

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Marcelo Nogueira
Hodel..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 26 / 04 / 2010
Katia Lucchese Cavalca
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO MECÂNICO**

Autor: Marcelo Nogueira Hodel

Análise Comparativa entre Ensaios Controlados e Aplicações Reais de Pastilhas de Freios de Caminhões

Campinas, 2010.

Autor: Marcelo Nogueira Hodel

Análise Comparativa entre Ensaios Controlados e Aplicações Reais de Pastilhas de Freios de Caminhões

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Orientador: Prof^a. Dr^a Katia Lucchesi Cavalca Dedini

Campinas
2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

H661a Hodel, Marcelo Nogueira
Análise comparativa entre ensaios controlados e
aplicações reais de pastilhas de freios de caminhões /
Marcelo Nogueira Hodel. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: Katia Lucchesi Cavalca Dedini.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Confiabilidade. 2. Caminhões - Freios. 3. Freios.
4. Degradação. I. Dedini, Kátia Lucchesi Cavalca. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Comparative analysis between controlled tests and real
applications of brakes pads of trucks

Palavras-chave em Inglês: Reliability, Trucks - Brakes, Brakes, Degradation

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Íris Bento da Silva, Zilda de Castro Silveira

Data da defesa: 26/04/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

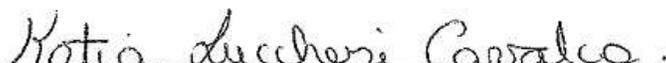
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

**Análise Comparativa entre Ensaios
Controlados e Aplicações Reais de Pastilhas de
Freios de Caminhões**

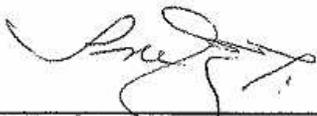
Autor: Marcelo Nogueira Hodel

Orientador: Prof^a. Dr^a Katia Lucchesi Cavalca Dedini

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof^a. Dr^a Katia Lucchesi Cavalca Dedini, Presidente
Instituição: DPM / FEM / UNICAMP



Prof. Dr. Iris Bento da Silva
Instituição: DEF / FEM / UNICAMP



Prof^a. Dr^a Zilda de Castro Silveira
Instituição: USP / São Carlos

Campinas, 26 de abril de 2010

Dedicatória:

Dedico este trabalho à Deus, à minha querida esposa e filhas, aos meus pais e amigos.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

A Deus que me ensina os caminhos que devo escolher.

A minha esposa Ana Paula Hodel e filhas Keith Hodel e Karine Hodel pelo amor e compreensão.

A minha orientadora Prof^ª. Dr^a Katia Lucchesi Cavalca Dedini que me mostrou os caminhos a serem seguidos.

Aos colegas de trabalho que me ajudaram na realização deste trabalho.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

*“Confia no Senhor de todo o teu coração, e não te estribes no teu
próprio entendimento”.*
Prov. 3.5

Resumo

Com a necessidade do lançamento de novos produtos e a introdução de novas tecnologias, em tempos cada vez mais competitivos, as empresas automobilísticas desenvolvem métodos para homologação de seus produtos, visando reduzir o tempo de desenvolvimento, e continuar atendendo aos requisitos de qualidade. Sendo assim, no setor automobilístico são desenvolvidas pistas de testes, para simular as principais características das aplicações veiculares, visando antecipar e analisar os resultados de confiabilidade dos componentes, antes do lançamento do veículo no mercado. Para avaliar os resultados obtidos durante a simulação é preciso compará-los com os dados de garantia, entretanto há componentes que são considerados itens de desgaste, que não são cobertos em garantia pela montadora, dificultando a comparação entre a simulação e os dados de garantia. Para validar os resultados obtidos por meio de uma simulação, para pastilhas de freio foram selecionadas amostras de usuários do veículo, logo após o seu lançamento. Foram realizados acompanhamentos sobre o desgaste das pastilhas de freio, para se obter os dados de confiabilidade em aplicações reais. Este estudo possui o objetivo de comparar os dados obtidos nos dois testes citados utilizando os conceitos de confiabilidade. A metodologia desenvolvida pode ser aplicada para validar os ensaios realizados para itens de desgaste, durante o desenvolvimento de novos produtos, principalmente veículos.

Palavras Chave: Confiabilidade, Modelo de degradação, Pastilha de freio e Caminhão.

Abstract

Due to the necessity of launching new products and the introduction of new technologies in more and more competitive times, automobile companies develop methods in order to get the approval of its products aiming at reducing the development time and keep meeting the quality requirements. Thus, in the automobile sector test tracks are developed in order to simulate the vehicle applications main features aiming at anticipating and analyzing the reliability results of components before launching the product in the market. In order to check the effectiveness of the results obtained during the simulation test, it is necessary to compare them with warranty data. However, there are components which are considered wear items and which aren't covered by the automaker warranty making it difficult the comparison with the results obtained in the simulation tests. Thus, in order to check the effectiveness of the results obtained through a simulation to brake pads it was selected samples from many vehicle users right after its launch and it was monitored for the wear of brake pads, aiming at obtaining reliability data in real application. The objective of this work is compare information obtained in both tests, using the reliability concepts. The developed methodology can be applied to validate the tests to wear items, during the development of new products, mainly vehicles

Key Words: Reliability, