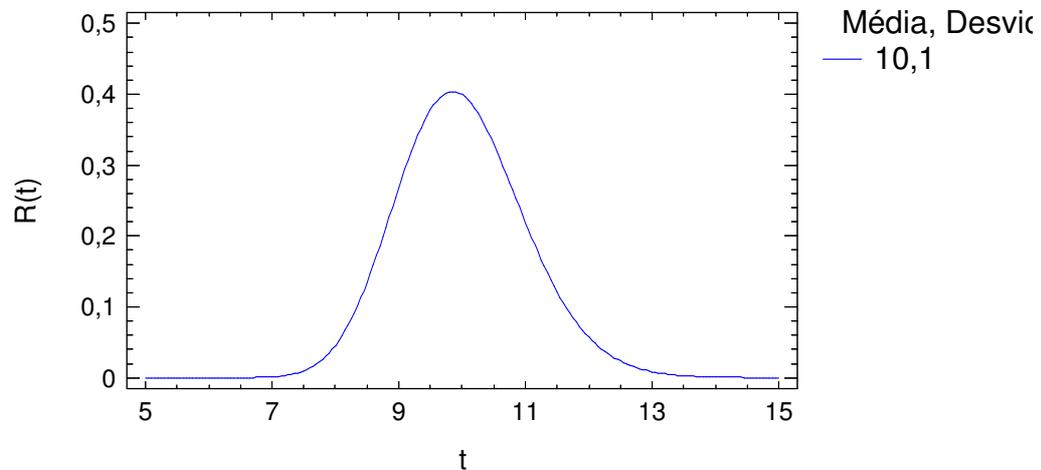


FIGURA 29 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DENSIDADE DA DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL  
 FONTE: O autor (2011)

De acordo com Lafraia (2001) a distribuição log-normal é a distribuição normal tendo como variável independente  $\ln(t)$  e a média e desvio padrão dados, respectivamente, por:

$$\mu = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (61)$$

$$\sigma = \sqrt{e^{(2\mu + 2\sigma^2)} - e^{(2\mu + \sigma^2)}} \quad (62)$$

A distribuição log normal tem como probabilidade acumulada de falha a seguinte expressão:

$$F(t) = \Phi\left\{\frac{[\ln(t) - \mu]}{\sigma}\right\} \quad (63)$$

Na expressão  $\Phi(\cdot)$  é a função da distribuição acumulada de uma distribuição normal padrão, ou seja, de uma normal com média igual a zero e desvio-padrão igual a um.

### Função Distribuição Acumulada da Variável Aleatória Log-normal

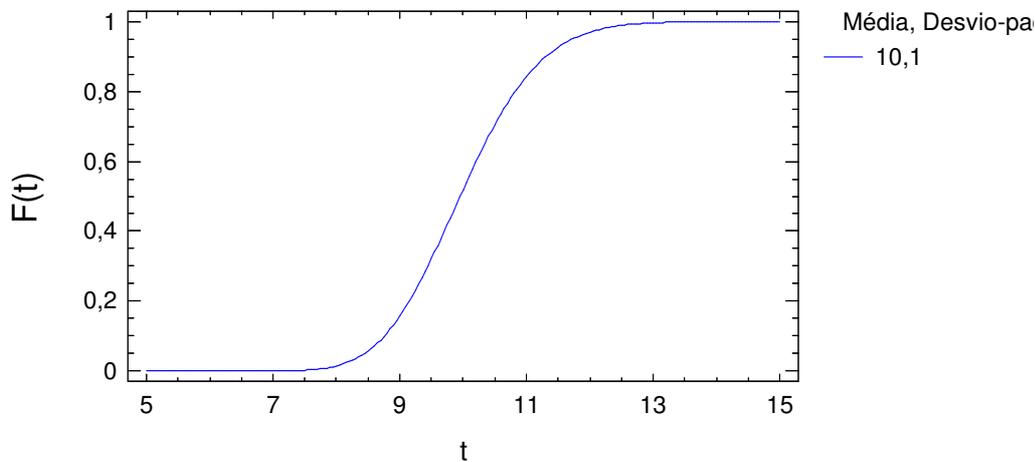


FIGURA 30 – GRÁFICO DA FUNÇÃO PROBABILIDADE ACUMULADA DA DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL

FONTE: O autor (2011)

Segundo Freitas (1997) a relação entre as distribuições log-normal e normal facilita a apresentação e análise de dados provenientes da distribuição. O logaritmo natural de uma variável com distribuição log-normal com parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  tem uma distribuição normal com média  $\mu$  e desvio-padrão  $\sigma$ . Esta relação significa que dados provenientes de uma distribuição log-normal podem ser analisados através da distribuição normal se for utilizado o logaritmo natural dos dados ao invés de seus valores originais.

A confiabilidade de uma variável log-normal é dada pela expressão:

$$R(t) = 1 - \Phi \left[ \frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right] \quad (64)$$

A função de risco para a distribuição log normal tem a expressão apresentada a seguir:

$$\lambda(t) = \frac{0,4343}{t\sigma} \cdot \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}}}{1 - \Phi \left( \frac{\ln(t) - \mu}{\sigma} \right)} \quad (65)$$

### Função de Confiabilidade da Variável Aleatória Log-normal

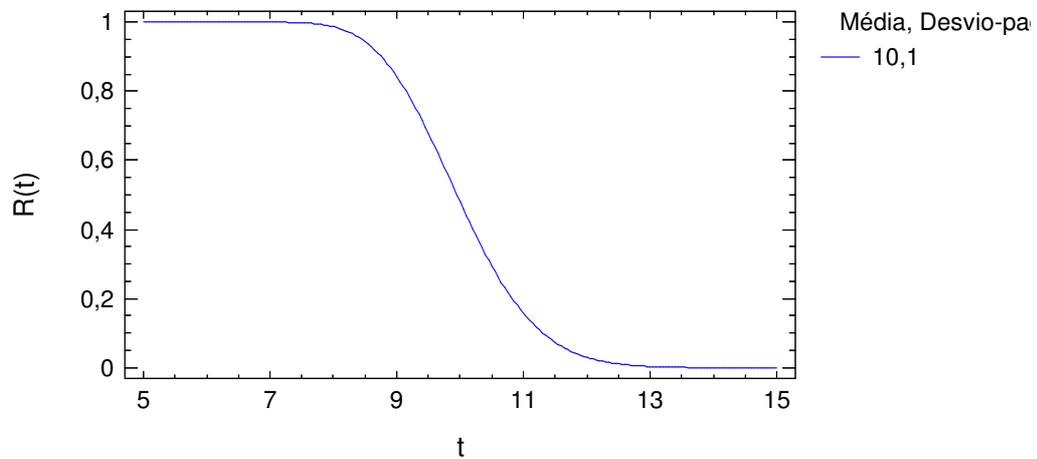


FIGURA 31 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE DA DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL  
 FONTE: O autor (2011)

### Função Risco Acumulado da Variável Aleatória Log-normal

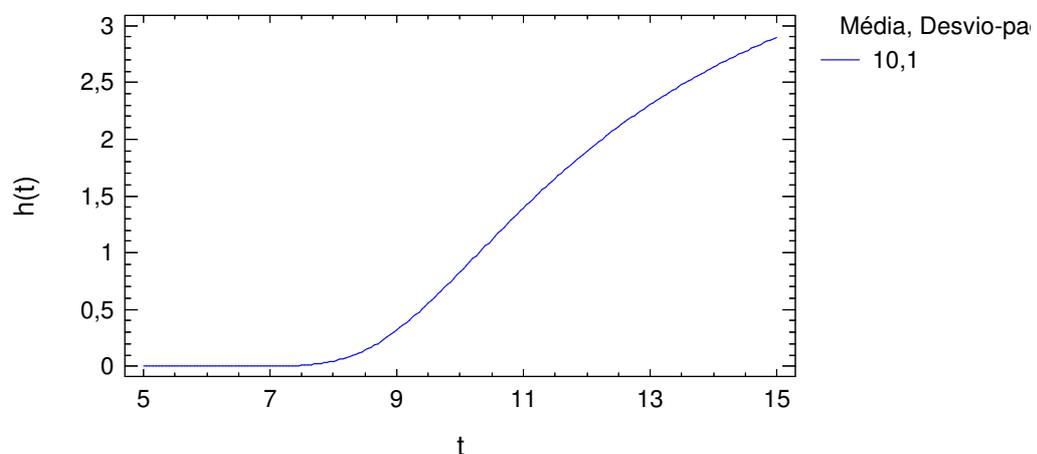


FIGURA 32 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DE RISCO DA DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL  
 FONTE: O autor (2011)

Lafraia (2001) defende que a distribuição log normal tem aplicação na determinação dos ciclos para a falha resultante de fadiga de metais e componentes metálicos que são submetidos a tensões alternadas em nível acentuadamente menor que o de limite de resistência do metal.

## 2.24 Modelos Para Dados Acelerados de Falha

Os dados acelerados de falha são relacionados com medidas de confiabilidade. E, sob condições normais de operação, podem ser usados três tipos de modelos para os dados: modelos estatísticos (paramétricos), modelos físico-estatísticos, modelos físico-experimentais.

### 2.24.1 Suposições Comuns aos Modelos Para Dados Acelerados de Falha

Se a distribuição dos tempos até falha em condições de alto estresse for conhecida assim como se o fator de aceleração ( $A_F$ ) também, então é possível derivar matematicamente as distribuições dos tempos até falha em condições normais de operação, supõe-se que o fator de aceleração é constante e linear.

Denominando por:

0 índice que indica condições normais de operação

s índice que indica condições aceleradas de operação

São estabelecidas as seguintes relações:

$$TTF_0 \rightarrow TTF_s \quad t_0 = A_F \cdot x t_s \quad (66)$$

$$CDF_0 \rightarrow CDF_s \quad F_0(t) = F_s\left(\frac{t}{A_F}\right) \quad (67)$$

$$PDF_0 \rightarrow PDF_s \quad f_0(t) = \left(\frac{1}{A_F}\right) f_s\left(\frac{t}{A_F}\right) \quad (68)$$

$$h_0(t) \rightarrow h_s(t) \quad h_0(t) = \frac{f_0(t)}{1 - F_0(t)} = \frac{\left(\frac{1}{A_F}\right) f_s\left(\frac{1}{A_F}\right)}{1 - F_s\left(\frac{1}{A_F}\right)} \quad (69)$$

$$h_0(t) = \left( \frac{1}{A_F} \right) h_S \left( \frac{1}{A_F} \right) \quad (70)$$

#### 2.24.1.1 Modelos Estatísticos de Aceleração

Os Modelos Estatísticos são usados quando a relação entre o estresse aplicado e o tempo-até-falha (TTF) do produto não pode ser descrito por modelos físicos ou químicos. Neste caso supõe-se uma relação linear entre os tempos-até-falha em diferentes níveis de *stress*, a probabilidade de falha dos TTF é a mesma em todos os níveis de *stress*, o parâmetro de escala das distribuições varia para os diversos níveis de estresse o parâmetro de forma permanece constante. São os seguintes os Modelos Estatísticos de Aceleração:

- Modelo Exponencial
- Modelo Weibull

### 2.25 Distribuições de Valores Extremos

Uma das informações de interesse em Confiabilidade, muitas vezes, são os valores extremos que levam á falha dos produtos. A adoção do modelo que faz a aproximação de tais valores extremos pelos valores da função que representa a maioria dos valores da população não é um bom modelo para os valores extremos. As funções para valores extremos são obtidas através do tratamento dos maiores ou menores valores encontrados numa série de amostras. A distribuição dos valores extremos pode ser de três tipos. A distribuição Tipo I é a distribuição de Gumbel, também conhecida como extremo valor. A distribuição Tipo II é conhecida como distribuição de extremo valor logarítmico e a distribuição Tipo III é a distribuição de Weibull utilizada para extremos valores mínimos. (LAFRAIA, 2001)

#### 2.25.1 Distribuição Gumbel (extremo valor)

Esta distribuição para valores máximos e mínimos é o modelo para as caudas esquerda e direita de distribuições do tipo exponencial. As distribuições do tipo exponencial são definidas como distribuições com probabilidade

acumulada próxima de 1 com taxa igual ou maior do que a taxa da distribuição exponencial. Neste caso figuram as distribuições normais, log-normais e exponenciais. (LAFRAIA, 2001)

As funções densidade de probabilidade são as seguintes.

Para valores máximos:

$$f_{max}(x) = \frac{1}{\sigma} e^{\left\{ \frac{1}{\sigma}(x-\mu) - e^{\left[ -\frac{1}{\sigma}(x-\mu) \right]} \right\}} \quad (71)$$

Para valores mínimos:

$$f_{min}(x) = \frac{1}{\sigma} e^{\left\{ \frac{1}{\sigma}(x-\mu) - e^{\left[ -\frac{1}{\sigma}(x-\mu) \right]} \right\}} \quad (72)$$

Para obter uma expressão mais simples é possível introduzir uma variável reduzida y definida da seguinte forma:

$$y = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (73)$$

Esta variável pode ser substituída nas funções densidade de probabilidade obtendo a expressão destas para valores máximos e mínimos, respectivamente:

$$F_{max} = e^{-e^{-y}} \quad (74)$$

$$F_{min} = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (75)$$

A distribuição de valor máximo é desviada para a direita e a distribuição de valor mínimo é desviada para a esquerda. A função de risco máximo valor tende para a unidade com o aumento de x, enquanto a distribuição de mínimo valor cresce exponencialmente. (LAFRAIA, 2001).

Para esta distribuição os valores de  $\mu$  e de  $\sigma$  não são exatamente a média e o desvio padrão, apesar de representarem parâmetros de escala e posição. De acordo com Lafraia (2001)  $\mu$  é a moda da distribuição, sendo que a média para valores máximos é  $\mu + 0,577\sigma$  e para valores mínimos é

$\mu - 0,577\sigma$  . Para ambos os valores, máximos e mínimos, o desvio padrão utilizado é  $1,283\sigma$  . A equação para confiabilidade é:

(76)

A equação para a taxa de falhas é:

(77)

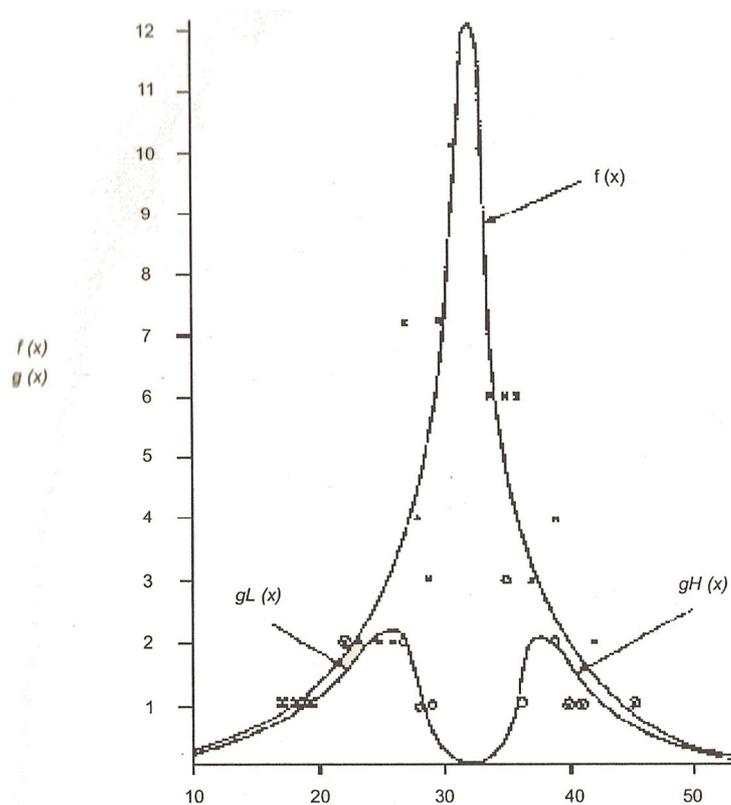


FIGURA 33 – DISTRIBUIÇÃO DE VALOR EXTREMO  
 FONTE: Lafraia (2001)

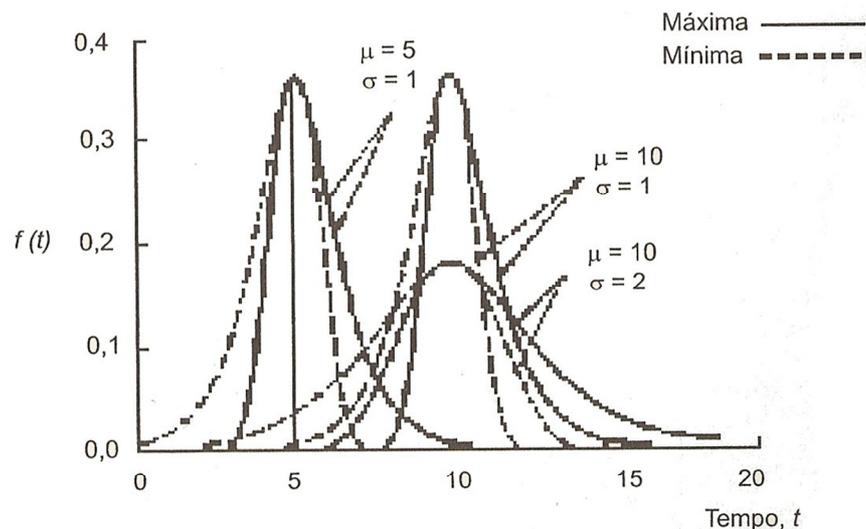


FIGURA 34 – FUNÇÃO DISTRIBUIÇÃO DE EXTREMO VALOR COM MÁXIMOS E MÍNIMOS E RESPECTIVOS PARÂMETROS  
 FONTE: LAFRAIA (2001)

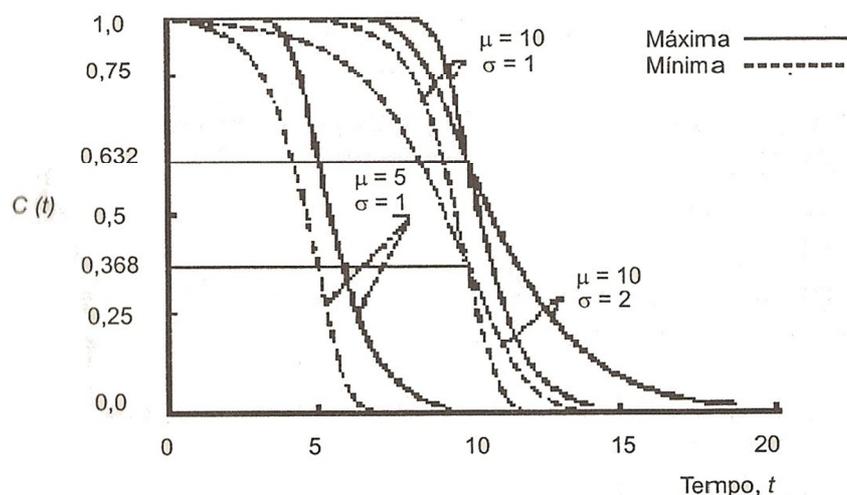


FIGURA 35 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE DE UMA DISTRIBUIÇÃO DE EXTREMO VALOR DE MÁXIMOS E MÍNIMOS  
 FONTE: LAFRAIA (2001)

### 2.25.2 Distribuição de Extremo Valor Logaritmico

Segundo Lafraia (2001) esta não é uma distribuição muito importante. Se o logaritmo dos valores são distribuídos na forma de extremos então a variável é descrita pela distribuição de extremo valor logaritmico. Esta distribuição tem com a distribuição Gumbel uma relação análoga à das distribuições log-normal e normal. Esta distribuição para valores máximos é apropriada para modelar ocorrência de cargas não limitadas pela direita, ou

seja: quando não exista uma carga limite. A distribuição para valores mínimos se apresenta como apropriada para modelagem de situações em que as imperfeições dos materiais provocam uma redução acentuada na resistência dos materiais quando a carga se aproxima do limite.

### 2.25.3 Distribuição Weibull

Segundo Lafraia (2001) a distribuição de Weibull foi desenvolvida empiricamente para descrever a distribuição de resistência de materiais e tem apresentado bons resultados práticos quando usada como função de valor extremo. O uso desta distribuição é justificado devido à não detecção de pequenas imperfeições nas inspeções de controles de processo. Esta distribuição pode ser utilizada nos casos de produção contínua onde não existe inspeção total e com defeitos não limitados. Esta distribuição está descrita no item 2.23.5

## 2.26 Testes Acelerados de Confiabilidade

Chaves Neto (2005) afirma que atualmente as indústrias para se manterem em mercados altamente competitivos precisam planejar e desenvolver produtos novos para atender às expectativas cada vez maiores dos consumidores. Isto pode ser conseguido a partir da aplicação de tecnologias mais avançadas e através da manutenção dos esforços de melhoria da produtividade e da confiabilidade.

Os dados para a Análise de Tempo de Falha são informações sobre o desempenho do produto e se originam de informações de campo ou de testes realizados em protótipos. Os dados relativos a informações de campo não são de fácil obtenção, eles podem ser originados a partir dos serviços autorizados de assistência técnica, porém a obtenção dos mesmos pode se tornar inviável após o prazo de garantia, pois o consumidor pode optar por outros serviços de assistência técnica que não repassem informações para os fabricantes. Ainda, para produtos novos, estes dados não estão disponíveis sendo necessário, em alguns casos, utilizar informação disponível para produtos similares que já se encontram no mercado. Existe ainda a possibilidade de serem efetuados testes de mercado nos quais uma quantidade de produtos é fornecida a uma amostra de consumidores e seu desempenho em condições reais de uso é observado

durante um período de tempo. O teste de mercado apresenta como inconveniente o fato de que um produto é projetado para funcionar por muito tempo, o que torna demorado acompanhar o desempenho deste produto junto aos consumidores. (FREITAS; COLOSIMO, 1997)

De acordo com Chaves Neto (2005) o procedimento para obtenção de informações acerca do desempenho de um produto é fazer a obtenção de dados experimentais através de testes acelerados de confiabilidade realizados em laboratório.

Testes Acelerados de Confiabilidade consistem na colocação de uma quantidade de componentes/sistemas submetidos a funcionamento em condições de estresse maiores do que aquelas para as quais foram projetados com a finalidade de acelerar o aparecimento de falhas. A realização destes testes se justifica pelo fato de fornecerem dados mais rapidamente para a análise estatística e propiciando contribuições para conhecimento das falhas, contribuindo para a revisão do projeto. Face às exigências atuais que os fabricantes enfrentam no desenvolvimento de novos produtos as informações de confiabilidade devem ser obtidas rapidamente para a construção de novos projetos e também na melhoria dos já realizados. (FREITAS; COLOSIMO, 1997)

Chaves Neto (2005) propõe as seguintes questões que devem ser respondidas no caso dos testes acelerados de confiabilidade:

- quais variáveis de estresse que serão utilizadas?
- quais níveis de estresse que serão utilizados?
- qual a forma de aplicação do estresse?

De acordo com Freitas (1997) os testes acelerados podem ser divididos em dois tipos conforme a característica dos dados coletados em cada um. São estes tipos os testes de vida acelerados e os testes de degradação acelerados.

Nos testes de vida acelerados o tipo de dado obtido é o “tempo até a ocorrência da falha”, através deste teste é possível estimar o tempo médio até a falha e a função de confiabilidade  $R(t)$  e a função taxa de falha. Segundo Chaves Neto (2005) os resultados obtidos com estes testes podem ser

extrapolados para as condições normais de uso por meio de uma equação de regressão. Os testes de degradação acelerados fornecem como resposta uma medida de performance do produto obtida ao longo do tempo, a informação obtida por este teste é utilizada para estimar a distribuição do tempo de vida do produto.

Na concepção de Nelson (1990) os tipos de testes de aceleração são taxa elevada de utilização (*high usage rate*), aumento do estresse (*overstress*), degradação (*degradation*) e modelo do produto (*specimen design*).

A informação obtida pelos Testes Acelerados de Confiabilidade será utilizada para prever o funcionamento do produto mediante condições normais de operação.

A informação é composta pelas variáveis de *estresse* a serem usadas dependendo do tipo de produto, pelas variáveis comuns como temperatura, pressão, voltagem, carga e vibração. (NELSON, 1990)

### 2.26.1 Objetivos

De acordo com Freitas (1997) os testes de vida acelerado podem ser realizados com diversos objetivos, tais como: projeto, fabricação, marketing, serviço de assistência técnica. Contudo estes objetivos devem ser claramente definidos para serem determinadas ações que devem ser observadas no planejamento e execução do teste entre os quais, geralmente, se incluem:

- medidas de confiabilidade: para determinar a fabricação ou uso de um produto, estimar custos de garantia, taxas de falha, tempo médio até a falha;
- garantia da qualidade: efetuar o monitoramento da confiabilidade do produto, execução de ações de manutenção quando da ocorrência de novos modos de falha ou degradação da performance;
- falhas de projeto: utilizar estratégias de redundância e uso de melhores componentes para eliminar ou reduzir as falhas de projeto;

- *burn in*: eliminação de falhas que aparecem na fase inicial da vida útil do produto.

Quando da execução do teste devem ser corretamente especificados elementos que assegurem a máxima informação sobre o produto ou o menor tempo de duração e custo do teste. Estes elementos dizem respeito à forma do teste e ao plano experimental para sua realização. (FREITAS; COLOSIMO, 1997)

Em relação à forma do testes devem ser determinados: a escolha da medida de performance, as condições de teste, quanta e quais variáveis de estresse serão apuradas, quais as formas de aplicação do estresse e os mecanismos de censura. Estes elementos são, em geral, determinados pelas condições da empresa e as normas técnicas apropriadas. (FREITAS; COLOSIMO, 1997)

A elaboração do plano experimental deve considerar elementos quantitativos, tais como: a quantidade de níveis da variável de estresse, a proporção de teste a ser utilizada em cada item bem como a determinação destes níveis de estresse e o tamanho da amostra. (FREITAS; COLOSIMO, 1997)

#### 2.26.2 Variáveis de Estresse

Para Freitas (1997) uma variável de estresse é aquela que será avaliada em condições diferentes daquelas para a qual seu uso foi projetado. Em geral isto ocorre em níveis mais altos do que os projetados visando reduzir o tempo até a falha.

Chaves Neto (2005) relaciona um conjunto de materiais, a medida mais comum de desempenho dos mesmos e o fator de estresse.

TABELA 8 – MEDIDAS DE DESEMPENHO E FATOR DE ESTRESSE

<b>Material</b>	<b>Medida de Desempenho</b>	<b>Fator de Estresse</b>
Metais	Presença de trinca, corrosão, oxidação	Temperatura, umidade, salinidade
Isolamentos térmicos, elétricos ou sonoros	Tempo até a falha, alongamento	Temperatura, voltagem, vibração
Alimentos e drogas	Tempo de estocagem, pH, reações químicas específicas	Temperatura, umidade, radiação solar
Plásticos	Propriedades mecânicas, firmeza da cor	Temperatura, vibração, choque
Semicondutores e componentes microeletrônicos	Tempo até a falha e características de operação	Temperatura, corrente elétrica, voltagem, umidade, pressão
Capacitores	Tempo até a falha	Temperatura, voltagem, vibração
Resistores	Tempo até a falha	Temperatura, voltagem, vibração
Contatos Elétricos	Corrosão, tempo até a falha	Temperatura, umidade e corrente elétrica
Lâmpadas	Luminosidade, tempo até a falha	Voltagem, temperatura, choque mecânico

FONTE: Adaptado de CHAVES NETO (2005)

### 2.26.3 Aumento do Estresse

De acordo com Freitas (1997) a aceleração de um teste a níveis mais altos pode ser feita de duas formas: aceleração por alta taxa de uso e aceleração por altos níveis de estresse. A forma de aceleração depende do tipo da variável de estresse desejado. No caso de aceleração por alta taxa de uso a variável de interesse é o uso sendo o aumento do estresse causado pelo aumento da velocidade com que o produto opera ou pela redução do tempo de descanso. Para a aceleração por altos níveis de estresse o produto deve ser submetido a níveis maiores das variáveis de estresse diminuindo o tempo de vida ou degradando a performance do produto mais rapidamente.

O aumento do estresse consiste em usar o produto a um nível superior que o normal para encurtar sua vida útil ou degradar mais rapidamente seu desempenho. As formas típicas de aumento do estresse envolvem temperatura, voltagem, carga, ciclos térmicos, umidade e vibração. Neste tipo

de teste podem ocorrer censuras que são produtos que não falham até o final do teste. (NELSON, 1990).

Uma forma simples de acelerar a vida de alguns muitos produtos é utilizá-los a uma taxa maior do que a usual, por exemplo, aumentando, durante o teste, a velocidade com que são usualmente utilizados. Outros produtos ficam desligados uma parte do tempo em seu uso normal, para estes casos pode-se efetuar a aceleração usando os mesmos durante mais tempo. Este tipo de teste é conduzido com o propósito de estimar a distribuição da vida em taxas normais de utilização. É assumido que o número de vezes que o produto é utilizado até falhar é o mesmo que será verificado quando o produto estiver em condições normais de uso e os dados provenientes do teste são considerados como se fossem de situações reais. Estes dados de vida poderão fornecer estimativas da porcentagem de ocorrência de falha durante o prazo de garantia, a vida mediana do produto, entre outros. Através destes dados podem ser comparados projetos, métodos de fabricação, materiais e fornecedores. Devem ser tomados cuidados especiais para que os dados oriundos dos testes possam ser considerados como originários de sua operação normal. Tais cuidados implicam em deixar vários aspectos iguais às condições normais de uso, exceto a taxa de utilização, a não observação destas práticas pode levar ao aparecimento de falhas que não ocorreriam sob condições normais de uso. (NELSON, 1990)

#### 2.26.4 Degradação

Neste tipo de teste ao invés de observar o tempo de vida do produto é observada a degradação da performance do mesmo durante o tempo. Um modelo para a degradação da performance é ajustado aos dados e usados para prever a performance e tempo de vida dos produtos, assim a falha e a distribuição de vida podem ser preditas antes do item falhar. A falha é considerada como uma performance abaixo de um valor especificado.

#### 2.26.5 Modelo do Produto

O tempo de vida de alguns produtos pode ser acelerado através do tamanho, forma geométrica e finalidade dos mesmos. Em relação ao tamanho, geralmente, itens maiores falham mais cedo do que itens menores. Em geral se

deseja conhecer o tempo de vida de itens de tamanho maior ou menor, o tamanho da amostra em observação interfere na construção do modelo para estudo.

### 2.26.6 Forma de Aplicação do Teste Acelerado de Confiabilidade

Um Teste Acelerado de Confiabilidade pode ser aplicado a  $m$  variáveis, cada uma atuando em  $n$  níveis. Um Teste Acelerado de Confiabilidade pode ser conduzido através da forma constante, da forma escada (*step stress*), da forma progressiva, da forma cíclica, da forma aleatória

#### 2.26.6.1 Forma constante

De acordo com Nelson (1990) esta é a forma mais comum na qual cada unidade é submetida a um nível constante de estresse, conforme figura 36, nesta forma de aplicação do teste os dados referentes ao desempenho do produto são descritos em uma linha horizontal até falharem, quando registra-se o tempo da falha, um nível que não tenha falhas é representado por uma linha contínua com uma seta a direita. Para Freitas (1997) é necessário usar vários níveis de estresse para que se possa fazer “alguma modelagem dos dados obtidos”, entretanto quando fixado o nível de estresse para uma unidade do produto este ficará submetida a este nível até o final do teste. Esta forma de aplicação de teste apresenta como vantagens a simplicidade na realização do teste e o uso de modelos simples para análise dos resultados.

A condução deste tipo de teste de aceleração é indicada quando o experimento envolve vários níveis de estresse ( $s^{(0)} < s^{(1)} < \dots < s^{(k)}$ ), o nível  $s^{(0)}$  corresponde ao estresse *normal* (não acelerado), dispõe-se de inúmeras unidades de testes, uma quantidade específica é submetida a cada nível de *stress*, o nível de estresse é escolhido aleatoriamente, as unidades de teste são submetidas à inspeção: determina-se o número de falhas que se deseja observar no teste, o tempo até a falha é estocástico (podendo ser muito longo), o teste é interrompido após a ocorrência do número definido de falhas, o teste é repetido para todos os níveis de *stress*.

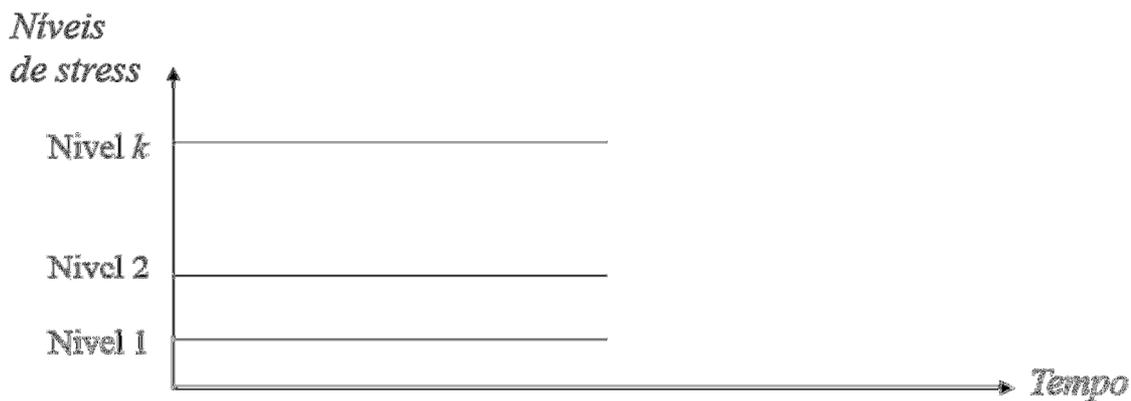


FIGURA 36 – ESTRESSE CONSTANTE  
 FONTE: FREITAS; COLOSIMO (1997)

#### 2.26.6.2 Forma escada (*step stress*)

Nesta forma de condução do teste um produto é sujeito sucessivamente a níveis mais altos de estresse. De acordo com Nelson (1990) o produto é sujeito inicialmente a um estresse constante por um período de tempo, se não ocorrerem falhas o nível de estresse é aumentado e permanece neste nível por um período de tempo. O estresse é aumentado gradativamente até que a falha ocorra. Normalmente todos os produtos irão passar pelos mesmos níveis de estresse e intervalos de tempo, algumas vezes são aplicados padrões diferentes para produtos diferenciados. Para Freitas (1997) este tipo de teste traz como vantagem a rápida ocorrência de falhas. Porém traz desvantagem na estimação das medidas de confiabilidade visto que em condições reais de uso a maioria dos produtos está sujeita a esforços aproximadamente constantes, e neste tipo de teste os modos de falha normalmente ocorrem nos níveis mais altos de estresse, assim é necessário levar em consideração os efeitos cumulativos da exposição a estresses sucessivos quando da concepção do modelo que tem uma complexidade maior do que aquele usado para estresse constante.

O teste de aceleração em forma escada é aplicado a vários itens simultaneamente, sendo todas as unidades acionadas ao mesmo tempo. Verifica-se o tempo até a falha de cada unidade quando submetida a cada um dos níveis de estresse  $s^{(j)}$ , após a ocorrência da falha passa-se ao nível de estresse  $s^{(j+1)}$  e continua-se o teste até que todas as unidades tenham falhado.

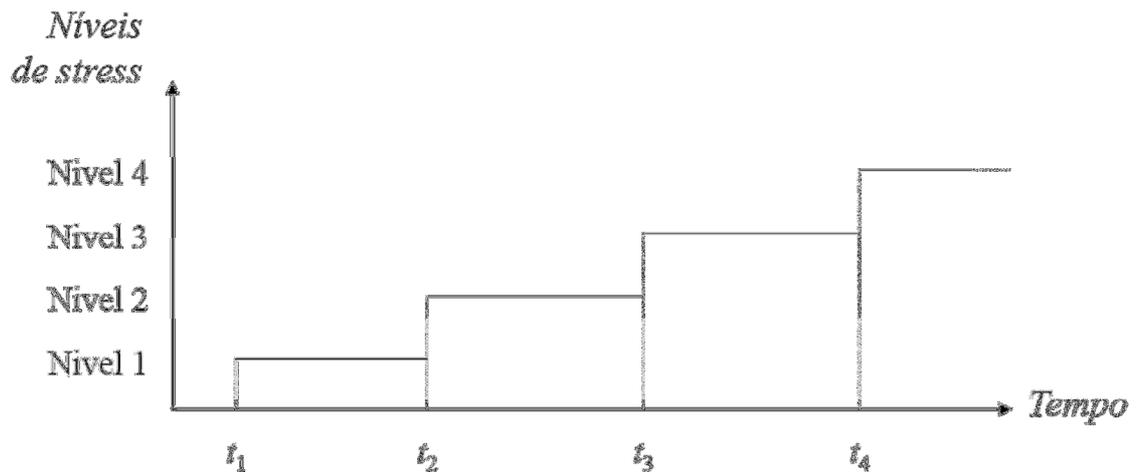


FIGURA 37 – ESTRESSE NA FORMA ESCADA  
 FONTE: FREITAS; COLOSIMO (1997)

### 2.26.6.3 Forma progressiva

Nesta forma de condução do teste de aceleração um produto sofre um aumento contínuo do nível de estresse. Segundo Nelson (1990) esta forma difere da forma escada pelo fato do aumento do nível de estresse ser contínuo enquanto na forma escada este aumento é feito em patamares. De acordo com Freitas (1997) este tipo de teste apresenta como desvantagem a dificuldade de controlar o aumento progressivo do nível de estresse, ainda pode ocorrer a censura de alguns dados de vida.

De acordo com Nelson (1990) o teste de aceleração na forma constante é preferível ao teste progressivo quando se quer estimar a confiabilidade.

A realização da forma progressiva é feita com todas as unidades de teste expostas à um nível de estresse que cresce até que todas as unidades tenham falhado seguindo uma função de estresse  $s(t)$  conhecida.

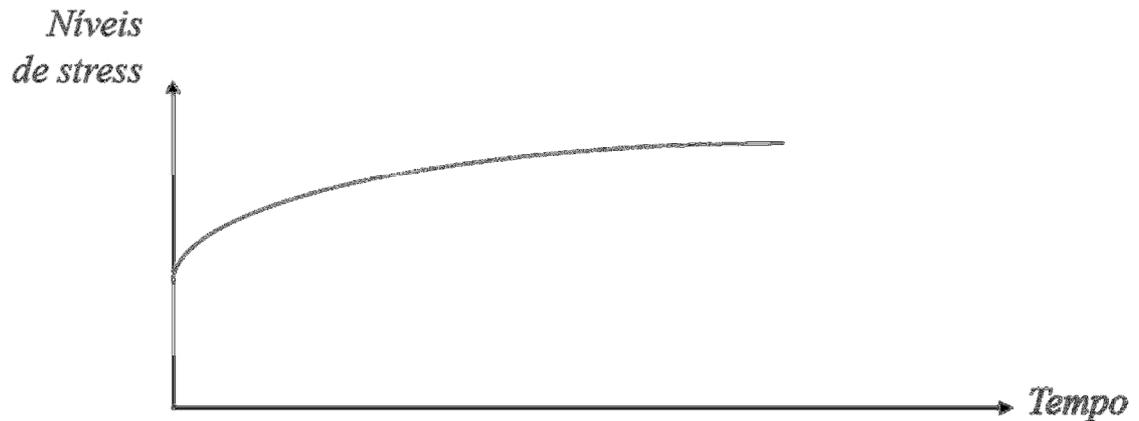


FIGURA 38 – ESTRESSE NA FORMA PROGRESSIVA  
 FONTE: FREITAS; COLOSIMO (1997)

#### 2.26.6.4 Forma cíclica

Na forma cíclica, de acordo com Freitas (1997), cada unidade sofre níveis altos e baixos de estresse. Segundo Nelson (1990) para alguns produtos a figura que a transcrição gráfica do teste forma é uma senóide. Os testes repetem para cada produto os mesmos padrões de alto nível de estresse.

#### 2.26.6.5 Forma aleatória

De acordo com Freitas (1997) alguns produtos são submetidos a níveis de estresse que se alteram aleatoriamente. Neste tipo de teste os níveis de estresse são aplicados seguindo uma distribuição mais próxima possível da realidade quando submetidas a níveis mais altos de estresse.

#### 2.26.7 Modelos Para a Relação Estresse e Resposta

Segundo Chaves (2005) o tempo de falha tem relação com o estresse por meio de um modelo estatístico na forma:

$$t=f(s)+\varepsilon \quad (78)$$

Onde:

t: tempo de falha

s: estresse

$\varepsilon$  : erro aleatório.

A função  $f(s)$  deve modelar o relacionamento entre o tempo e o estresse. Para estabelecimento desta relação prefere-se aqueles modelos que tenham algum significado físico ou químico: relação de Arrhenius e relação de Potência Inversa.

#### 2.26.7.1 Relação de Arrhenius

Utiliza-se a relação de Arrhenius para modelagem do tempo de falha do produto com situação de estresse envolvendo temperatura. A relação de Arrhenius estabelece a taxa de uma reação química como variável dependente da temperatura na forma:

$$\text{Taxa de Falha} = A' e^{-\frac{E}{kT}} \quad (79)$$

Nesta expressão os elementos têm a seguinte finalidade:

$E$  : energia de ativação (em elétron-volts);

$k$  : constante de Boltzmann ( $8,6171 \times 10^{-5}$ )

$T$  : temperatura absoluta em graus Kelvin ( $1K = -273,16^\circ C$ )

$A'$  : constante característica do mecanismo de falha do produto em teste e das condições do teste.

Assim uma falha devida a uma reação química ou difusão pode ser explicada por meio de um modelo simples. Sendo a ocorrência da falha é determinada por uma quantidade crítica de produto químico, assim pode ser enunciada a expressão:

$$\text{Quantidade crítica} = \text{Taxa de Falha} \cdot T \quad (80)$$

$$T = \frac{\text{Quantidade crítica}}{\text{Taxa de Falha}} \quad (81)$$

Onde:

$T$ : tempo até a falha

Através da expressão pode-se dizer que o tempo de falha é inversamente proporcional à taxa de falha. Para a obtenção da relação de Arrhenius para o

tempo de falha substitui-se a expressão da taxa de falha na expressão do tempo obtendo:

$$T = \frac{\text{Quantidade crítica}}{A'e^{\frac{E}{k\tau}}} \quad (82)$$

Isolando o denominador  $\frac{\text{Quantidade crítica}}{A'}$  e chamando de A, é possível expressar o tempo até a falha a partir da seguinte expressão:

$$T = Ae^{\frac{E}{k\tau}} \quad (83)$$

Aplicando-se à esta expressão logaritmos naturais chega-se à relação de Arrhenius:

$$\ln(T) = \ln(A) + \frac{E}{k} \frac{1}{\tau} \quad (84)$$

Chaves Neto mostra a analogia da relação de Arrhenius com a equação de uma reta na forma  $Y = \beta_0 + \beta_1 X$  a qual não tem o termo estocástico  $\varepsilon$ . A correspondência entre os termos da relação de Arrhenius e a equação da reta é feita da seguinte forma:

$$Y = \ln T \quad (85)$$

$$\beta_0 = \ln A \quad (86)$$

$$\beta_1 = \frac{E}{k} \quad (87)$$

$$X = \frac{1}{\tau} \quad (88)$$

$$X = \frac{1000}{\tau} \quad (89)$$

O estabelecimento desta correspondência indica que o logaritmo do fator tempo ( $\ln t$ ) é uma função linear simples do inverso da temperatura absoluta visto que  $X = \frac{1}{\tau}$ .

De acordo com Freitas (1997) nas aplicações que envolvem valores muito pequenos é comum utilizar  $X = \frac{1000}{\tau}$  para evitar problemas computacionais. Também no lugar do tempo de falha pode ser usado um percentil especificado ou a média da distribuição do logaritmo neperiano do tempo de falha, sendo mais comum optar pelos percentis 50%(tempo mediano), 63,2%(tempo médio de falha da distribuição exponencial) e 10%.

A partir da relação de Arrhenius, Chaves Neto (2005) indica que pode ser determinado o fator de aceleração da relação de Arrhenius entre o tempo de falha  $T_0$  na temperatura de projeto  $\tau_0$  e o tempo de falha  $T$  em uma determinada temperatura de interesse  $\tau$  usando-se a expressão  $T = Ae^{\frac{E}{k\tau}}$ , fazendo:

$$A_c = \frac{T_0}{T_1} - \frac{Ae^{\frac{E}{k\tau_0}}}{Ae^{\frac{E}{k\tau}}} = e^{\frac{E}{k}(\frac{1}{\tau_0\tau})} \quad (90)$$

A relação de Arrhenius é usada em situações que envolvem, de acordo com Chaves Neto (2005), isolamentos elétricos e dielétricos, baterias, graxas e lubrificantes, plásticos, filamentos de lâmpadas incandescentes.

#### 2.26.7.2 Relação Potência Inversa

A relação de potência inversa pode ser usada para modelar o tempo de falha em função de qualquer tipo de variável de estresse, entre as quais podem ser citadas: lâmpadas incandescentes, fadiga de metais, isolantes dielétricos. A Relação Potência Inversa é dada pela expressão a seguir:

$$T = \frac{A}{V^{\varpi}} \quad (91)$$

Onde:

$T$ : tempo de falha

$V$ : variável de estresse, que deve ser sempre positiva

$A$  e  $\varpi$ : parâmetros característicos do produto, unidade, geometria, fabricação, método de teste.

A fim de linearizar a expressão da Relação Potência Inversa aplica-se o logaritmo chegando à expressão:

$$\ln(T) = \ln(A) - \varpi \ln(V) \quad (92)$$

De acordo com Chaves Neto (2005) o fator de aceleração da Relação Potência Inversa entre o tempo de falha  $T_0$  no nível projetado de estresse  $V_0$  e o tempo de falha  $T$  em um nível fixado de estresse  $V$  pode ser determinado através da expressão  $T = \frac{A}{V^\varpi}$  a partir do seguinte desenvolvimento:

$$A_c = \frac{T_0}{T} = \frac{\frac{A}{V_0^\varpi}}{\frac{A}{V^\varpi}} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^\varpi \quad (93)$$

### 2.26.7.3 Forma Geral das Relações Estresse-Resposta

Tanto a relação de Arrhenius como a Relação Potência Inversa podem ser escritas na forma de um modelo geral expresso por meio de uma equação de reta  $Y = \beta_0 + \beta_1 X$ .

Tanto  $\beta_0$  como  $\beta_1$  são parâmetros característicos dos materiais em estudo: constante característica do mecanismo de falha, energia de ativação, constante de Boltzmann, parâmetros característicos do produto, unidade, geometria, fabricação, método de teste. Resta, portanto, que avaliar a característica da variável  $X$ :

- para a relação de Arrhenius  $X = \frac{1}{\tau}$ ;
- para a Relação Potência Inversa  $X = -\ln(V)$ .

## 2.27 Teste log-rank

Quando se deseja realizar a avaliação da equivalência de duas funções de confiabilidade utiliza-se o teste log-rank.

O teste log-rank é um teste de hipótese que compara a distribuição da incidência dos tempos de falha de cada produto com a distribuição esperada caso a ocorrência dos tempos de falha fosse igual para todos os produtos.

Se a distribuição dos tempos de falha for equivalente à distribuição esperada, então a curva de confiabilidade dos produtos é equivalente.

Para utilizar o teste log-rank é necessário que alguns pré-requisitos sejam atendidos, são eles:

- os dados das amostras relativas a cada produto devem atender aos requisitos de aleatoriedade e independência;
- o critério de comparação deve ser definido e fixado;
- a média do tempo de vida dos dados relativos a produtos com falha deve ser a mesma que dos produtos remanescente;
- a variável que indica cada produto deve ser independente;
- não há correlação entre covariáveis.

O objetivo é comparar as funções de confiabilidade de dois produtos mediante as seguintes hipóteses:

$$H_0: R_1(t) = R_2(t) \text{ (hipótese nula)}$$

$$H_a: R_1(t) \neq R_2(t) \text{ (hipótese alternativa)}$$

A hipótese nula afirma que dois itens têm a mesma confiabilidade e a hipótese alternativa afirma o contrário.

Para o cálculo da estatística do teste é necessário conhecer o número de falhas esperado para cada produto que é obtido através da fórmula:

$$E_k(t) = \Delta N(t) \frac{R_k(t)}{R(t)} \quad (94)$$

Onde:

$\Delta N(t)$ : é o número total de produtos que falharam no tempo  $t$

$R_k(t)$ : é a quantidade do produto  $k$  no tempo  $t$

$R(t)$ : quantidade de produtos em estudo no tempo  $t$

No caso em que apenas dois produtos estão sendo comparados a estatística log-rank é obtida apenas através de um dos produtos sendo o resultado do teste estendido para o outro produto por simetria. Ou seja: se o número de falhas de um produto é maior do que o esperado para este produto, isto significa que o número de falhas do outro produto é menor do que o número esperado de falhas para o mesmo.

A estatística do teste log-rank é dada pela expressão:

$$\text{Log - rank} = \frac{(O_1 - E_1)^2}{\text{Var}(O_1 - E_1)} \quad (95)$$

Denotando por  $E_1$  o número esperado de falhas do produto um e por  $O_1$  o número observado de falhas do mesmo produto, e  $\text{Var}(O_1 - E_1)$  é dada por:

$$\text{Var}(O_1 - E_1) = \sum_t \frac{R_1(t)R_2(t)\Delta N(t)[R(t) - \Delta N(t)]}{R(t)^2[R(t) - 1]} \quad (96)$$

Esta estatística segue uma distribuição  $\chi^2$ (chi-quadrado) com  $k - 1$  graus de liberdade.

## 2.28 Pneus

Desde a invenção dos pneus, há mais de 100 anos, pesquisam-se várias idéias alternativas à sua construção sendo que algumas chegaram até a ser testadas nas pistas. Entretanto nenhuma foi aplicada comercialmente, permanecendo o domínio do pneumático de borracha, que resulta da combinação de propriedades que conferem ao pneu a possibilidade de oferecer suporte e controle do veículo tendo boa durabilidade em diferentes e difíceis condições de uso, sendo altamente adaptável a aplicações específicas. (DIXON, 1996).

As condições das vias de rodagem brasileiras contribuem, junto com a imperícia e imprudência, para o aumento do índice de causa da imobilização

dos veículos. E isto pode ser observado tanto em estradas de rodagem como nas vias públicas das cidades brasileiras.

As falhas em pneus contribuem significativamente para a ocorrência de irregularidades na condição dos veículos as quais podem resultar inclusive em acidentes de leve, média ou grande proporção conforme a contribuição de covariáveis importante como velocidade, visibilidade, falta de atenção, entre outras. Visto o pneu ser a parte do veículo que recebe diretamente os impactos causados pelos obstáculos existentes nas vias. Este fato não só acarreta prejuízo associado com o custo do pneu substituído, mas também gera a perda de tempo de viagem, com o conseqüente custo associado a atraso nos transportes, o aumento do risco de acidentes e roubo de cargas, todos motivos de grandes preocupações tanto para transportadores autônomos como para as empresas de transporte brasileiras. (HEMÉTRIO, 2004)

Além da segurança outro aspecto a ser considerado para que se adotem práticas que visem a ampliação da durabilidade dos pneus é o ambiental. A resolução CONAMA nº 259 de 26/08/1999 prevê que fabricantes e importadores de pneus no Brasil façam o recolhimento e dêem destino ambientalmente sustentável a pneus inservíveis, proporcionalmente à quantidade produzida ou importada. (HAVIARAS, 2005)

O objetivo da norma CONAMA nº 259 é retirar do ambiente um resíduo que ocupa grande volume, pode ser suporte para desenvolvimento de insetos transmissores de doenças, como o mosquito da dengue. Ainda não se conhece sequer uma estimativa de tempo de decomposição na natureza de um pneu, assim a aplicação da norma citada evita o impacto ambiental causado por este material. O aumento do tempo de vida do produto, melhorando sua manutenção, pode reduzir o impacto ambiental causado por este resíduo.

A análise de pneus sucateados em frotas de caminhões e ônibus é realizada atualmente para efeito de controle de estoque e determinação de causas de falhas, carecendo, no entanto, de um estudo efetivo e cuidadoso dos dados coletados. Desta forma não existe um método de análise de falhas que avalie as causas de sucateamento e mesmo estabeleça padrões de comparação entre os pneus disponíveis no mercado. Tal fato dificulta que sejam adotadas práticas sistemáticas objetivando evitar a falha do produto e a

detecção de quando o mesmo encontra-se em condições limites para uso devendo ser então inutilizado ou sofrer manutenção. Tais práticas visam podem contribuir decisivamente para a diminuição das perdas de ordem econômica e também para ampliar a segurança das pessoas, cargas e veículos e ampliar a vida útil do produto. O melhor entendimento da tipologia de falhas de pneus e a prevenção das mesmas, além de minimizar os riscos de acidentes e impacto ambiental, é aspecto essencial no controle de custos das empresas de transporte, com grande relevância no cenário sócio-econômico brasileiro.

## 2.29 Partes de um Pneu

De acordo com o fabricante as partes de um pneu podem variar, assim como a metodologia de sua fabricação. Porém, todo pneu deve obedecer às normas estabelecidas. De acordo com a NBR 226-206 da ABNT um pneu radial tem a seguinte nomenclatura básica para suas partes:

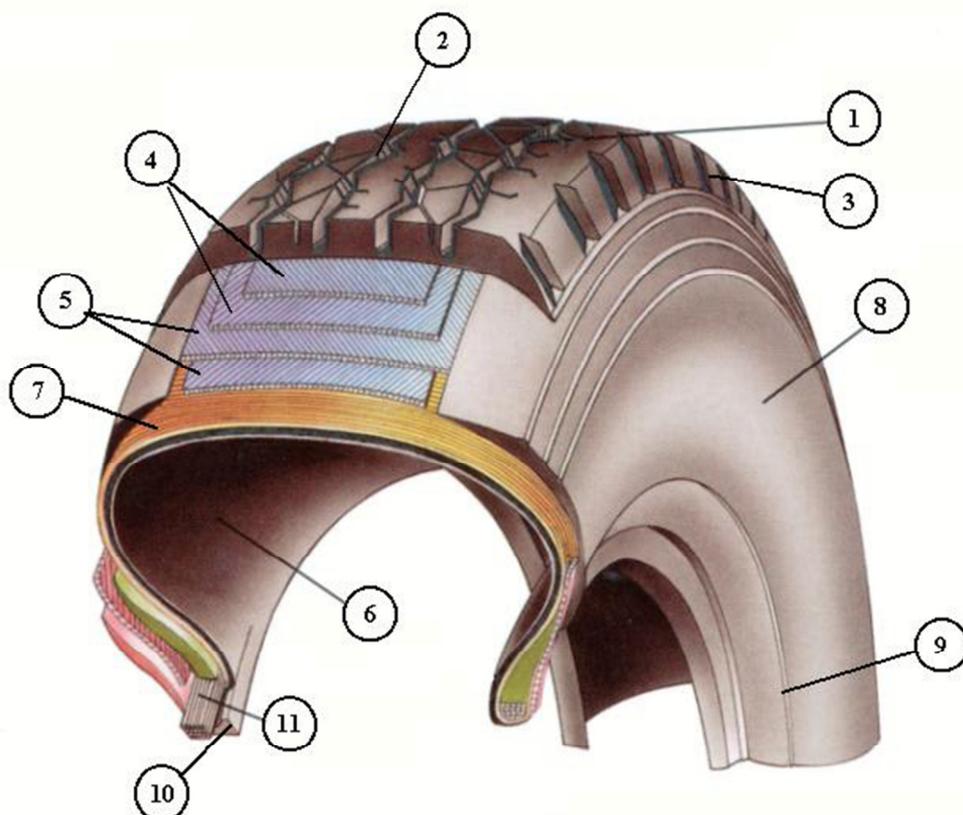


FIGURA 39 – PARTES DE UM PNEU  
FONTE: HAVIARAS (2005)

Onde:

1 - Banda de rodagem: parte do pneu que entra em contato com o solo.

2 - Sulcos: cavidades que recortam a superfície da banda de rodagem longitudinalmente e/ou transversalmente, definindo o seu desenho.

3 - Ombros: partes do pneu entre a banda de rodagem e os flancos.

4 - Lona(s) ou cinta(s) de proteção: parte exterior da estrutura resistente do pneu, que tem a finalidade de proteger as lonas/cintas de trabalho.

5 - Lonas ou cintas de trabalho: parte exterior da estrutura resistente do pneu radial que tem a finalidade de estabilizar o pneu.

6 - Revestimento interno: toda a superfície interna do pneu, constituída de componentes de borracha que tem a função de proteção.

7- Lona carcaça: parte interior da estrutura resistente do pneu cujos cordonéis estendem-se de um talão a outro.

8- Flancos ou costados: partes do pneu compreendidas entre os limites da banda de rodagem e os talões.

9 - Cordão ou filete de centragem: linha em relevo próxima da área dos talões que tem a finalidade de indicar visualmente a correta centralização do pneu no aro.

10 - Talões: partes do pneu que entram em contato com o aro, garantindo a sua fixação ao mesmo.

11 - Aro do talão: elemento metálico interno do talão.

A carcaça é uma estrutura resistente formada por um conjunto de lonas e eventuais cintas de proteção ou de trabalho. Os cordonéis são elementos metálicos ou têxteis retorcidos que constituem a carcaça e dão resistência às lonas e/ou cintas.

## 2.30 Estrutura de um Pneu

Segundo Haviaras (2005) o pneu pode ser definido como uma estrutura mecânica que trabalha sob tensão provocada pela ação da pressão interna de um fluido que, na maioria dos casos, é o ar atmosférico.

A confecção de um pneu é feita utilizando materiais que podem ser classificados em duas categorias: materiais de reforço e compostos.

Os materiais de reforço são basicamente os cordonéis utilizados na carcaça e cintas e os arames de aço utilizados nos frisos dos talões.

A carcaça é o componente principal do pneu, sendo constituída por uma ou mais camadas de cordonéis emborrachados, cada camada é chamada de lona, sendo comum, atualmente, o uso de nylon para pneus diagonais e aço para pneus radiais de carga, conforme ilustra a figura 40, a seguir:

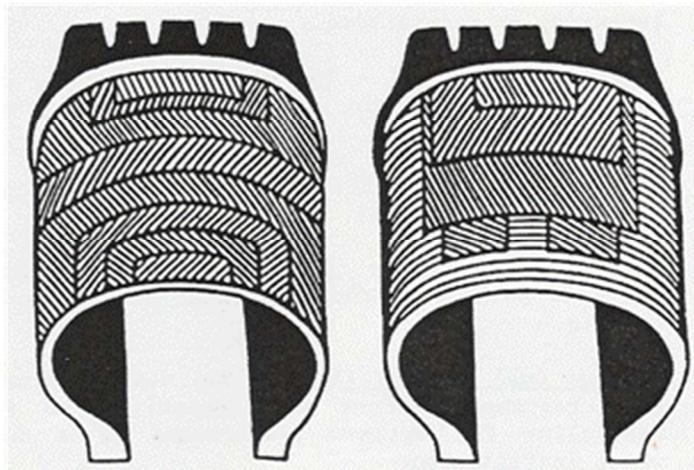


FIGURA 40 – DIFERENÇA DE ESTRUTURA ENTRE PNEUS RADIAIS E DIAGONAIS  
FONTE: FORD; CHARLES (1988)

As lonas, nos pneus diagonais, cruzam o pneu de talão a talão com ângulo diagonal dos cordonéis em relação à linha de centro do pneu (usualmente ângulos de  $25^{\circ}$  a  $40^{\circ}$ ) em direções opostas para cada lona, resultando em uma estrutura de cordonéis cruzados.

No caso dos pneus radiais a carcaça posiciona-se perpendicularmente aos aros dos talões, a circunferência da banda de rodagem é reforçada por cintas de aço, as quais reduzem as deformações que a mesma sofre na área de contato com o solo e ampliam a proteção contra perfurações conforme ilustra a figura 41, adiante:

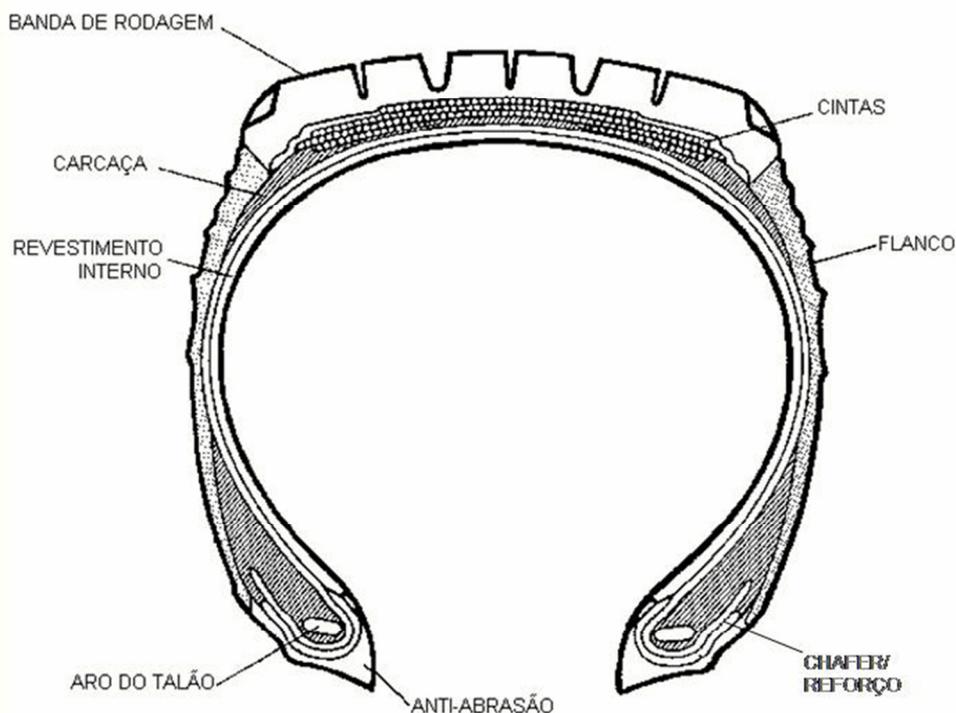


FIGURA 41 – SEÇÃO DE PNEU RADIAL DE CARGA  
 FONTE: FORD; CHARLES (1988)

A carcaça é ancorada pelos aros do talão, que são arames metálicos dispostos em forma de circunferência na região dos talões, que são as partes do pneu que entram em contato com o aro.

O talão tem montagem com interferência no aro permitindo a ancoragem da carcaça ao mesmo, evitando o movimento entre o aro e pneu e mantendo a pressão de ar dentro dos pneus tipo sem câmara.

Os principais componentes elastoméricos do pneu radial são banda de rodagem, flanco, anti-abrasão do talão e revestimento interno, construídos com tipos distintos de borracha com funções específicas na estrutura do pneu.

A banda de rodagem é o composto de borracha onde são estampados os sulcos que formam os desenhos característicos dos pneus, os quais servem para proporcionar tração, principalmente no piso molhado.

A banda de rodagem deve atender a diferentes requisitos, como aderência no seco e molhado, conforto, bom rendimento quilométrico, resistência a abrasão e a laceração. É a banda de rodagem a parte que proporciona o aumento da vida útil de um pneu através das recapagens;

Os flancos protegem a carcaça na lateral do pneu, são os componentes que se submetem às flexões mais severas. Têm como principais características a boa resistência ao envelhecimento por intempéries e à oxidação.

O talão é revestido por um composto antiabrasão e suas principais características são a resistência ao aquecimento causada pela dissipação de calor dos freios e a resistência a abrasão com o aro.

A pressão é contida pela câmara de ar quando se infla o pneu. Nos pneus sem câmara a mesma função é exercida pelo revestimento interno (“*liner*”). O *liner* é o composto de borracha que compõe a camada mais interna do pneu.

No projeto estrutural a seleção dos materiais de um pneu deve-se efetuar um balanço delicado entre a melhora de cada propriedade de um pneu sem causar o sacrifício de outra.

### 2.31 Principais tamanhos de pneus e aplicações

Segundo Haviaras (2005) o tamanho do pneu é dado por um conjunto de medidas composto pela largura nominal do pneu (seguido ou não da indicação de sua série), do tipo de construção (radial ou diagonal) e da medida do seu aro de montagem. Sendo a série a relação entre a altura de seção (distância entre o assentamento do pneu com o aro e a rodagem) e a largura de seção (distância entre os flancos do pneu).

Alguns exemplos de tamanhos utilizados para pneus de carga são: 295/80R22.5 ou 11.00-22 ou 12R22.5

Onde:

- 295 ou 11.00 ou 12 significam as larguras nominais da seção dos pneus, em milímetros ou polegadas;
- 80 indica a série ou relação nominal de aspecto que é de cem vezes a razão entre altura e largura da seção do pneu novo, neste caso, a série (altura) corresponde a 80% da largura (295 mm). Quanto menor for esse número (60, 50,45), mas baixo será o perfil do pneu e ele terá uma aparência mais larga;

- R indica que o pneu é do tipo radial. A ausência da letra significa que o pneu é do tipo diagonal (por exemplo a medida 11.00-22);
- 22.5 ou 22 Indicam o diâmetro em polegadas do aro em que o pneu é montado.

De acordo com a ABNT existem três tipos básicos de designações de medidas de pneus usadas para pneus de carga:

1. tamanhos convencionais usados em aros de centro plano, por exemplo: 10.00-20 e 11.00R22;
2. tamanhos convencionais usados em aros de 15", por exemplo: 11R22,5 e 12R22,5;
3. tamanhos métricos usados em aros de 15", por exemplo: 275/80R22,5 e 295/80R22,5

Para uso em caminhões de percurso urbano ou de curta distância e ônibus urbanos, houve uma evolução de uso de pneus nas medidas 9.00R20 para pneus nas medidas 10.00R20 em função do maior peso dos veículos utilizados nesta atividade. Atualmente estão sendo adotados pneus sem câmara em busca das vantagens deste produto.

Para uso rodoviário, equipando ônibus interurbanos e caminhões de percurso longo usualmente com reboques, está ocorrendo a evolução da medida 11.00R22 para 295/80R22.5 também visando-se as vantagens do uso do pneu sem câmara.

### 2.32 Processo de fabricação do pneu

Haviaras (2005) conceitua que a etapa preliminar de manufatura de um pneu divide-se em três processos: mistura e extrusão de borracha, fabricação de talões e fabricação de lonas. Após estes processos ocorre a montagem do conjunto e sua vulcanização.

De acordo com Kaster (2004) *apud* Haviaras (2005) os compostos de borracha são formado por diversas matérias primas, tais como: antioxidantes,

antiozonantes, agentes de cura, elastômeros, enxofre, agentes reforçantes, cobalto, óxido de magnésio, carbonato de cálcio, óxido de zinco, negros de fumo, materiais de processamento e outros produtos químicos (de acordo com as aplicações a que se destinam os compostos). Estes produtos são misturados mecanicamente em misturadores internos, e em seguida a mescla é colocada em moinhos para se tornar mais homogênea, a borracha resultante é enviada em tiras para as extrusoras e calandras.

As extrusoras, usualmente, têm forma tubular, sendo a borracha crua inserida no tubo e empurrada por um mecanismo de parafusos que força a saída da borracha através de um orifício com formato similar ao requerido para o componente. Após a extrusão o material é cortado no comprimento adequado para a construção do pneu.

As borrachas para banda de rodagem, laterais e enchimentos são conformadas por extrusão e cortadas no tamanho adequado para cada pneu, já o revestimento interno é conformado por calandragem.

A calandragem é feita com objetivo de obter um material com espessura constante e bom acabamento. Utiliza-se a calandragem para a confecção de superfícies planas, chapas e laminadas para serem termoformadas posteriormente. Após a extrusão a borracha entra em um sistema de cilindros aquecidos, que formam a calandra, que giram a velocidades ligeiramente diferentes para formar as chapas ou laminados.

Os cordonéis de aço revestidos de latão são recebidos de fabricantes externos em carretéis. Vários cordonéis, com distanciamento controlado entre eles, passam pela calandra onde são revestidos por borracha em ambos os lados. A tela revestida de borracha é então cortada na largura e emendada para formar a lona de corpo e cintas nos tamanhos e ângulos adequados, sendo então enroladas em carretéis e enviadas ao processo de montagem do pneu.

No processo de fabricação dos talões revestem-se arames de aço de alta resistência com de borracha e em seguida enrola-se esta peça para formar os frisos dos talões. A borracha é usualmente prensada dentro e em volta dos frisos enquanto estes são passados em uma extrusora. Depois de reunidos aos

revestimentos e enchimentos de talão são enviados ao processo de montagem do pneu.

No processo de construção, a carcaça e talões são reunidos em um tambor rotativo de conformação, sendo também nesta operação adicionados os outros componentes do pneu como os enchimentos e rodagem. A união entre os componentes é promovida por roletagem e por sua aderência.

Segundo Haviaras (2005) o processo de construção de pneus radiais é basicamente igual ao de pneus diagonais, entretanto a carcaça, talões e a banda de rodagem dos diagonais são feitos em um único tambor de conformação com diâmetro similar ao dos talões enquanto que para pneus radiais as cintas e rodagem são conformados em um tambor de diâmetro similar ao diâmetro final do pneu evitando-se grandes deformações das cintas no processo de conformação da estrutura final do pneu.

Após o processo de construção, o pneu é inserido no molde de vulcanização, onde uma bexiga inflável de borracha é colocada no pneu. Esta bexiga força o pneu contra o molde, conformando os desenhos de rodagem e laterais.

O processo de vulcanização liga quimicamente e fisicamente os vários componentes do pneu. Os componentes de borracha são vulcanizados por calor transferido do vapor ou água quente dentro da bexiga e do molde, processando a moldagem. Este calor causa modificações químicas e físicas nos compostos de borracha, situação na qual os componentes são transformados da consistência plástica para a consistência elástica encontrada no pneu acabado.

### 2.33 Relação entre pressão e carga

A pressão correta para um determinado tamanho de pneu e carga é crítica para manter uma distribuição adequada de tensões no pneu, pois reduz o flexionamento e o aumento de temperatura gerado pela fricção dos componentes do pneu (histerese), que iria desperdiçar combustível e diminuir a vida da carcaça.

A menor carga admissível para pneus em rodas duplas visa compensar a transferência de carga que normalmente ocorre entre pneus geminados devido

à inclinação de pista, diferença de pressão entre pneus, e pequenas diferenças de diâmetro entre outras.

Segundo *The Tire and Rim Association Inc* (2003) apud Haviaras (2005) a carga admissível para pneu geminado é 94% para carga máxima até 2.180 kg ou 91% para carga máxima acima de 2.180 kg, considerando carga máxima para pneu em montagem simples.

É importante calibrar o pneu convenientemente, a pressão de ar correta é crítica para o bom desempenho dos pneus, pois a utilização de pressão inadequada acarreta graves conseqüências aos componentes do pneu visto que submete os mesmos à esforços não previstos em seu projeto.

Pneus com inflação inferior (subinflação) à adequada sofrem aumento na amplitude de flexão do pneu causando aumento de calor em seus componentes por histerese, aumentando os esforços suportados pelos compostos de borracha causando sua deterioração e causando fadiga nos cordões de aço da carcaça e cintas. (HAVIARAS, 2005)

Pneus com muita inflação (super inflação) ficam mais vulneráveis a cortes na superfície da rodagem, quebras por impacto, perfurações e danos por choque. A subinflação, ou a super inflação, alteram a “pegada” do pneu. A “pegada” do pneu é a área em contato com a pista. A modificação da “pegada” do pneu resulta numa abrasão desigual da rodagem contra o pavimento.

A calibração correta dos pneus é informada por tabelas e pode ser determinada de acordo com o tipo do pneu, posição que ocupa no veículo, e o índice de carga à que o veículo está submetido.

### 2.34 Relação entre velocidade e calor

Os pneus são desenvolvidos para manter sua temperatura de equilíbrio em torno de, no máximo, 90°C, no caso de pneus radiais de carga. Se esta temperatura for ultrapassada por curtos períodos de tempo o pneu não sofrerá grandes danos, mas excedê-la por períodos maiores acaba por causar a perda da resistência dos materiais componentes e eventualmente podem ocorrer separações na estrutura do pneu. (FORD; CHARLES, 1988)

A temperatura de equilíbrio é obtida durante a operação contínua do pneu, sendo função, basicamente, da pressão, carga e velocidade, às quais o

pneu está sendo sujeito. A temperatura sobe rapidamente no início da operação e depois gradualmente até um valor de equilíbrio. Na temperatura de equilíbrio, o calor dentro da estrutura do pneu é igual ao dissipado pelas suas superfícies externas.

A temperatura aumenta principalmente devido à transformação da energia cinética em calor, devido à alta histerese dos compostos de borracha. Quanto maiores forem as deformações sofridas pela borracha (maior deflexão do pneu), e maior a quantidade de ciclos no tempo (maior velocidade), maior será a transformação de energia em calor e, portanto, maior será a temperatura de equilíbrio.

Sobrecarga e subinflação causam a deflexão, que é um dos fatores no desenvolvimento de calor em um pneu de carga.

As partes do pneu que mais convertem energia cinética em calor são aquelas com maior massa de borracha e com maior movimentação. Isto ocorre principalmente na área da rodagem do pneu, sendo esta região responsável por aproximadamente 85% desta transformação de energia. (FORD; CHARLES, 1988)

### 2.35 Modos de falha do pneu

As falhas típicas sofridas pelos pneus devem-se às solicitações de carga e velocidade impostas. Estas falhas ocorrem pela falência ou eminência de falha dos materiais de reforço. Nos veículos que desenvolvem maior velocidade a solicitação é maior. As cintas estão mais sujeitas à falha por solicitação mecânica e calor. Quando as solicitações preponderantes são a carga e altas frequências de acelerações e paradas, a maior incidência de falhas ocorre nas extremidades da lona de corpo no talão do pneu.

O uso de pressão inadequada para a carga provoca os maiores danos à estrutura do pneu, visto que o uso de pressão baixa cria maior flexão da estrutura, provocando maior deformação em áreas críticas, concentrando tensões e aumentando a possibilidade de separações entre metal e borracha nas extremidades dos cordões metálicos. O uso de pressão acima da adequada eleva a possibilidade de falhas por impacto visto aumentar a rigidez da estrutura.

Perfurações e cortes que atingem cintas e lona de corpo comprometem a estrutura, que pode ser contaminada por umidade e resíduos que irão oxidar os cordonéis metálicos e deteriorar a adesão entre metal e borracha. Mesmo após reparar as perfurações ou cortes se as avarias atingirem os materiais de reforço a resistência mecânica da estrutura vai reduzir e irá aumentar o risco de falha por impacto, fadiga ou separação entre componentes.

O modo de falha estrutural mais comum em pneus radiais com cintas metálicas é a separação entre os componentes das cintas de aço. Esta área é sujeita a altas tensões durante o uso pesado e também é a área com potencial de menor adesão devido à dificuldade de aderência entre metal e borracha.

Algumas ocorrências na fabricação podem prejudicar a adesão entre as partes metálicas e de borracha, entre elas a vulcanização insuficiente, contaminação, estocagem e manuseio impróprio dos componentes do pneu, entre outros. Como exemplo pode-se citar o acúmulo de qualquer umidade no fio de aço da cinta ou entre cintas de aço que podem levar à degradação dos componentes do fio de aço ou pontos de separação da estrutura. Igualmente, pequenas bolhas de ar retidas entre as cintas de aço ocasionam a quebra da adesão. (HAVIARAS, 2005)

Visto que a borracha não adere diretamente ao aço, os fios das cordas das cintas de aço são recobertos com uma camada fina de latão, assim a adesão do composto de borracha é promovida pela reação do zinco e cobre existentes na camada de latão com o enxofre existente na borracha. (ISHIKAWA; HOTAKA, 2002 *apud* HAVIARAS, 2005)

Segundo Kaster (2004) *apud* Haviaras (2005) o fabricante de pneus deve ter cuidado especial com os fios de aço recobertos de latão. Estes componentes são, usualmente, adquiridos de fornecedores externos e recebidos pelo fabricante de pneus em embalagens seladas que previnem a contaminação por umidade. Ao receber este item o fabricante de pneus deve estocá-lo em um ambiente de temperatura e umidade controladas até serem recobertos com borracha. É importante não expor estes fios, que irão compor as cintas, à umidade, isto poderia provocar a corrosão do aço ou latão durante o processo de manufatura e prejudicar a adesão entre os cordonéis e a borracha.

## 2.36 Testes em pneus

A fim de conduzir um estudo de durabilidade em pneus pode-se lançar mão de vários tipos de testes, os quais podem ser classificados em três tipos básicos: testes em laboratório, testes em pista de testes e testes em frotas ou estrada.

Os testes acelerados de durabilidade efetuados em laboratório podem ser conduzidos sobrecarregando o pneu com cargas excessivas ou rodando os mesmos em velocidades progressivamente maiores após determinado número de ciclos (teste progressivo). Estes testes de durabilidade podem ser realizados usando dinamômetros (tambores), onde o raio do tambor influencia a distância até falha devido à severidade extra, induzida pela curvatura do tambor, esta curvatura altera o carregamento sobre o pneu. Nestes testes a velocidade ou carregamento são aumentados a intervalos de tempo até a falha do pneu, ou até que uma velocidade específica seja atingida, ocorrendo neste caso um dado censurado.

A falha ocorrida em testes de laboratório sob carregamentos maiores de carga ou velocidade mantém correlação com as condições normais. Normalmente é baseada em dados empíricos ou em curvas de fadiga relacionando nível de tensão-deformação com o número de ciclos até a falha, considerando os efeitos da temperatura. Para validação do produto junto a órgãos governamentais ou de certificação são estabelecidos níveis mínimos de carregamentos e número de ciclos que cada família de produtos deve atingir.

O teste de *Plunger* e de explosão são outros testes típicos de laboratório e são utilizados respectivamente para medir a resistência a perfurações na rodagem e para avaliar a pressão à qual o pneu explodirá, por razões de segurança utiliza-se água pressurizada neste último tipo de teste. (HAVIARAS, 2005)

A execução de testes em pistas de teste normalmente avalia o comportamento dinâmico do produto: aderência em curvas em pista seca e em pista molhada, sonorização e conforto em tipos distintos de piso, resistência a impactos e perfurações e o efeito na dirigibilidade.

A realização de testes em frotas é feita equipando-se veículos com pneus de teste e efetuando inspeções periódicas com o objetivo de medir o desgaste

e vida percorrida até a falha. A falha do pneu também pode ser acelerada em testes de estrada sob condições mais severas, como sobre pista de pedras, estradas de saibro, ou com veículos sobrecarregados.

Em todos os tipos de teste, para efeito de desenvolvimento e avaliação de produtos, são avaliados pneus de diferentes fabricantes ou então entre produtos cujo comportamento seja conhecido.

### 3 Material e Método

#### 3.1 Material

As informações para realização deste trabalho são constituídas das quilometragens de pneus instalados em ônibus coletivos urbanos que rodam na cidade de Curitiba-PR. Estes dados foram cedidos pela empresa Radsystem Desenvolvimento de Sistemas Ltda e são compostas por: marca e modelo do pneu, número (identificação) do pneu, quilometragem que o pneu rodou antes de sofrer recapagem(pneu novo) e quilometragem que o pneu rodou após a sucessivas recapagens às quais foi submetido.

Alguns dos pneus que fazem parte da amostra têm dados completos, ou seja: quilometragem rodada quando novo, e quilometragem rodada após uma, duas ou três recapagens e quilometragem rodada após a realização de mais de três recapagens. Todavia para outras unidades não estão disponíveis todos estes dados. Alguns pneus só possuem registro de dados após a primeira recapagem, outros só têm registro da quilometragem quando novo. Isto ocorre dada a prática das empresas em adquirirem não apenas pneus novos, mas também pneus que já sofreram recapagem.

Os dados disponíveis são dados de campo coletados com a finalidade de subsidiarem informações para controle de estoque e almoxarifado. Não estão disponíveis informações como o tipo de piso em que o pneu rodou ou em que eixo o pneu estava instalado no veículo.

A informação do eixo em que o pneu estava instalado é importante, pois é sabido que são realizados rodízios entre os pneus. Sendo costume entre os transportadores, e mesmo entre motoristas de automóveis, com o objetivo de minimizar os custos relativos aos pneus, que os pneus novos sejam colocados no eixo dianteiro e os pneus recapados sejam colocados nos eixos traseiros.

Os pneus novos são colocados no eixo dianteiro, pois estes sofrem maiores solicitações de esforços, a aquaplanagem se dá pelas rodas traseiras. Ainda, os pneus novos têm o mesmo diâmetro, isto diminui a necessidade de funcionamento do sistema diferencial nas rodas motrizes evitando o desgaste do mesmo. Também são as rodas dianteiras que têm maior ação na frenagem do veículo. Além da questão de segurança a colocação de pneus novos no eixo

dianteiro evita que o veículo apresente tendência para um dos lados (“passarinhada”) e vibrações no volante.

No caso de caminhões e ônibus a posição do pneu no eixo também é importante. Os pneus que ficam nas pontas dos eixos estão sujeitos a maiores riscos que aqueles que são posicionados na parte interna dos eixos.

A quilometragem rodada pelos pneus novos ou em cada uma de suas recapagens é denominada pelo jargão “vida”.

Estão disponíveis dados das seguintes marcas e modelos:

- marca Firestone,
  - modelos Ctrz e Hp2000;
- marca Goodyear
  - modelos Ct150, G 8, G 291 3/06, G 291 7/06, G358 5/06, G358 6/08, G358 7/06, G359 3/06, G359 5/09, G359 7/06;
- marca Kumbo
  - modelo Ms 956;
- marca Michelin
  - modelos Uniroyal, Xze 2, Xzu 2, Ztu 2t;
- marca Pirelli
  - modelo Fr011
- marca Toyo
  - modelo M316

Foram disponibilizadas informações de 1236 unidades de pneus. O tamanho das amostras de cada marca/modelo de pneu é apresentado na tabela 9, a seguir:

TABELA 9 – QUANTIDADE INICIAL DE UNIDADES NAS AMOSTRAS CONFORME MARCA/MODELO DE PNEU

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Tamanho da amostra</b>
Firestone	Crz	12
	Hp 2000	2
Goodyear	Ct150	5
	G8	4
	G 291 3/06	197
	G 291 7/06	69
	G 358 5/06	374
	G 358 6/08	16
	G 358 7/06	228
	G 359 3/06	87
	G 359 5/09	12
	G 359 7/06	53
Kumbo	Ms 956	1
Michelin	Uniroyal	11
	Xze 2 3/06	12
	Xze 2 8/06	88
	Xzu 2 7/06	39
	Ztu 2t 5/09	24
Pirelli	Fr011	1
Toyo	M316	1

FONTE: O autor (2011)

A fim de obter os resultados foram excluídas do estudo aquelas marcas/modelos de pneus tinham uma amostra com menos de trinta unidades. Este é o caso das marcas Kumbo, Firestone, Pirelli e Toyo e dos modelos Ct150, G8, G358 6/08, G 359 5/09, da marca Goodyear e também os modelo Uniroyal, Xze 2 3/06 e Ztu 2t 5/09 da marca Michelin. Assim, o estudo foi conduzido para as marcas e modelos apresentados na tabela 10, a seguir:

TABELA 10 – MARCAS E MODELOS UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DAS FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Tamanho da amostra</b>
Goodyear	G 291 3/06	197
	G 291 7/06	69
	G 358 5/06	374
	G 358 7/06	228
	G 359 3/06	87
	G 359 7/06	53
Michelin	Xze 2 8/06	88
	Xzu 2 7/06	39

FONTE: O autor (2011)

### 3.2 Método

Na condução do trabalho foram adotados os métodos descritos na revisão de literatura.

A análise dos dados foi efetuada utilizando os *softwares Excel e Statgraphics Plus versão 5.1*. O *software Excel* foi utilizado para digitação, conferência e organização dos dados que foram exportados para o *software Statgraphics Plus versão 5.1*, através do qual os dados foram analisados.

Inicialmente foram obtidas as estatísticas descritivas da quilometragem rodada em cada vida pelos pneus participantes do estudo. Dada a natureza do produto em estudo os resultados provenientes de cálculos foram arredondados para valores inteiros, pois os parâmetros relativos a quilometragem de pneus são fornecidos em quilômetros inteiros. Os valores obtidos para as estatísticas descritivas da quilometragem rodada pelos pneus em cada vida estão apresentados na tabela 11 no item Resultados e Discussões.

Em seguida foi feito o teste de ajuste dos dados aos modelos clássicos de distribuições de probabilidade: Exponencial, Log-Normal, Normal e Weibull, sendo o p-valor resultante do teste apresentado na tabela 12 que se encontra no item Resultados e Discussões.

A fim de obter a comparação entre os modelos foi adotado como critério a análise das funções de confiabilidade relativas a cada modelo e a análise da existência de diferenças estatísticas significativas entre elas.

O mesmo critério foi adotado para comparar a quilometragem rodada pelo mesmo modelo pneu em cada uma de suas vidas.

As funções de confiabilidade foram obtidas com os dados agrupados de acordo com o tipo de comparação desejado.

No primeiro grupo, comparação entre modelos, os dados foram agrupados visando efetuar a análise entre as diferentes marcas e modelos e desenvolvendo-se a obtenção das funções de confiabilidade para pneus novos, e para cada uma das recapagens efetuadas. Foram obtidas as estatísticas descritivas relativas a cada modelo de pneus em cada uma de suas vidas. Em seguida foi efetuada a comparação entre as funções de confiabilidade. Esta comparação foi feita a partir do teste *log-rank* efetuado entre todas as marcas e modelos cujos dados estavam disponíveis e também entre as marcas e modelos comparadas duas a duas sendo o p-valor resultante de cada comparação lançado em tabelas.

As funções do segundo grupo de comparações (entre as vidas de cada modelo de pneus) os dados foram agrupados por marcas e modelos. Em seguida foram obtidas as estatísticas descritivas e funções de confiabilidade para as diversas vidas dos pneus conforme a disponibilidade dos dados. Também foi efetuada a comparação entre todas as funções de confiabilidade de cada marca e modelo através do teste *log-rank* e entre as funções de confiabilidade duas a duas registrando-se em tabelas o p-valor obtido em cada comparação.

Também foram agrupados os dados de todos os pneus, em todas as vidas, e obtidas as estatísticas descritivas e as funções de confiabilidade. O teste *log-rank* foi aplicado com o objetivo de investigar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as vidas de todos os pneus e entre as vidas duas a duas.

Finalmente, em relação aos pneus cujos dados de quilometragem rodada quando novos e após a primeira, segunda e terceira recapagem estavam disponíveis, foram somadas tais quilometragens obtendo-se as quilometragens totais rodadas por cada marca e modelo sobre as quais foram calculadas as estatísticas descritivas e traçadas as funções de confiabilidade. Foi aplicado o teste *log-rank* entre todas as marcas e modelos e em seguida entre estas marcas e modelos duas a duas com o objetivo de verificar diferenças estatísticas significativas entre as funções de confiabilidade das marcas e modelos em estudo.

## 4 Resultados e Discussão

Neste item são apresentados os resultados obtidos para os diferentes modelos de pneus que foram analisados, bem como os gráficos das funções de confiabilidade e a discussão relativa a cada um destes resultados

A análise dos resultados se dará a partir dos valores obtidos pela aplicação das técnicas de confiabilidade, desprezando-se outras interpretações.

### 4.1 Valores estatísticos da quilometragem das marcas e modelos rodadas em cada vida pelos pneus estudados

A tabela 11, a seguir, apresenta as estatísticas que descrevem os valores das quilometragens rodadas pelos modelos estudados em cada uma das suas fases de vida.

TABELA 11 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM DOS PNEUS UTILIZADOS NO ESTUDO

Marca	Modelo	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	I Quartil	II Quartil	III Quartil
Goodyear	G 291 3/06	52.955	30.439	12.381	190.499	30.095	43.770	43.770
	G 291 7/06	56.756	14.445	29.560	95.484	46.506	57.550	57.550
	G 358 5/06	52.050	29.522	3.017	221.672	30.033	47.428	47.428
	G 358 7/06	55.366	18.120	17.166	108.117	41.466	53.609	53.609
	G 359 3/06	61.191	35.1220	3.047	200.923	35.956	55.003	55.003
	G 359 7/06	53.664	12.865	26.134	92.240	42.485	52.625	52.625
Michelin	Xze 2 8/06	60.624	27.899	947	181.072	38.769	61.952	61.952
	Xzu 2 7/06	67.265	22.005	27.637	119.507	53.071	66.826	66.826

FONTE: O autor (2011)

### 4.2 Verificação do ajuste dos dados às distribuições de probabilidade

A fim de verificar a aderência dos dados disponíveis aos modelos clássicos de probabilidade (Exponencial, Log-normal, Normal e Weibull) foi efetuado o ajuste dos modelos e o teste de Kolmogorov-Smirnov(KS) revelou os valores-p que se encontram registrados na tabela 12, adiante.

TABELA 12 – P-VALOR PARA VERIFICAÇÃO DO AJUSTAMENTO DOS DADOS AOS MODELOS CLÁSSICOS DE PROBABILIDADE

Marca/Modelo	Distrib. de Prob.	Novo	1 Rec	2 Rec	3 Rec	+3 Rec	
Goodyear	G 291 3/06	Exponencial	0,0	0,0	0,0	0,0404	
		Lognormal	0,0142	0,0098	0,5116	0,0620	
		Normal	0,0	0,0	0,0004	0,0833	
		Weibull	0,00005	0,0451	0,0195	0,0460	
	G 291 7/06	Exponencial	0,0	0,0			
		Lognormal	0,17562	0,2873			
		Normal	0,09159	0,6747			
		Weibull	0,05328	0,6747			
	G 358 5/06	Exponencial	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Lognormal	0,0217	0,0059	0,0228	0,0680	
		Normal	0,5649	0,0	0,0	0,0	
		Weibull	0,0468	0,0	0,0036	0,000004	
	G 358 7/06	Exponencial	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Lognormal	0,00556	0,073128	0,0022	0,8468	
		Normal	0,30643	0,387787	0,0001	0,2547	
		Weibull	0,57798	0,044785	0,0007	0,2899	
	G 359 3/06	Exponencial		0,0316	0,0021	0,0002	0,0032
		Lognormal		0,3385	0,0162	0,0678	0,1577
		Normal		0,3385	0,5495	0,6521	0,0321
		Weibull		0,3385	0,8614	0,6004	0,0321
G 359 7/06	Exponencial		0,0	0,0			
	Lognormal		0,0562	0,2873			
	Normal		0,8232	0,0749			
	Weibull		0,6928	0,0749			
Michelin	Xze 2 8/06	Exponencial	0,0	0,0	0,0029	0,1353	
		Lognormal	0,0220	0,00002	0,4918		
		Normal	0,5759	0,0027	0,00003		
		Weibull	0,4501	0,0138	0,1408		
	Xzu 2 7/06	Exponencial	0,0	0,0	0,0001		
		Lognormal	0,1870	0,0667	0,0662		
		Normal	0,4936	0,5125	0,0080		
		Weibull	0,4235	0,5125	0,0080		

FONTE: O autor (2011)

A partir dos valores-p obtidos é possível verificar que os dados não se ajustam adequadamente aos modelos de probabilidade propostos. Isto indica que a adoção de um enfoque paramétrico não descreve adequadamente os dados. Assim optou-se pela utilização do estimador não-paramétrico de Kaplan-Maier para a obtenção das funções de confiabilidade a serem utilizadas.

#### 4.3 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para pneus novos

O gráfico da figura 42, a seguir, mostra as curvas das funções de confiabilidade para os diferentes tipos de pneus novos cujos dados estavam

disponíveis para estudo. Pela observação das curvas pode ser verificado que o pneu Michelin Xzu 7/06 apresenta maior confiabilidade do que os demais e que o pneu Goodyear G 358 7/06 tem a menor confiabilidade. Como o p-valor, obtido através do teste *log-rank* entre os cinco pneus, é igual a zero, pode-se optar pela existência de diferença estatística significativa entre os cinco pneus que fizeram parte do estudo.

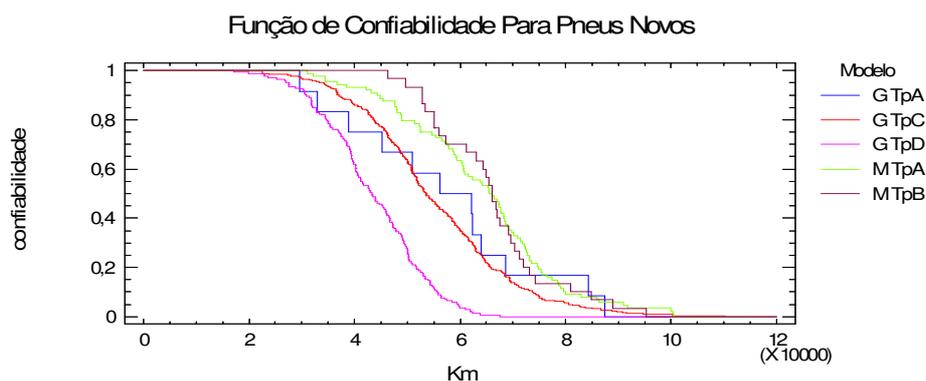


FIGURA 42 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA PNEUS NOVOS  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpA indica pneu Goodyear G 291 3/06  
 G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06  
 G TpD indica pneu Goodyear G 358 7/06  
 M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06  
 M TpB indica pneu Michelin Xzu 2 7/06

Os valores das estatísticas descritivas da quilometragem rodada por cada um dos modelos de pneu quando novos estão registrados abaixo:

TABELA 13 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA POR CADA MODELO DE PNEU NOVO

Marca/Modelo	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Goodyear G 291 3/06	12	29489	87509	56871	5339
Goodyear G 358 5/06	262	19833	110064	55229	893
Goodyear G 358 7/06	171	17166	67448	43353	744
Michelin Xze 2 8/06	88	31063	100414	64029	1608
Michelin Xzu 2 7/06	30	46290	95347	66014	2089

FONTE: O autor (2011)

A fim de verificar os modelos de pneus que possuem função de confiabilidade distintas foram feitas comparações de dois em dois através do teste *log-rank* que forneceu os resultados a seguir na tabela 14.

TABELA 14 – P-VALOR DO TESTE *LOG-RANK* ENTRE CADA MODELO DE PNEU NOVO

<b>Comparação entre pneus novos</b>	<b>p-valor</b>
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 358 5/06	0,53998
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 358 7/06	0,00005
Goodyear G 291 3/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,32136
Goodyear G 291 3/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,20337
Goodyear G 358 5/06 x Goodyear G 358 7/06	0,00000
Goodyear G 358 5/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,00003
Goodyear G 358 5/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,00449
Goodyear G 358 7/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,00000
Goodyear G 358 7/06 x Michelin Xzu 2 7/06	$1,11 \times 10^{-16}$
Michelin Xze 2 8/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,84907

FONTE: O autor (2011)

Com base nos p-valores obtidos pode-se verificar que o pneu Goodyear G 358 7/06 apresenta diferença significativa quando comparado com todos os demais o que leva à concluir que no estudo este modelo apresentou menor performance que os demais cuja comparação de grupos a partir do teste *log-rank* não apresentou evidência de diferença significativa entre os modelos estudados. O gráfico da função risco acumulado é apresentado adiante no qual pode ser visualizado que o pneu Goodyear G 358 7/06 tem maior risco de falha do que os demais. O mesmo gráfico, associado ao p-valor de cada comparação, mostra que os pneus da marca Michelin têm uma confiabilidade maior que os demais, especialmente o modelo Xzu 2 7/06. Contudo, através do p-valor, pode ser verificado que não existe diferença significativa entre os pneus da marca Michelin e o pneu Goodyear G 291 3/06, que têm uma média de quilometragem menor.

Face aos resultados é possível afirmar que pneus novos da marca Michelin, modelos Xze 2 8/06 e Xze 2 7/06 são melhores que os outros pneus que fizeram parte do estudo comparativo.

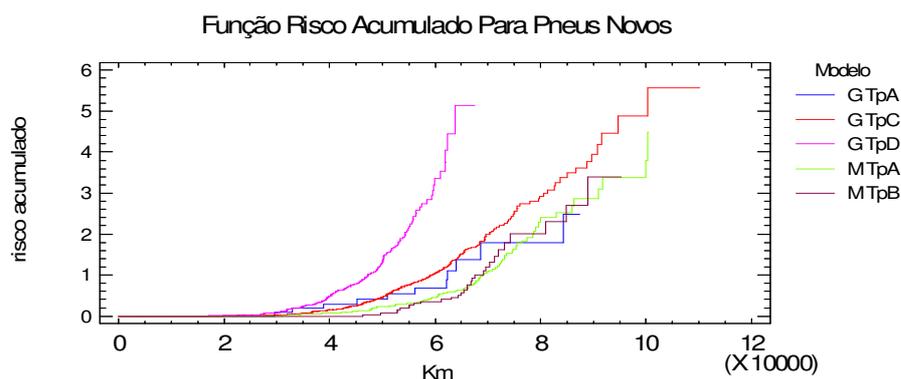


FIGURA 43 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS NOVOS  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpA indica pneu Goodyear G 291 3/06  
 G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06  
 G TpD indica pneu Goodyear G 358 7/06  
 M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06  
 M TpB indica pneu Michelin Xzu 2 7/06

Corroborando os resultados teóricos esperados o pneu Goodyear G 358 7/06, que tem menor confiabilidade apresenta a maior função de risco, significando que este modelo de pneu tem menor performance do que os demais modelos que fizeram parte do estudo.

#### 4.4 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para pneus que sofreram uma recapagem

O gráfico apresenta as funções de confiabilidade para os pneus após a primeira recapagem. O p-valor ( $7,35938 \times 10^{-10}$ ), obtido através do teste *log-rank* entre os seis modelos de pneus, aponta para a existência de diferenças estatísticas significativas entre os modelos. Sendo que os pneus Goodyear G 291 3/06 e Michelin Xze 2 8/06 e Xzu 2 7/06 foram os que apresentaram maior confiabilidade após a primeira recapagem e os modelos Goodyear G 359 3/06, Goodyear G 291 3/06 e Goodyear G 358 5/06 têm a menor confiabilidade.

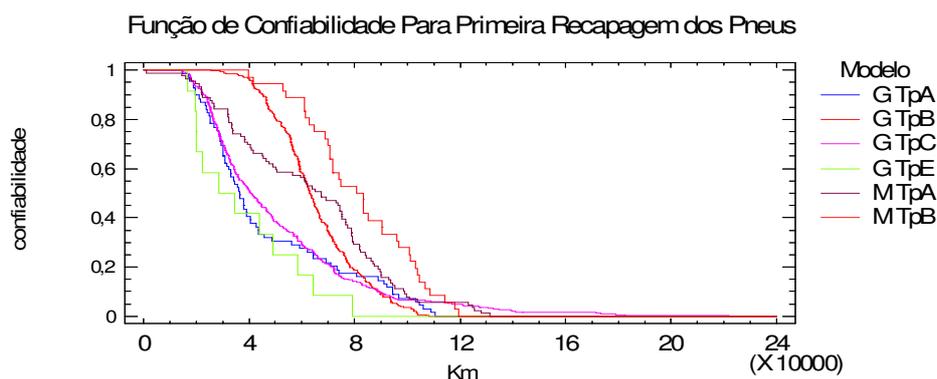


FIGURA 44 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA PNEUS QUE SOFRERAM UMA RECAPAGEM

FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpA indica pneu Goodyear G 291 3/06

G TpB indica pneu Goodyear G 291 7/06

G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06

G TpE indica pneu Goodyear G 359 3/06

M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06

M TpB indica pneu Michelin Xzu 2 7/06

A tabela 15, adiante, apresenta os valores das estatísticas descritivas para os pneus após a primeira recapagem.

TABELA 15 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA POR CADA MODELO DE PNEU APÓS PRIMEIRA RECAPAGEM

Marca/Modelo	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Goodyear G 291 3/06	69	15038	110692	47038	3303
Goodyear G 291 7/06	286	25519	108117	65128	977
Goodyear G 358 5/06	355	3017	221672	50690	1679
Goodyear G 359 3/06	12	16703	79364	38101	5997
Michelin Xze 2 8/06	89	947	131351	62865	3212
Michelin Xzu 2 7/06	36	39921	119507	81717	3531

FONTE: O autor (2011)

A fim de efetuar a comparação entre cada um dos tipos de pneus envolvidos no estudo foi efetuado o teste *log-rank* cujos p-valores estão na tabela adiante:

TABELA 16 – P-VALOR DO TESTE *LOG-RANK* ENTRE CADA MODELO DE PNEU APÓS PRIMEIRA RECAPAGEM

Comparação entre pneus com uma recapagem	p-valor
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 291 7/06	0,02152
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 358 5/06	0,42719
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 359 3/06	0,18620
Goodyear G 291 3/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,00512
Goodyear G 291 3/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,00001
Goodyear G 291 7/06 x Goodyear G 358 5/06	0,00000
Goodyear G 291 7/06 x Goodyear G 359 3/06	$5,41 \times 10^{-10}$
Goodyear G 291 7/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,03551
Goodyear G 291 7/06 x Michelin Xzu 2 7/06	$5,03 \times 10^{-7}$
Goodyear G 358 5/06 x Goodyear G 359 3/06	0,08854
Goodyear G 358 5/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,00326
Goodyear G 358 5/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,00004
Goodyear G 359 3/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,00048
Goodyear G 359 3/06 x Michelin Xzu 2 7/06	$4,27 \times 10^{-9}$
Michelin Xze 2 8/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,07660

FONTE: O autor (2011)

Através da análise do p-valor das comparações pode-se perceber que não existem diferenças significativas entre os modelos de pneus Goodyear G 291 3/06, Goodyear G 358 5/06 e Goodyear G 359 3/06 que pertencem ao grupo com menor confiabilidade. Da mesma forma não se verificam diferenças significativas entre os pneus Michelin Xze 2 8/06A e Michelin Xzu 2 7/06B que pertencem ao grupo com confiabilidade mais elevada. Na sequência é apresentado o gráfico da função risco acumulado.

Em face

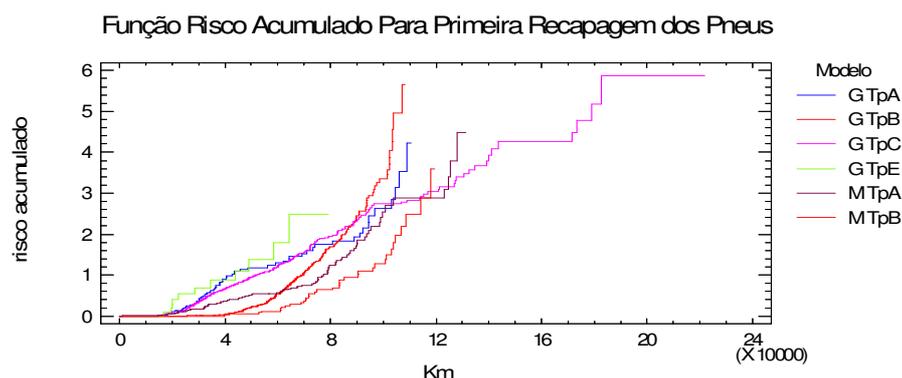


FIGURA 45 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS QUE SOFRERAM UMA RECAPAGEM

FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpA indica pneu Goodyear G 291 3/06

G TpB indica pneu Goodyear G 291 7/06

G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06

G TpE indica pneu Goodyear G 359 3/06

M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06

M TpB indica pneu Michelin Xzu 2 7/06

A partir do conjunto de resultados é possível verificar que os pneus da marca Michelin apresentam a melhor performance tanto quanto novos como após a primeira recapagem.

#### 4.5 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para pneus que sofreram duas recapagens

Em relação aos pneus que foram submetidos à segunda recapagem, é possível verificar que os pneus Goodyear G 359 3/06, Goodyear G 358 5/06 e Goodyear G 291 3/06 obtiveram uma confiabilidade maior que os demais. Isso vai de encontro ao resultado obtido para os mesmos modelos após a primeira recapagem enquanto os demais modelos, que apresentavam melhores performances quando novos, e após a primeira recapagem tiveram uma confiabilidade menor. Porém a função de risco acumulado apresenta um crescimento mais acentuado indicando que tais modelos têm uma maior probabilidade de falha. A verificação do teste *log-rank* para os seis modelos estudados apontou um p-valor (0,00039) que refuta a hipótese de igualdade entre os modelos.

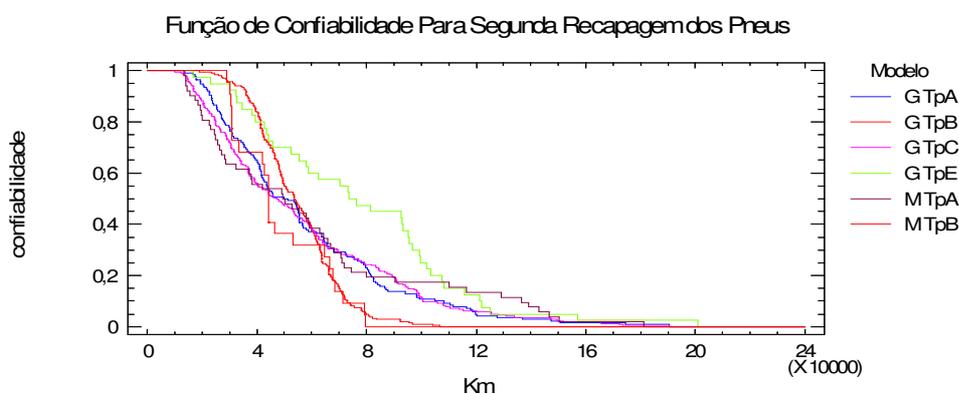


FIGURA 46 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA PNEUS QUE SOFRERAM DUAS RECAPAGENS

FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpA indica pneu Goodyear G 291 3/06  
 G TpB indica pneu Goodyear G 291 7/06  
 G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06  
 G TpE indica pneu Goodyear G 359 3/06  
 M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06  
 M TpB indica pneu Michelin Xzu 2 7/06

O antagonismo entre as funções de confiabilidade do pneus de primeira e segunda recapagem pode encontrar justificativa no fato de que as empresas de transporte, em geral, colocam os pneus de qualidade inferior para rodar em pavimentos com melhores condições o que exige menores esforços dos pneus. Na cidade de Curitiba as empresas de transporte coletivo enfrentam situações de pavimento e carga (volume de passageiros) bastante heterogêneas. Sendo que as regiões onde os pavimentos são mais prejudicados são justamente aquelas mais distantes do anel central da cidade nas quais a carga é maior. Além disso um veículo não faz sempre a mesma rota

A seguir é apresentada a tabela com as principais estatísticas descritivas dos modelos de pneus estudados.

TABELA 17 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA POR CADA MODELO DE PNEU APÓS SEGUNDA RECAPAGEM

<b>Marca/Modelo</b>	<b>n</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
Goodyear G 291 3/06	140	13705	190499	57686	2859
Goodyear G 291 7/06	211	18927	106924	54719	1065
Goodyear G 358 5/06	222	10138	190668	56486	2433
Goodyear G 359 3/06	40	16606	200923	77866	6175
Michelin Xze 2 8/06	52	13561	181072	58833	5961
Michelin Xzu 2 7/06	22	28932	79747	48849	3671

FONTE: O autor (2011)

A fim de verificar qual o relacionamento existente entre cada um dos modelos na terceira recapagem foi efetuado o teste *log-rank* entre cada um dos modelos que participaram do estudo. Os resultados do teste podem ser verificados na tabela a seguir.

TABELA 18 - P-VALOR DO TESTE *LOG-RANK* ENTRE CADA MODELO DE PNEU APÓS SEGUNDA RECAPAGEM

<b>Comparação entre pneus com duas recapagens</b>	<b>p-valor</b>
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 291 7/06	0,00904
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 358 5/06	0,89710
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 359 3/06	0,00576
Goodyear G 291 3/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,77324
Goodyear G 291 3/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,12684
Goodyear G 291 7/06 x Goodyear G 358 5/06	0,01580
Goodyear G 291 7/06 x Goodyear G 359 3/06	$3,0 \times 10^{-9}$
Goodyear G 291 7/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,00904
Goodyear G 291 7/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,31387
Goodyear G 358 5/06 x Goodyear G 359 3/06	0,00515
Goodyear G 358 5/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,60970
Goodyear G 358 5/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,18300
Goodyear G 359 3/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,09738
Goodyear G 359 3/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,00007
Michelin Xze 2 8/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,28766

FONTE: O autor (2011)

Após a segunda recapagem verifica-se uma homogeneidade maior entre os diferentes modelos estudados, notadamente entre os modelos Goodyear G 291 3/06A x Goodyear G 358 5/06C, Goodyear G 291 3/06A x Michelin Xze 2 8/06A, Goodyear G 291 3/06A x Michelin Xzu 2 7/06B, Goodyear G 291 7/06B x Michelin Xzu 2 7/06B, Goodyear G 358 5/06C x Michelin Xze 2 8/06A, Goodyear G 358 5/06C x Michelin Xzu 2 7/06B, Goodyear G 359 3/06E x Michelin Xze 2 8/06 e Michelin Xze 2 8/06A x Michelin Xzu 2 7/06B

Na análise verifica-se que os pneus Goodyear G 291 7/06B x Michelin Xzu 2 7/06B que até a primeira recapagem tinham maior confiabilidade, tiveram sua confiabilidade diminuída simultaneamente após a segunda recapagem. Cumpre lembrar que a recapagem apenas refaz a superfície de borracha que reveste a estrutura do pneu sem interferir nas condições desta estrutura. O fato dos pneus que vinham apresentando maior confiabilidade terem a diminuição da mesma pode estar relacionado com as diferenças de qualidade entre a borracha que reveste os pneus novos dos diferentes modelos e também a diferença de qualidade existente na estrutura destes pneus. Como esta estrutura não sofre melhorias ao longo da vida do pneu isto compromete a performance dos pneus após as recapagens pois apesar da borracha que reveste o pneu estar nova a estrutura que a suporta tem como tempo de vida toda a quilometragem acumulada pelo uso do pneu.

A função risco acumulado é apresenta a seguir na figura 47, adiante.

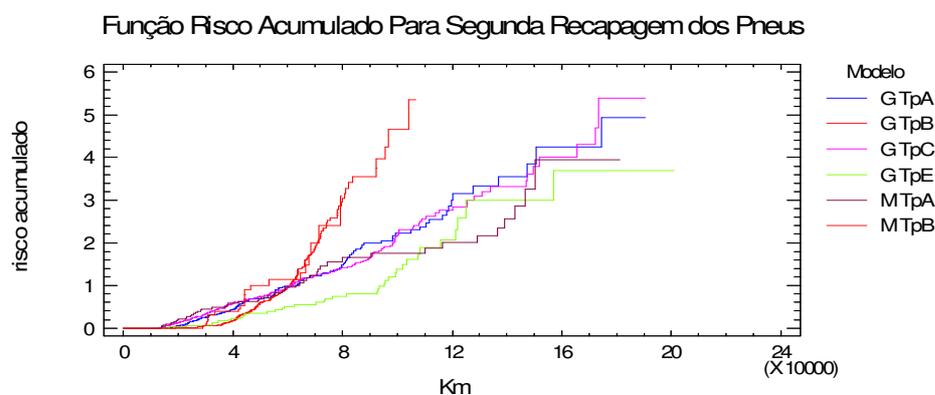


FIGURA 47 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS QUE SOFRERAM DUAS RECAPAGENS

FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpA indica pneu Goodyear G 291 3/06

G TpB indica pneu Goodyear G 291 7/06

G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06

G TpE indica pneu Goodyear G 359 3/06

M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06

M TpB indica pneu Michelin Xzu 2 7/06

Após a segunda recapagem os pneus Michelin apresentaram um desempenho menor do que o pneu Goodyear G 359 3/06, que não figurou entre os pneus com maior confiabilidade quando submetidos à primeira recapagem, este modelo não tinha dados disponíveis para o teste de comparação entre pneus novos.

## 4.6 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para pneus que sofreram três recapagens

Após a terceira recapagem apesar de existirem diferenças absolutas entre as médias na ordem de doze mil setecentos e onze quilômetros as funções de confiabilidade dos diferentes modelos não apresentam diferenças estatisticamente diferentes, o que pode ser verificado pela análise do p-valor (0,09941) obtido pelo teste *log-rank*. Os pneus da marca Michelin ainda apresentam, visualmente, funções de confiabilidade maiores que as demais, pelo menos nos primeiros dez mil quilômetros. Porém apenas 12,7% dos pneus novos apresentaram dados na terceira recapagem enquanto que 20,2% dos pneus novos do modelo G 358 5/06 apresentaram dados relativos a terceira recapagem.

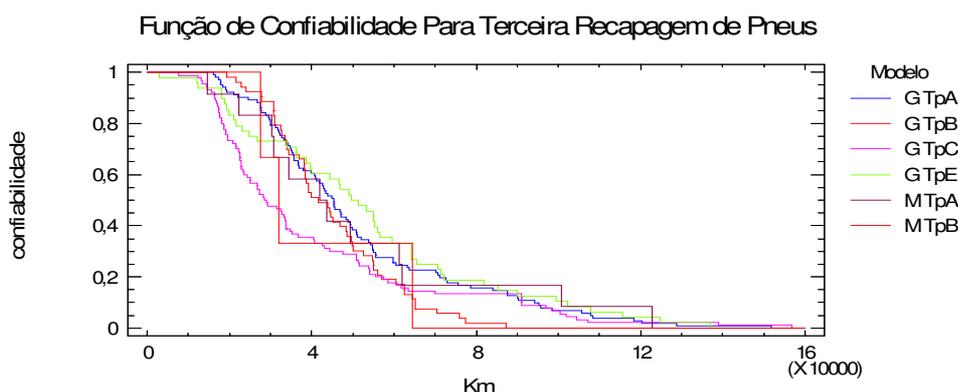


FIGURA 48 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA PNEUS QUE SOFRERAM TRÊS RECAPAGENS

FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpA indica pneu Goodyear G 291 3/06

G TpB indica pneu Goodyear G 291 7/06

G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06

G TpE indica pneu Goodyear G 359 3/06

M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06

M TpB indica pneu Michelin Xzu 2 7/06

A performance de cada modelo é resumida a partir das estatísticas descritivas constantes da tabela 19, adiante.

TABELA 19 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA POR CADA MODELO DE PNEU APÓS TERCEIRA RECAPAGEM

Marca/Modelo	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Goodyear G 291 3/06	101	16131	151777	51727	2750
Goodyear G 291 7/06	53	19353	87328	44942	2099
Goodyear G 358 5/06	90	7720	156730	40630	3171
Goodyear G 359 3/06	48	3047	136886	53341	4528
Michelin Xze 2 8/06	12	14546	122780	51168	9227
Michelin Xzu 2 7/06	3	27637	64449	41394	11599

FONTE: O autor (2011)

Como o teste *log-rank* efetuado para os seis modelos de pneus revelou que existe evidência estatística de igualdade entre ele este fato deve ser analisado através da comparação entre cada um dos modelos, conforme a tabela 20.

TABELA 20 - P-VALOR DO TESTE LOG-RANK ENTRE CADA MODELO DE PNEU APÓS TERCEIRA RECAPAGEM

Comparação entre pneus com três recapagens	p-valor
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 291 7/06	0,056603
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 358 5/06	0,019939
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 359 3/06	0,539321
Goodyear G 291 3/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,928637
Goodyear G 291 3/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,440644
Goodyear G 291 7/06 x Goodyear G 358 5/06	0,439998
Goodyear G 291 7/06 x Goodyear G 359 3/06	0,015707
Goodyear G 291 7/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,316005
Goodyear G 291 7/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,672052
Goodyear G 358 5/06 x Goodyear G 359 3/06	0,035919
Goodyear G 358 5/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,274336
Goodyear G 358 5/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,853176
Goodyear G 359 3/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,457686
Goodyear G 359 3/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,689404
Michelin Xze 2 8/06 x Michelin Xzu 2 7/06	0,735172

Fonte: O autor (2011)

A partir do p-valor obtido em cada comparação observa-se que existem diferenças estatisticamente significativas apenas entre os modelos Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 358 5/06 e Goodyear G 291 7/06 x Goodyear G 359 3/06, sendo que as comparações entre os demais modelos não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Após a terceira recapagem os pneus estudados apresentaram comportamentos bastante semelhantes.

A função risco acumulado é apresentada adiante:

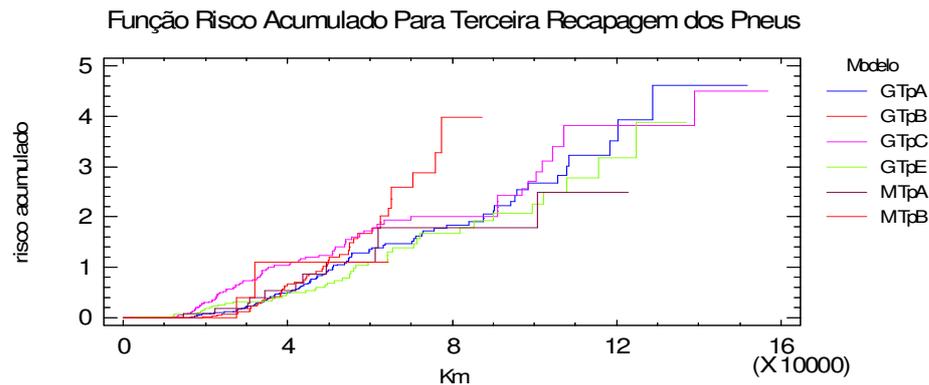


FIGURA 49 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS QUE SOFRERAM TRÊS RECAPAGENS  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpA indica pneu Goodyear G 291 3/06  
 G TpB indica pneu Goodyear G 291 7/06  
 G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06  
 G TpE indica pneu Goodyear G 359 3/06  
 M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06  
 M TpB indica pneu Michelin Xzu 2 7/06

#### 4.7 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para pneus que sofreram mais de três recapagens

Situação análoga aos pneus com três recapagens ocorre também para pneus que sofreram mais de três recapagens, nas quais o teste *log-rank* resulta um p-valor (0,0606) que indica pela não rejeição da hipótese de igualdade entre os modelos estudados, todavia assim como foi feito para pneus com três recapagens é interessante verificar se existem diferenças modelo a modelo. Os resultados da comparação modelo a modelo revelam a existência de diferenças estatísticas significativas entre eles, notadamente quando o pneu Goodyear 359 3/06, que teve a maior média de rodagem, está envolvido na comparação.

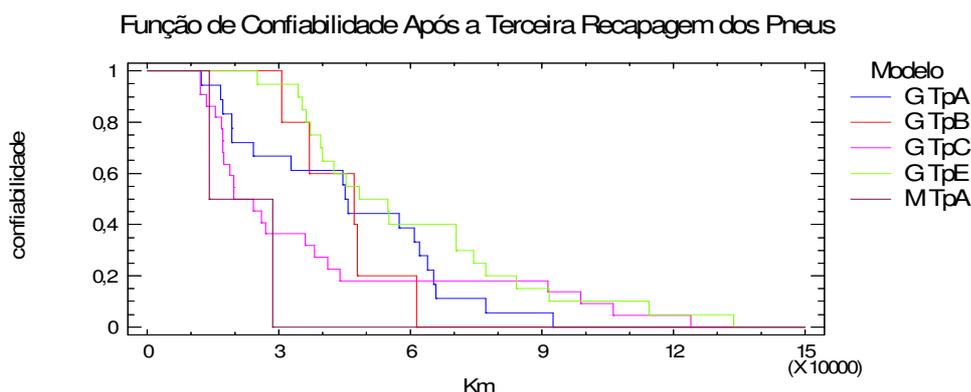


FIGURA 50 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA PNEUS QUE SOFRERAM MAIS DE TRÊS RECAPAGENS

FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpA indica pneu Goodyear G 291 3/06

G TpB indica pneu Goodyear G 291 7/06

G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06

G TpE indica pneu Goodyear G 359 3/06

M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06

As estatísticas descritivas efetuadas entre os modelos são apresentadas na tabela 21 a seguir. Na sequência é apresentada a figura 51 onde se visualiza o gráfico com a função risco acumulado para os diferentes modelos de pneus que realizaram mais de três recapagens.

TABELA 21 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA POR CADA MODELO DE PNEU APÓS MAIS DE TRÊS RECAPAGENS

Marca/Modelo	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Goodyear G 291 3/06	18	12381	92524	45727	3929
Goodyear G 291 7/06	5	30712	61431	44842	3504
Goodyear G 358 5/06	22	12128	124049	38069	5071
Goodyear G 359 3/06	20	25116	133779	60536	4502
Michelin Xze 2 8/06	2	14090	28489	21290	4157

FONTE: O autor (2011)

Na tabela 22, adiante, podem ser vistos cada p-valor resultante do teste de *log-rank* entre os modelos participantes do estudo:

TABELA 22 - P-VALOR DO TESTE *LOG-RANK* ENTRE CADA MODELO DE PNEU APÓS MAIS DE TRÊS RECAPAGENS

Comparação entre pneus com mais de três recapagem	p-valor
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 291 7/06	0,494153
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 358 5/06	0,612418
Goodyear G 291 3/06 x Goodyear G 359 3/06	0,145737
Goodyear G 291 3/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,058580
Goodyear G 291 7/06 x Goodyear G 358 5/06	0,454439
Goodyear G 291 7/06 x Goodyear G 359 3/06	0,146897
Goodyear G 291 7/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,008225
Goodyear G 358 5/06 x Goodyear G 359 3/06	0,042469
Goodyear G 358 5/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,612418
Goodyear G 359 3/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,000015

FONTE: O autor (2011)

A partir de cada p-valor encontrado pode-se concluir que a maior parte dos modelos não difere em confiabilidade após a terceira recapagem. Pelos valores obtidos verifica-se a existência de diferença estatística significativa na comparação entre os modelos:

- Goodyear G 291 3/06 e Michelin Xze 2 8/06;
- Goodyear G 291 7/06 e Michelin Xze 2 8/06;
- Goodyear G 358 5/06 e Goodyear G 359 3/06;
- Goodyear G 358 5/06 x Michelin Xze 2 8/06.

Após as análises efetuadas é possível concluir que o pneu Goodyear G 359 3/06 tem a maior confiabilidade após terem sido efetuadas mais do que três recapagens.

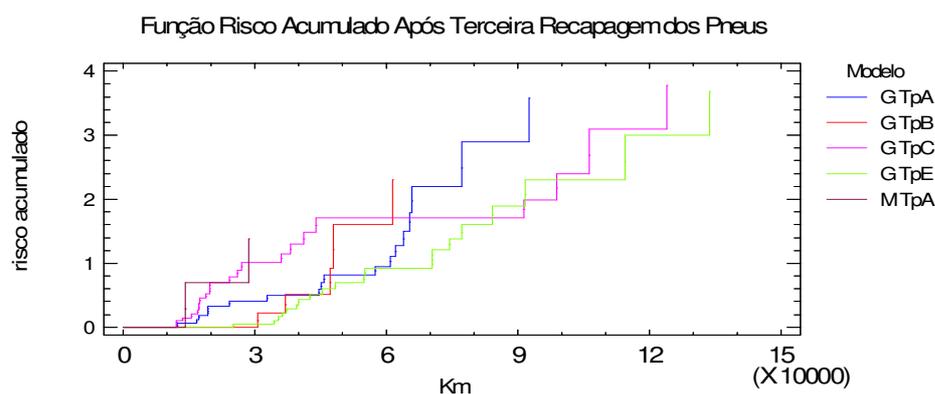


FIGURA 51 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS QUE SOFRERAM MAIS DE TRÊS RECAPAGENS

FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpA indica pneu Goodyear G 291 3/06

G TpB indica pneu Goodyear G 291 7/06

G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06

G TpE indica pneu Goodyear G 359 3/06

M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06

#### 4.8 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 291 3/06

Observando a curva da função de confiabilidade do pneu Goodyear G 291 3/06 verifica-se que existe grande semelhança entre as curvas representativas das funções de confiabilidade referentes às vidas (fases) em que os pneus foram utilizados o que é corroborado pelo p-valor (0,05762) obtido na comparação entre as quatro fases. Contudo é importante investigar o resultado da comparação entre as fases de uso duas a duas.

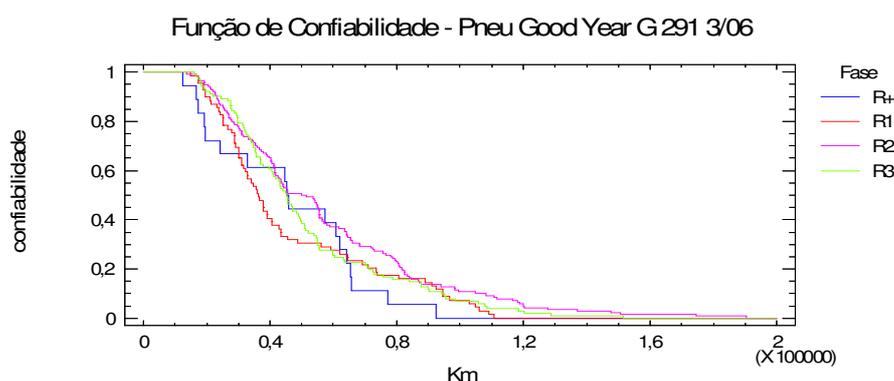


FIGURA 52 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 291 3/06  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

R+ indica mais de três recapagens do pneu

A tabela 23, adiante, apresenta os valores das estatísticas descritivas das quilometragens, em seguida.

TABELA 23 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 291 3/06

Fase	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Pneu novo	0	-	-	=	-
Primeira recapagem	69	15038	110692	47038	3303
Segunda recapagem	140	13705	190499	57686	2859
Terceira recapagem	101	16131	151777	51727	2750
Mais de 3 recapagens	18	12381	92524	45727	5637

FONTE: O autor (2011)

A tabela 24, adiante, contém os resultados do p-valor resultante da comparação entre as diversas fases de uso do modelo estudado.

TABELA 24 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 291 3/06

fases comparadas	p-valor
primeira recapagem x segunda recapagem	0,01671
primeira recapagem x terceira recapagem	0,22062
primeira recapagem x mais de três recapagens	0,65383
segunda recapagem x terceira recapagem	0,14081
segunda recapagem x mais de três recapagens	0,11079
terceira recapagem x mais de três recapagens	0,48673

FONTE: O autor (2011)

Verificando-se o p-valor obtido em cada uma das comparações observa-se a evidência de diferença estatística significativa entre as funções de confiabilidade da primeira recapagem e da segunda recapagem.

A figura 53, a seguir, apresenta o gráfico da função risco para as diferentes fases de uso dos pneus.

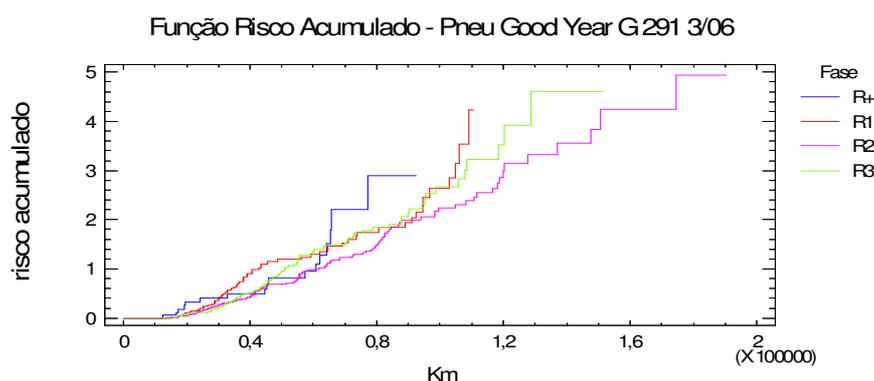


FIGURA 53 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 291 3/06  
FONTE: O autor (2011)

Onde: R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

R+ indica mais de três recapagens do pneu

O pneu Goodyear G 291 3/06 apresenta média de quilometragem após a segunda recapagem superior à média de quilometragem após a primeira recapagem, este valor decresce após a terceira recapagem e as demais.

#### 4.9 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 291 7/06

O gráfico a seguir apresenta as funções de confiabilidade para o Pneu Goodyear g 291 7/06. No gráfico podem ser visualizadas três curvas: primeira, segunda e terceira recapagens. Este modelo de pneu não tinha dados disponíveis para o estado novo.

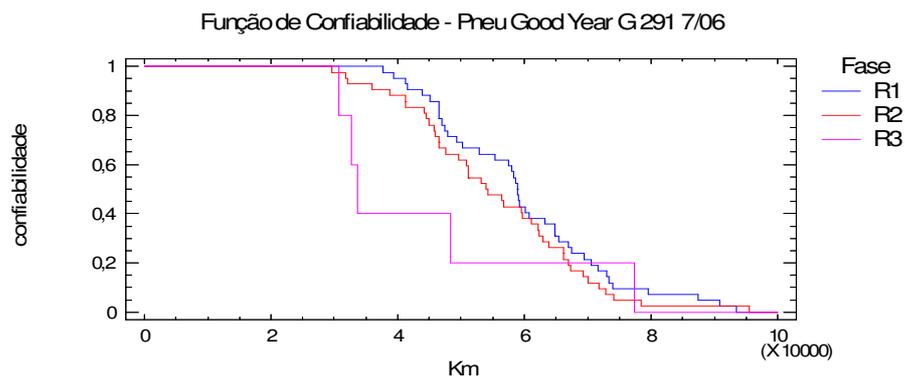


FIGURA 54 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 291 7/06  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

No gráfico observa-se que existe uma diferenciação entre as funções de confiabilidade entre as recapagens. As curvas mostram que a confiabilidade é maior na primeira recapagem e menor na terceira. O teste *log-rank* retornou um p-valor (0,37957) que indica que não existe evidência estatística para considerar a existência de diferenças entre as funções de confiabilidade para

as recapagens efetuadas no pneu. Porém é conveniente investigar o resultado do teste quando as fases são comparadas duas a duas.

As estatísticas descritivas para este modelo de pneu são apresentadas a seguir:

TABELA 25 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 291 7/06

Fase	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Pneu novo	0	-	-	-	-
Primeira recapagem	42	37648	93548	59618	2114
Segunda recapagem	42	29560	95484	55342	2149
Terceira recapagem	5	30771	77431	44588	8786

FONTE: O autor (2011)

Os valores obtidos para o p-valor entre as diversas comparações, conforme tabela 26, a seguir, indicam a não existência de diferença estatística significativa entre as diversas fases de uso do pneu Goodyear G 291 7/06

TABELA 26 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 291 7/06

fases comparadas	p-valor
primeira recapagem x segunda recapagem	0,338506
primeira recapagem x terceira recapagem	0,191741
segunda recapagem x terceira recapagem	0,455176

FONTE: O autor (2011)

Função Risco Acumulado - Pneu Good Year G 291 7/06

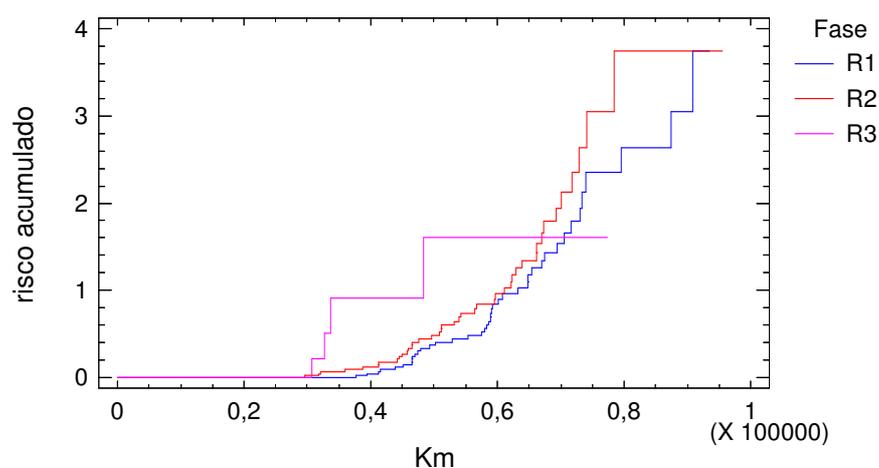


FIGURA 55 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 291 3/06  
FONTE: O autor (2011)

Onde: R1 indica primeira recapagem do pneu  
 R2 indica segunda recapagem do pneu  
 R3 indica terceira recapagem do pneu

A função risco acumulado mostra que o risco é maior para pneus nos quais foram efetuadas três recapagens e menor naqueles em que foi efetuada apenas uma recapagem.

Assim é possível concluir que, como esperado, a performance deste do pneu Goodyear G 291 3/06 é decrescente conforme se efetuam novas recapagens.

#### 4.10 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 358 5/06

A seguir é apresentado o gráfico que contém as funções de confiabilidade para o modelo de pneu Goodyear G 358 5/06. No gráfico podem ser visualizadas as funções de confiabilidade para o modelo de pneu estudado nas diversas fases de uso: novo, após primeira, segunda e terceira recapagens e mais de três recapagens.

O valor do p-valor (0,00011) obtido pelo teste *log-rank* aponta para a existência de diferença estatística entre o desempenho dos pneus nas diversas fases.

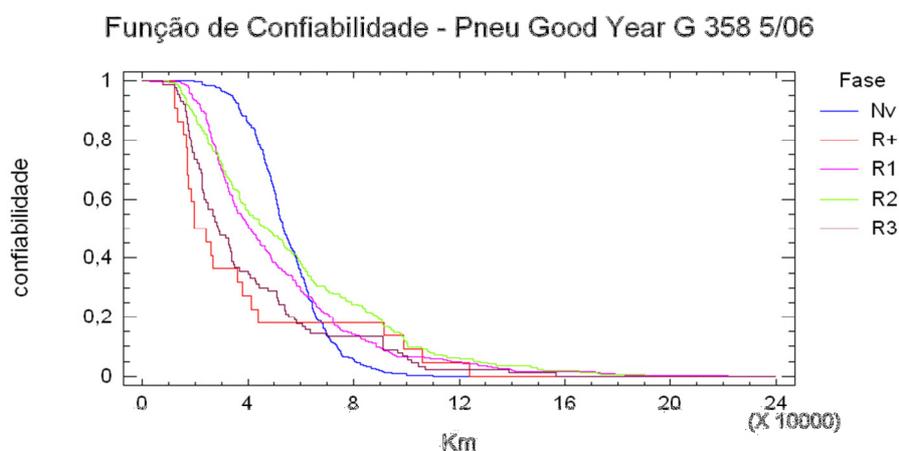


FIGURA 56 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 358 5/06  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: Nv indica pneu novo

R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

R+ indica mais de três recapagens do pneu

A seguir são apresentadas as medidas estatísticas relacionadas ao modelo de pneu Goodyear G 358 5/06:

TABELA 27 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 358 5/06

<b>Fase</b>	<b>n</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
Pneu novo	262	19833	110065	55229	893
Primeira recapagem	355	3017	221672	50690	1679
Segunda recapagem	222	10138	190668	56486	2434
Terceira recapagem	90	7720	156730	40630	3171
Mais de 3 recapagens	22	12128	124049	38069	7256

FONTE: O autor (2011)

Face a diferença existente entre as funções de confiabilidade, conforme indicada pelo teste log-rank este teste foi repetido entre cada uma das fases de uso do pneu obtendo os seguintes resultados:

TABELA 28 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 358 5/06

<b>fases comparadas</b>	<b>p-valor</b>
pneu novo x primeira recapagem	0,481153
pneu novo x segunda recapagem	0,005367
pneu novo x terceira recapagem	0,009536
pneu novo x mais de 3 recapagens	0,604151
primeira recapagem x segunda recapagem	0,037048
primeira recapagem x terceira recapagem	0,004869
primeira recapagem x mais de três recapagens	0,058047
segunda recapagem x terceira recapagem	0,000171
segunda recapagem x mais de três recapagens	0,015333
terceira recapagem x mais de três recapagens	0,641470

FONTE: O autor (2011)

Através do p-valor obtido em cada uma das fases comparadas é possível ver que estatisticamente a mudança de performance do modelo de pneu estudado é mais evidente a partir da segunda recapagem, não existindo diferença estatística significativa entre o pneu novo e o pneu que sofreu uma

recapagem. Esta diferença também se evidencia entre a primeira recapagem e a segunda recapagem e entre a segunda e a terceira recapagens. Após a terceira recapagem não foi encontrada diferença estatística significativa com o pneu recapado mais de três vezes. Todavia o teste *log-rank* afastou a possibilidade de diferença estatisticamente significativa entre pneus novos e pneus recapados mais de três vezes. Este fato, diferente do esperado, pode encontrar respaldo na prática, já mencionada, entre as empresas de transporte em geral de submeter pneus com mais recapagens a situações de uso mais favoráveis quanto a pavimento e carga.

Em seguida é apresentada a função risco acumulado que mostra um risco maior para pneus novos.

Função Risco Acumulado - Pneu Good Year G 358 5/06

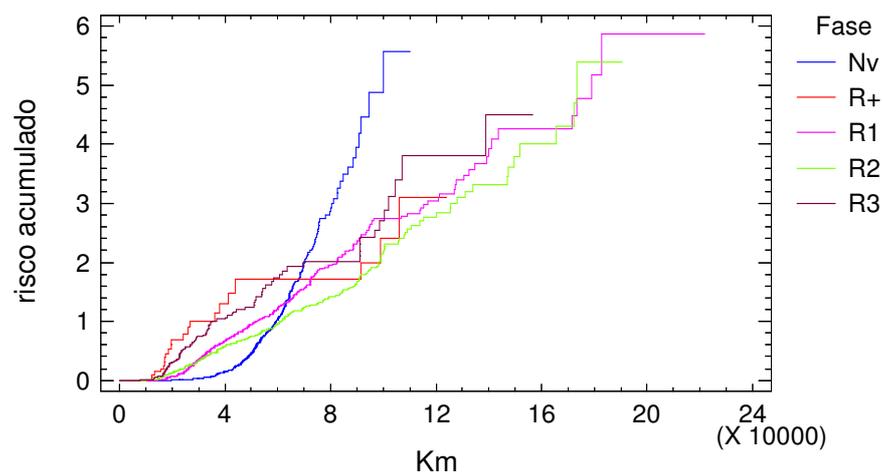


FIGURA 57 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 358 5/06  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: Nv indica pneu novo

R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

R+ indica mais de três recapagens do pneu

A partir dos resultados apurados verifica-se que o pneu Goodyear G 358 5/06, quando novo, tem alta confiabilidade até sessenta mil quilômetros sendo

que após esta quilometragem a confiabilidade para o modelo, no caso de pneus novos, é maior para pneus com duas recapagens.

#### 4.11 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 358 7/06

A análise das funções de confiabilidade para pneus Goodyear G 358 7/06 apresenta uma curva com picos de uso entre os pneus novos. A existência destes picos apresenta para estes pneus um comportamento irregular sendo que a curva da função de confiabilidade para pneus que sofreram uma recapagem tem um comportamento mais regular, da mesma forma que as curvas relativas aos pneus que sofreram um número maior de recapagens.

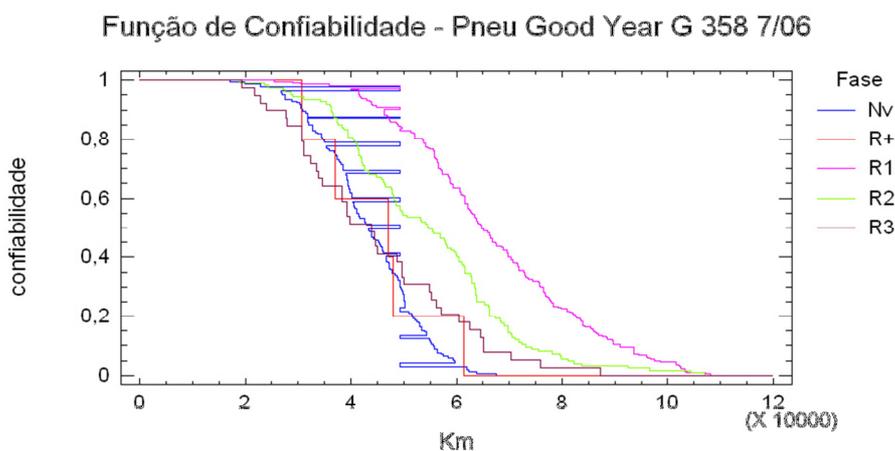


FIGURA 58 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 358 7/06  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: Nv indica pneu novo

R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

R+ indica mais de três recapagens do pneu

A tabela 29, a seguir, apresenta as medidas estatísticas para este modelo de pneu.

TABELA 29 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 358 7/06

Fase	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Pneu novo	171	17166	67448	43353	744
Primeira recapagem	222	25519	108117	67093	1142
Segunda recapagem	125	18927	106924	54688	1471
Terceira recapagem	39	19353	87328	44810	2588
Mais de 3 recapagens	5	30712	61431	44842	5256

FONTE: O autor (2011)

O p-valor ( $<0,00001$ ) obtido pelo teste *log-rank* apresentou a existência de diferenças estatísticas significativas entre as funções de confiabilidade nas diversas fases de uso dos pneus. Como foi constatada esta diferença estatística entre as fase de uso dos pneus foi efetuada a investigação entre as fases de uso dos pneus para localização da fase em que a diferença se manifesta.

TABELA 30 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 358 7/06

fases comparadas	p-valor
pneu novo x primeira recapagem	$<0,00001$
pneu novo x segunda recapagem	$4,4 \times 10^{-16}$
pneu novo x terceira recapagem	0,02270
pneu novo x mais de três recapagens	0,70682
primeira recapagem x segunda recapagem	$7,6 \times 10^{-9}$
primeira recapagem x terceira recapagem	$1,29 \times 10^{-14}$
primeira recapagem x mais de três recapagens	0,00001
segunda recapagem x terceira recapagem	0,00411
segunda recapagem x mais de três recapagens	0,05809
terceira recapagem x mais de três recapagens	0,69767

FONTE: O autor (2011)

A partir do p-valor obtido em cada comparação verifica-se que a diferença estatística se verifica já entre pneus novos e pneus em primeira recapagem. Esta diferença também se verifica nas demais comparações exceto para pneus em terceira recapagem e mais de três recapagens e entre os pneus novos e pneus com mais de três recapagens. A inexistência de diferença estatística entre os pneus com três e mais de três recapagens é compreensível pelo fato de poucos pneus terem condições de serem recapados mais de 3 vezes e, neste caso, a situação dos mesmos pode estar comprometida. Um questionamento importante deve ser levantado em relação aos pneus novos e

pneus com mais de três recapagens que tiveram funções de confiabilidade sem diferença de evidência estatística entre elas o que pode, possivelmente, ser considerado como consequência das condições de uso a que são submetidos pneus novos e pneus com mais de três recapagens.

A função risco acumulado mostra que os pneus novos podem falhar antes mesmo dos pneus que rodam com recapagens.

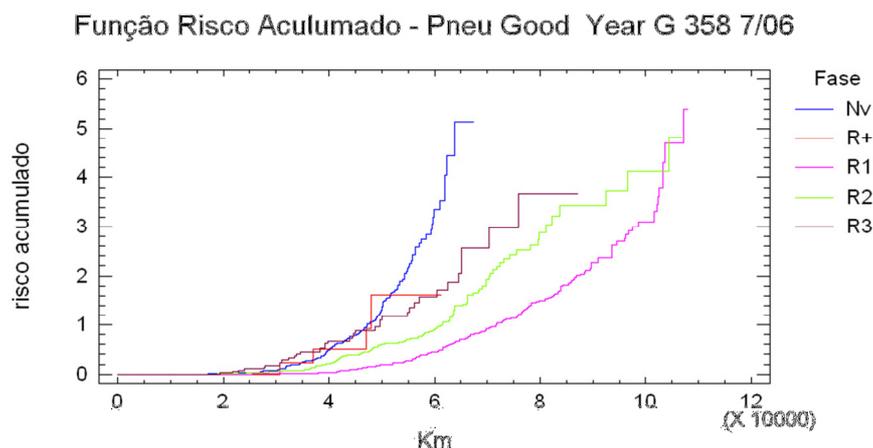


FIGURA 59 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 358 7/06  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: Nv indica pneu novo

R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

R+ indica mais de três recapagens do pneu

O modelo Goodyear G 358 7/06 apresenta média de quilometragem maior após a primeira recapagem, também o risco que este modelo apresenta é menor depois de efetuada uma recapagem.

#### 4.12 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 359 3/06

O estudo elaborado com pneus Goodyear G 359 3/06 evidencia através do p-valor (0,00052), obtido a partir do teste *log-rank*, a existência de diferenças entre as fases em que os pneus foram utilizados. A figura das funções de confiabilidade apresenta a confiabilidade de pneus submetidos à

segunda recapagem maior do que a confiabilidade de pneus que sofreram apenas uma recapagem.

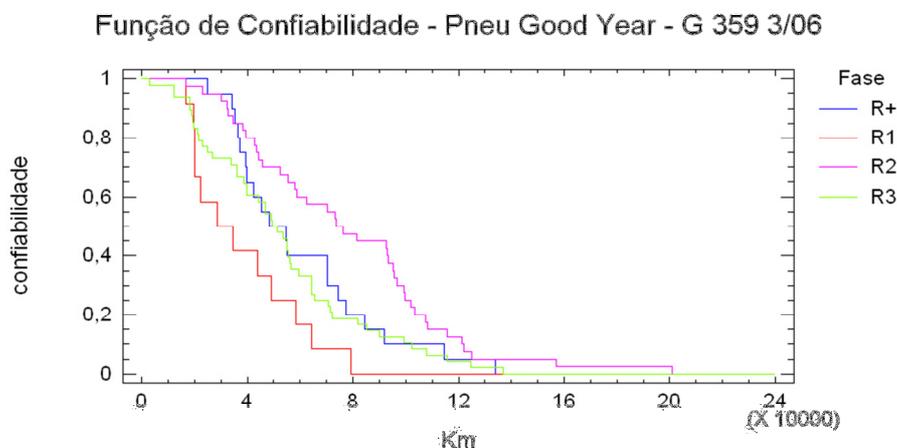


FIGURA 60 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 359 3/06  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

R+ indica mais de três recapagens do pneu

As estatísticas descritivas relativas ao pneu Goodyear G 359 3/06 estão relacionadas na tabela a seguir. Este modelo de pneu não apresentou dados relativos a pneus novos para o estudo.

TABELA 31 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 359 3/06

Fase	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Pneu novo	-	-	-	-	-
Primeira recapagem	12	16703	79364	38101	5997
Segunda recapagem	40	16606	200923	77866	6175
Terceira recapagem	48	3047	136886	53341	4528
Mais de 3 recapagens	20	25116	133779	60535	6450

FONTE: O autor (2011)

A fim de investigar a origem da diferença entre as recapagens dos pneus foi elaborado o teste *log-rank* entre as fases de uso do modelo de pneu analisado e os resultados transcritos na tabela seguinte:

TABELA 32 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 359 3/06

fases comparadas	p-valor
primeira recapagem x segunda recapagem	0,00003
primeira recapagem x terceira recapagem	0,06946
primeira recapagem x mais de três recapagens	0,02462
segunda recapagem x terceira recapagem	0,00565
segunda recapagem x mais de três recapagens	0,06944
terceira recapagem x mais de três recapagens	0,63339

FONTE: O autor (2011)

Observando o p-valor encontrado em cada comparação verifica-se que a diferença estatística entre as funções de confiabilidade já se evidencia entre a primeira e a segunda recapagem, persistindo entre a segunda e terceira recapagens e deixando de ser apresentada entre a terceira e mais de três recapagens. O teste mostrou a inexistência de diferença estatisticamente significativa entre pneus com uma recapagem e pneus com mais de três recapagens. Convém registrar que nenhuma dos pneus novos cujos dados estão disponíveis para o estudo sofreu mais de três recapagens e os pneus que sofreram mais de três recapagens, cujos dados estavam disponíveis para o teste, não tinham registro da quilometragem que rodaram quando novos.

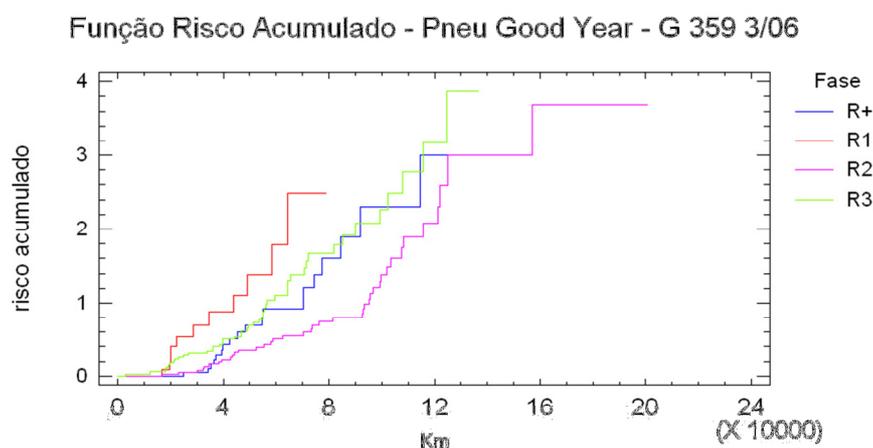


FIGURA 61 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 359 3/06  
FONTE: O autor (2011)

Onde: R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

R+ indica mais de três recapagens do pneu

O modelo Goodyear G 359 3/06 apresenta maior confiabilidade e menor risco acumulado após ter sido submetido a duas recapagens, também nesta situação apresenta a maior média de quilometragem rodada.

#### 4.13 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Goodyear G 359 7/06

No desenvolvimento do estudo comparativo entre as fases de uso dos pneus deste modelo foi aplicado o teste *log-rank* que evidenciou a existência de diferenças estatísticas significativas a partir do p-valor (0,02263) obtido através do teste. Para desenvolvimento deste estudo comparativo estavam disponíveis dados relativos a pneus com uma, duas e três recapagens. As estatísticas descritivas das fases de uso do modelo de pneus estão apresentadas na tabela 33, a seguir:

TABELA 33 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 359 7/06

Fase	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Pneu novo	-	-	-	-	-
Primeira recapagem	22	31077	70089	55818	2179
Segunda recapagem	44	26134	92240	54213	2145
Terceira recapagem	9	36943	62542	45712	3044
Mais de 3 recapagens					

FONTE: O autor (2011)

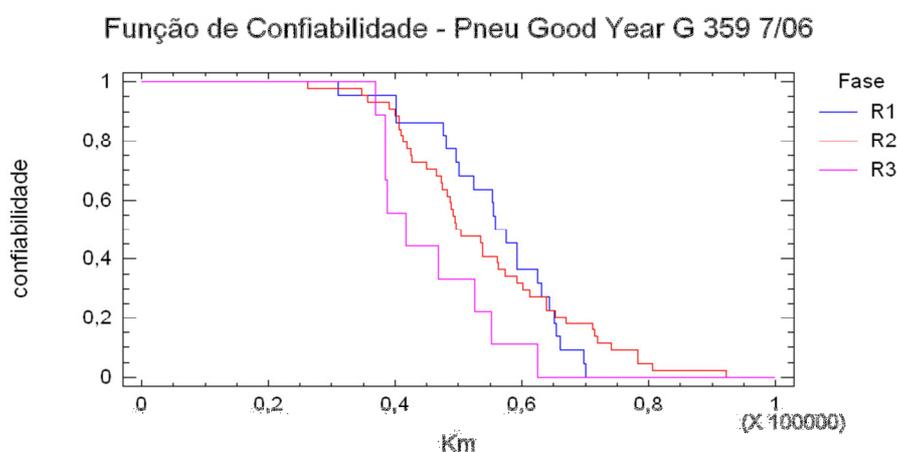


FIGURA 62 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU GOODYEAR G 359 7/06  
FONTE: O autor (2011)

Onde: R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

A existência de diferença estatisticamente significativa entre as três fases de vida do modelo estudado não indica claramente em qual fase a diferença se manifestou. A fim de identificar esta situação procede-se ao teste *log-rank* entre cada uma das fases e avalia-se, em cada comparação, o p-valor cujos resultados estão na tabela:

TABELA 34 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU GOODYEAR G 359 7/06

fases comparadas	p-valor
primeira recapagem x segunda recapagem	0,77923
primeira recapagem x terceira recapagem	0,00369
segunda recapagem x terceira recapagem	0,0238

FONTE: O autor (2011)

A partir da avaliação do p-valor entre as fases verifica-se que a diferença encontrada acontece entre a segunda e terceira recapagens o que acarreta, naturalmente, a existência de diferença significativa entre a primeira e terceira recapagens.

Abaixo é apresentada a função risco acumulado para o modelo de pneus estudado.

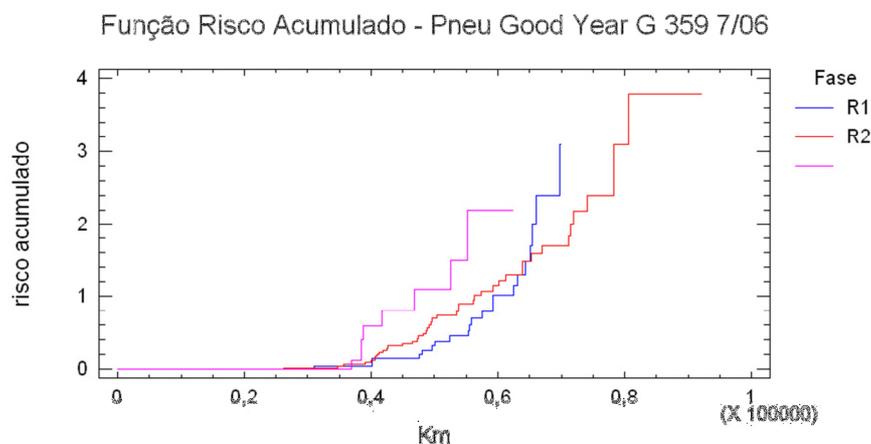


FIGURA 63 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU GOODYEAR G 359 7/06  
FONTE: O autor (2011)

Onde: R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

Pode ser afirmado que o pneu Goodyear G 359 3/06 tem decréscimo significativo em sua performance após ter sofrido três recapagens.

#### 4.14 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Michelin Xze 2 8/06

A comparação das funções de confiabilidade referentes às diversas fases do pneu Michelin Xze 2 8/06 apresentam diferenças estatísticas significativas o que pode ser verificado a partir do p-valor (0,000101494). A seguir estão relacionadas Às principais medidas estatísticas referentes às fases em estudo:

TABELA 35 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU MICHELIN Xze 2 8/06

Fase	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Pneu novo	100	29489	100414	63170	1561
Primeira recapagem	89	947	131351	62865	3212
Segunda recapagem	52	13561	181072	58833	5961
Terceira recapagem	11	14546	122780	51169	9227
Mais de 3 recapagens	2	14090	28489	21290	71200

FONTE: O autor (2011)

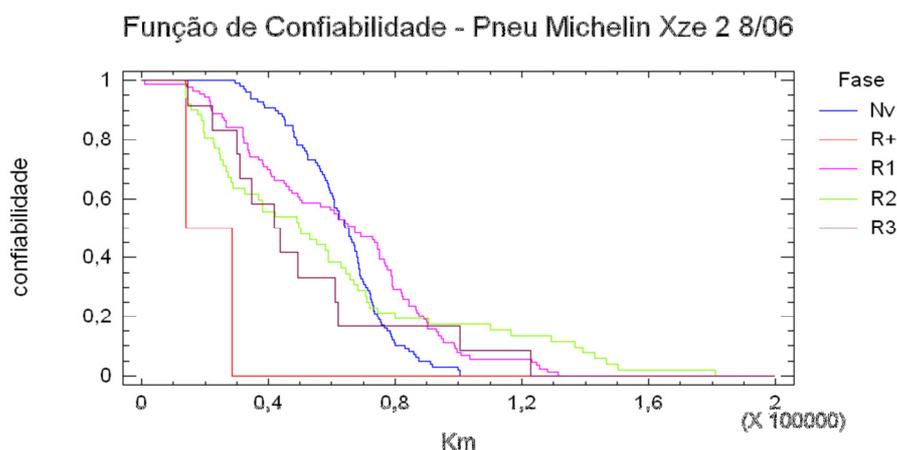


FIGURA 64 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU MICHELIN Xze 2 8/06

FONTE: O autor (2011)

Onde: Nv indica pneu novo

R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

R+ indica mais de três recapagens do pneu

Visto ter sido encontrada diferença estatisticamente significativa entre as fases de uso do pneu, é necessário desenvolver a investigação a fim de verificar entre quais das fases ocorreu esta diferença. Tal investigação foi conduzida a partir da aplicação do teste *log-rank* sendo que o p-valor de cada comparação efetuada encontra-se transcrito na tabela a seguir:

TABELA 36 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU MICHELIN Xze 2 8/06

<b>fases comparadas</b>	<b>p-valor</b>
pneu novo x primeira recapagem	0,01338
pneu novo x segunda recapagem	0,70448
pneu novo x terceira recapagem	0,91811
pneu novo x mais de três recapagens	<0,00001
primeira recapagem x segunda recapagem	0,90765
primeira recapagem x terceira recapagem	0,29844
primeira recapagem x mais de três recapagens	0,00010
segunda recapagem x terceira recapagem	0,39668
segunda recapagem x mais de três recapagens	0,04114
terceira recapagem x mais de três recapagens	0,06829

FONTE: O autor (2011)

Através da avaliação do p-valor obtido em cada comparação verifica-se que o pneu com mais de três recapagens apresenta diferença estatisticamente significativa quando comparado com pneus novos e de primeira recapagem e segunda recapagem revelando a ausência desta diferença estatisticamente significativa quando comparados com pneus de terceira recapagem. Contudo o estudo descartará tais comparações visto o tamanho reduzido (2 elementos) da amostra de pneus com mais de três recapagens. Desenvolvendo o estudo com as fases remanescentes verifica-se que existe diferença estatisticamente significativa entre pneus novos e pneus com uma recapagem, contudo tal diferença não se verifica entre a primeira e as demais recapagens sofridas pelos pneus.

### Função Risco Acumulado - Pneu Michelin Xze 2 8/06

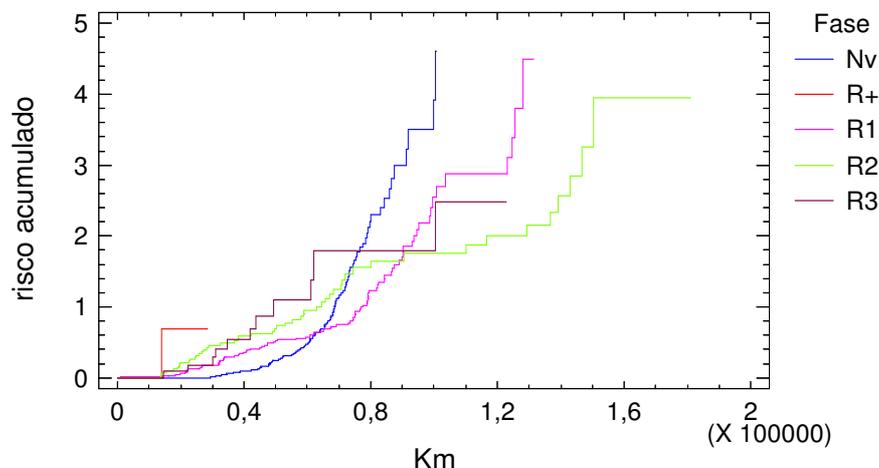


FIGURA 65 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU MICHELIN Xze 2 8/06  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: Nv indica pneu novo

R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

R+ indica mais de três recapagens do pneu

Em relação ao pneu Michelin Xze 2 8/06 pode ser afirmado que o mesmo apresenta excelente performance quando novo, porém ao receber recapagens esta performance sofre uma degradação acentuada. É conveniente comentar que as conclusões envolvendo pneus que sofreram três recapagens e pneus que sofreram mais de três recapagens devem ser consideradas com reserva em face da pequena quantidade de elementos remanescentes na amostra.

#### 4.15 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para o pneu Michelin Xzu 2 7/06

A seguir são apresentadas as estatísticas descritivas para a quilometragem desenvolvida pelo pneu Michelin Xzu 2 7/06 nas fases de vida cujos dados encontravam-se disponíveis para o estudo.

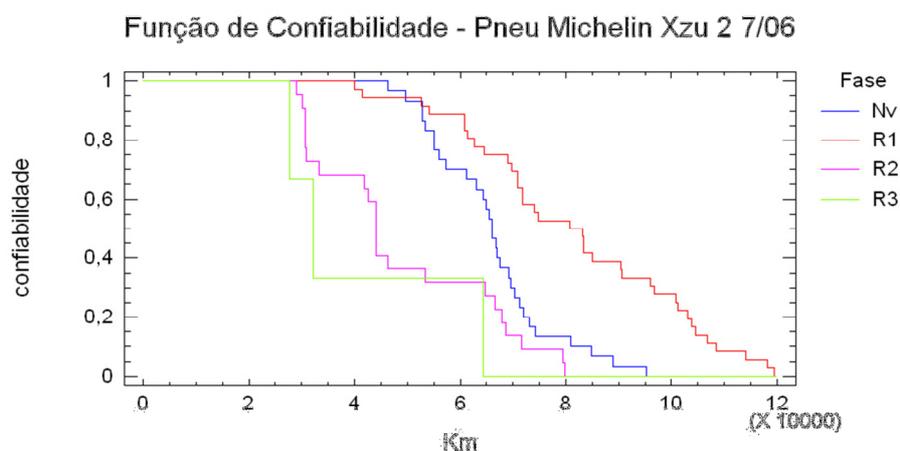


FIGURA 66 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA O PNEU MICHELIN Xzu 2 7/06  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: Nv indica pneu novo

R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

O aspecto da curva obtida mostra que existe uma diferença aparente entre as funções de confiabilidade nas diferentes fases de vida do pneu estudado, o que é confirmado pelo p-valor ( $2,442 \times 10^{-10}$ ) obtido na comparação entre todas as funções de confiabilidade. A tabela 37, em seguida, apresenta os valores das estatísticas descritivas da quilometragem do pneu Michelin Xzu 2 7/06 nas diversas fases.

TABELA 37 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DO PNEU MICHELIN Xzu 2 7/06

Fase	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Pneu novo	30	46290	95347	66014	2089
Primeira recapagem	36	39921	119507	81717	3531
Segunda recapagem	22	28932	79747	48849	3671
Terceira recapagem	3	27637	64449	41394	11599
Mais de 3 recapações	0	-	-	-	-

FONTE: O autor (2011)

Em vista da diferença apontada segue-se o estudo com a comparação entre as funções de confiabilidade duas a duas através do teste *log-rank* cujos valores apurados são indicados na tabela 38, a seguir:

TABELA 38 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DO PNEU MICHELIN Xzu 2 7/06

fases comparadas	p-valor
pneu novo x primeira recapagem	0,00004
pneu novo x segunda recapagem	0,00538
pneu novo x terceira recapagem	0,00386
primeira recapagem x segunda recapagem	$1,46 \times 10^{-8}$
primeira recapagem x terceira recapagem	0,00003
segunda recapagem x terceira recapagem	0,23249

FONTE: O autor (2011)

O valor apurado para o p-valor em cada uma das comparações evidencia a existência de diferença estatística significativa entre as diversas fases de vida do pneu, sendo sensível a diferença já a partir da primeira recapagem. Esta diferença deixa de ser significativa entre pneus que sofreram a segunda e a terceira recapagens.

A seguir é apresentada a função risco acumulado para o pneu Michelin Xzu 2 7/06.

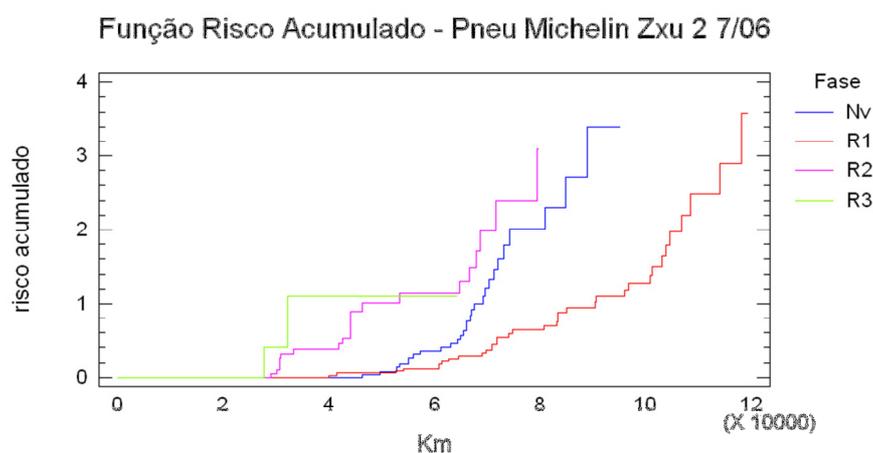


FIGURA 67 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA O PNEU MICHELIN Xzu 2 7/06

FONTE: O autor (2011)

Onde: Nv indica pneu novo

R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

O pneu Michelin Xzu 2 7/06 apresenta maior confiabilidade e menor risco após a primeira recapagem porém a diferença entre as curvas das funções de

confiabilidade traçadas para o modelo apontam para uma redução de performance bastante significativa após as recapagens sofridas pelo pneu.

#### 4.16 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para todos os pneus

As estatísticas descritivas da quilometragem rodada pelos pneus revelam os resultados apresentados na tabela 39, a seguir:

TABELA 39 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM RODADA NAS FASES DE VIDA DE TODOS OS PNEUS

Fase	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Pneu novo	563	17166	110064	53607	643
Primeira recapagem	847	947	221672	57687	955
Segunda recapagem	687	10138	200923	57365	1201
Terceira recapagem	307	3047	156730	47432	1584
Mais de 3 recapagens	67	12128	133779	46838	3600

FONTE: O autor (2011)

Este estudo foi conduzido com o objetivo de de comparar a função de confiabilidade entre todos os pneus nas diferentes fases de vida dos mesmos, obtendo o seguinte gráfico:

Função de Confiabilidade - Pneus Novos e Recapados

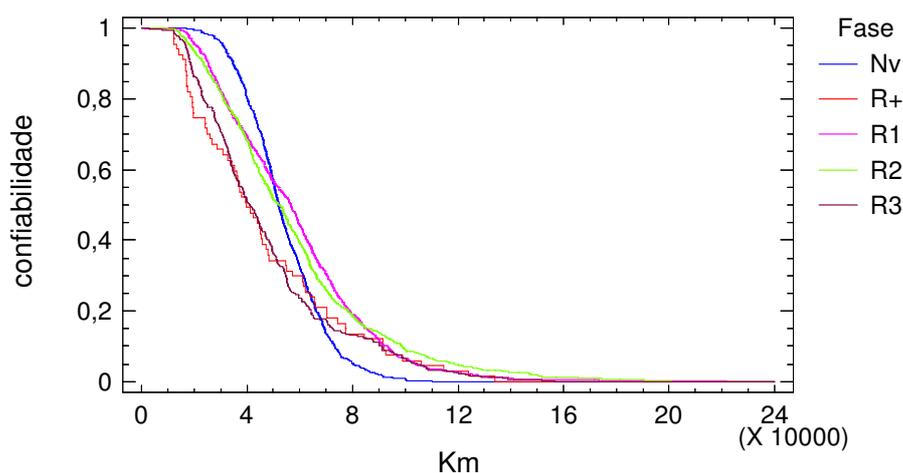


FIGURA 68 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA TODOS OS PNEUS

FONTE: O autor (2011)

Onde: Nv indica pneu novo

R1 indica primeira recapagem do pneu

- R2 indica segunda recapagem do pneu
- R3 indica terceira recapagem do pneu
- R+ indica mais de três recapagens do pneu

Pelo gráfico visualiza-se que no início da vida dos pneus os pneus novos têm confiabilidade maior que os pneus recapados, situação que se inverte após os pneus terem quilometragem superior a 50.000 km. O p-valor ( $0,377 \times 10^{-11}$ ), obtido pelo teste *log-rank*, evidencia a existência de diferença estatisticamente significativa entre as funções de confiabilidade

TABELA 40 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE AS FASES DE VIDA DE TODOS OS PNEUS

<b>fases comparadas</b>	<b>p-valor</b>
pneu novo x primeira recapagem	$1,57 \times 10^{-10}$
pneu novo x segunda recapagem	0,000002
pneu novo x terceira recapagem	0,274461
pneu novo x mais de três recapagens	0,578455
primeira recapagem x segunda recapagem	0,859395
primeira recapagem x terceira recapagem	0,000002
primeira recapagem x mais de três recapagens	0,019479
segunda recapagem x terceira recapagem	0,000003
segunda recapagem x mais de três recapagens	0,013368
terceira recapagem x mais de três recapagens	0,964056

FONTE: O autor (2011)

Os valores obtidos indicam a existência de diferenças estatísticas significativas entre pneus novos e pneus com uma recapagem e com duas recapagens, esta diferença deixa de ser significativa quando compara-se pneus novos e pneus com três ou com mais de três recapagens. Também não houve evidência de diferença estatística significativa entre pneus com uma recapagem e pneus com duas recapagens.

A seguir é apresentada a função risco acumulado para todos os pneus nas diferentes fases de uso.

### Função Risco Acumulado - Pneus Novos e Recapados

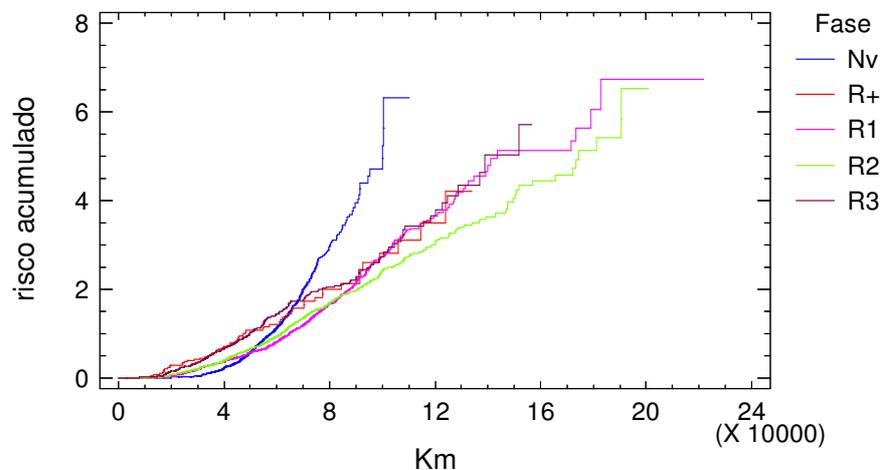


FIGURA 69 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA TODOS OS PNEUS  
 FONTE: O autor (2011)

Onde: Nv indica pneu novo

R1 indica primeira recapagem do pneu

R2 indica segunda recapagem do pneu

R3 indica terceira recapagem do pneu

R+ indica mais de três recapagens do pneu

Dos resultados apurados é nítido que a confiabilidade é maior para pneus novos apenas em torno de 50000 km sendo ultrapassada pela confiabilidade de pneus recapados após esta marca. Sendo menor até mesmo que a confiabilidade de pneus com três recapagens ou mais depois de rodados mais de 70000 km.

#### 4.17 Estatísticas Descritivas e Função de Confiabilidade para Quilometragem Total de Pneus Que Sofreram Três Recapagens

Os pneus Goodyear G 358 5/06, Goodyear G 358 7/06, Michelin Xze 2 8/06 e Michelin Xzu 2 7/06 tiveram algumas unidades que sofreram três recapagens. A quilometragem total destas unidades foi obtida. E, a partir da mesma, encontrou-se a função de confiabilidade para os modelos de pneu citados, bem como o p-valor resultante da comparação entre os quatro

modelos, e também resultante da comparação modelo a modelo, bem como as estatísticas descritivas da quilometragem total rodada por cada modelo em estudo, estes resultados estão na tabela 41.

TABELA 41 - VALORES DAS ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DA QUILOMETRAGEM TOTAL RODADA NAS TRÊS PRIMEIRAS FASES DE VIDA DOS PNEUS

Marca/Modelo	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Goodyear G 358 5/06	55	107830	297387	172174	5230
Goodyear G 358 5/06	31	151118	246573	199140	4732
Michelin Xze 2 8/06	12	108418	327287	205807	20828
Michelin Xzu 2 7/06	1	202282	202282	202282	0

FONTE: O autor (2011)

### Função de Confiabilidade - Quilometragem Total - Todos os Pneus

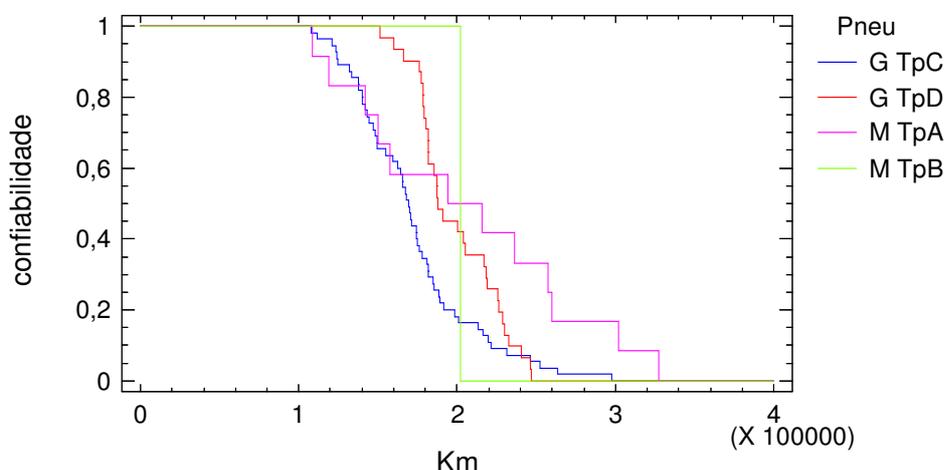


FIGURA 70 – FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE PARA QUILOMETRAGEM TOTAL DE PNEUS COM TRÊS RECAPAGENS

FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06

G TpD indica pneu Goodyear G 358 7/06

M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06

M TpB indica pneu Michelin Xzu 2 7/06

Observando as funções percebe-se que há uma diferença visual entre as funções de confiabilidade. Esta diferença é confirmada pelo p-valor (0,00970) obtido pelo teste *log-rank* entre os quatro modelos. Contudo o modelo Michelin Xzu 7/06 tem apenas uma unidade na amostra. Para estabelecer uma relação de comparação entre os modelos participantes do estudo o dado relativo ao modelo citado foi desconsiderado e forão efetuadas comparações entre os

outros três modelos a fim de investigar a existência de diferenças estatisticamente significativas, sendo o p-valor resultante de cada aplicação do teste *log-rank* indicado na tabela 42, abaixo:

TABELA 42 – P-VALOR REFERENTE À COMPARAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE ENTRE A QUILOMETRAGEM TOTAL DE PNEUS COM TRÊS RECAPAGENS

modelos comparados	p-valor
Goodyear G 358 5/06 x Goodyear G 358 7/06	0,022163
Goodyear G 358 5/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,078462
Goodyear G 358 7/06 x Michelin Xze 2 8/06	0,18956

FONTE: O autor (2011)

A análise do p-valor obtido pelas comparações feitas revela diferença estatisticamente significativa apenas entre os pneus Goodyear G 358 5/06 e Goodyear G 358 7/06, entre o modelo Michelin Xze 2 8/06 e os pneus Goodyear G 358 5/06 e G 358 7/06 não foram encontradas diferenças significativas.

A seguir apresenta-se a figura 71 na qual pode ser visto o gráfico com as funções risco acumulado para os modelos participantes do estudo.

Função Risco Acumulado - Quilometragem Total - Todos os Pneus

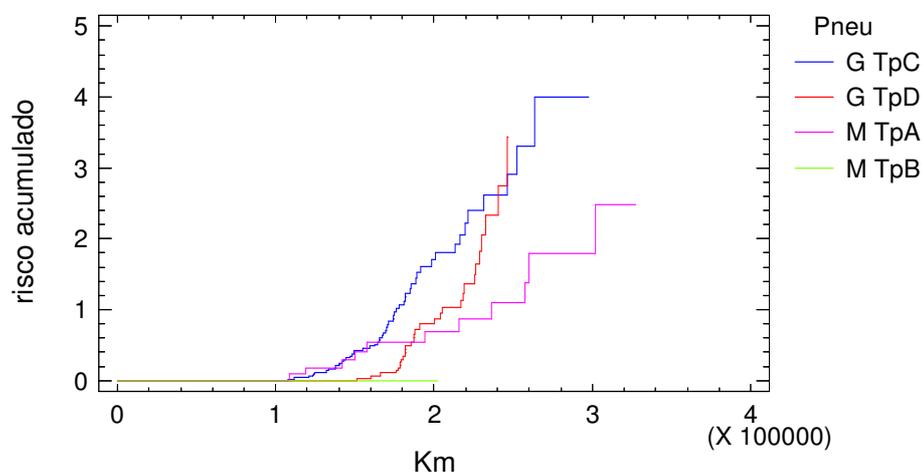


FIGURA 71 – FUNÇÃO RISCO ACUMULADO PARA PNEUS COM TRÊS RECAPAGENS  
FONTE: O autor (2011)

Onde: G TpC indica pneu Goodyear G 358 5/06

G TpD indica pneu Goodyear G 358 7/06

M TpA indica pneu Michelin Xze 2 8/06

M TpB indica pneu Michelin Xzu 2 7/06

Em face dos resultados pode-se verificar que o pneu Michelin Xze 2 8/06 é um pneu que ainda apresenta confiabilidade significativa após 190.000 km (considerando todas as recapagens) revelando ser um pneu durável, mediante a conveniente realização de manutenções (recapagens) ao longo de sua vida útil.

## 5 Conclusão

Neste trabalho foram apresentados os principais conceitos relativos à Confiabilidade e as ferramentas estatísticas que fornecem os resultados que servem de embasamento à tomada de decisões.

A contribuição apresentada neste trabalho é a verificação da existência de diferenças de performances entre os modelos de pneus estudados.

Através dos dados relativos a estes modelos foram comparadas as funções de confiabilidade de pneus novos e com várias recapagens. Esta comparação forneceu resultados consistentes indicando a existência de diferenças de performances tanto entre pneus das marcas Michelin e Goodyear como entre os modelos de pneus da mesma Goodyear.

Os resultados foram mais favoráveis à marca Michelin, os pneus da marca Goodyear apresentaram-se mais duráveis, sobrevivendo a um número maior de recapagens que os pneus da marca concorrente.

Assim, a indicação de qual marca e modelo deve ser adquirido é uma ação que deve levar em conta os objetivos da empresa transportadora. Se a empresa desejar um pneu com maior capacidade inicial de rodagem (pneu novo) seguramente os pneus da marca Michelin são os indicados. Todavia, se a política da empresa for pela aquisição de pneus que apresentem menor probabilidade de sucateamento deve optar pela marca Goodyear.

Ao fazer a opção pela marca adequada à sua necessidade a empresa deve optar pelo modelo mais adequado no atendimento dessa necessidade. O modelo Xzu 2 7/06 da marca Michelin apresentou melhor desempenho que o modelo Xze 2 8/06, da mesma marca. Em relação aos pneus da marca Goodyear, o modelo G 291 7/06 apresenta-se como uma opção equilibrada que proporciona confiabilidade superior a 0,8, nos primeiros 50.000 km, tanto após a primeira recapagem como após a segunda recapagem.

A escolha entre qual marca e modelo deve ser adquirido precisa ser feita baseada em critérios adicionais. É necessário considerar o preço de cada modelo de pneu e o custo de cada recapagem além de considerar também o valor apurado com a eventual venda das carcaças utilizadas. Também é

importante considerar o custo de descarte dos pneus usados face o atendimento às exigências ambientais.

Pelos resultados é possível também verificar que pneus recapados apresentam desempenho, por vezes, superior aos pneus novos revelando que o investimento na aquisição de bons modelos e na realização de manutenções pode apresentar significativos resultados econômicos e reduzir o volume de pneus destinados ao descarte.

Numa sociedade como a brasileira, que é extremamente dependente do transporte rodoviário tanto para deslocamento de cargas como de passageiros, tanto em regiões nas regiões urbanas como interurbanas é importante que os pneus apresentem uma durabilidade acentuada. Esta medida contribuirá para reduzir o custo final do transporte e também minimizar o descarte de um item bastante nocivo à natureza.

O aproveitamento contínuo dos pneus também representa uma importante alternativa econômica enquanto propicia o desenvolvimento das empresas que se prestam à atividade de recapeamento de pneus. Estas empresas necessitam de um aporte de capital significativamente menor para se instalarem do que aquele demandado para a instalação de uma indústria de pneus e propiciam oportunidade de desenvolvimento econômico através da geração de emprego e renda.

Este trabalho buscou contribuir para que a difusão da técnica de Confiabilidade em mais uma área de atividade ampliando os horizontes desta técnica e aumentando o arcabouço tecnológico que marca o início do século XXI e cuja fronteira final ainda não se tem idéia de onde possa estar.

## 6 Referências Bibliográficas

ASSAEL, H. **Consumer Behavior and Marketing Action**. Boston: PWS Kent, 1992.

BARRY, J. **Probabilidade**: um curso em nível intermediário. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada, 1981.

BERGAMO FILHO, V. **Confiabilidade básica e prática**. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

CHAVES NETO; A. **Confiabilidade e métodos estatísticos aplicados a sistemas de engenharia**. Curitiba, 2005. Apostila digitada.

COLOSIMO, E.A.; GIOLO, S.R. **Análise de sobrevivência aplicada**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

DIXON, J.C. **Tires, suspension and handling**. 2. ed. Warrendale PA: SAE – Society of Automotive Engineers, 1996.

FREITAS, M.A.; COLOSIMO, E.A. **Confiabilidade**: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1997.

FORD, T.L.; CHARLES, F.S. **Heavy Duty Truck Tire Engineering**. SP-729 Warrendale, PA : SAE – Society do Automotive Engineers, 1996.

HAVIARAS, G.J. **Metodologia para análise de confiabilidade de pneus radiais em frotas de caminhões de longa distância**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3149/tde-25012006-220232/en.php>>. Acesso em: 20/11/2010.

HEMÉTRIO, E. Epidemia pública: acidentes provocados por rodovias ruins crescem 68,5% em 3 anos. **Revista CNT**, Ano IV p 64, abr/mai, 2004. Edição especial – Dossiê CIDE.

INKOTTE, A. L. **Marketing de ação social e percepção de valor**: do plano tático para o estratégico. 214 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em <<http://empreende.org.br>>. Acesso em: 03/12/2010.

- KARDEC, A; LAFRAIA, J.R.B. **Gestão estratégia e confiabilidade**. Rio de Janeiro, Qualitymark: ABRAMAN, 2002.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Petrobrás, 2009.
- LAFRAIA, J.R.B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark Petrobrás, 2001.
- MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico de qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- NELSON, W.B. **Accelerated testing: statistical models, test plans and data analysis**. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- PALADY, P. **FMEA: análise dos modos de falha e efeitos: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram**. São Paulo: IMAM, 1997.
- PIAZZA, G. **Introdução à engenharia da confiabilidade**. Caxias do Sul: EDUCS, 2000.
- MARTHA DE SOUZA, G.F. **Confiabilidade de Produtos e Sistemas**. São Paulo: Politécnica – USP, 2003. Apostila digitada.
- O'CONNOR, P.D.T. **Practical Reliability Engineering**. 3. ed. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 1995.
- PARANHOS FILHO, M. **Gestão da produção industrial**. Curitiba: IBPEX, 2007.
- RELIASOFT. **Introdução aos Conceitos de Confiabilidade**. Apostila digitada.
- SASSERON, Pedro Luis ; ABACKERLI, A. J. . Métodos de ensaio acelerado como alternativa para os dados de vida de fornecedor. **Revista de Ciência & Tecnologia**. Piracicaba, v. 11, n. 22, p. 43-48, 2003.
- WALPOLE, R.E. *et al.* **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.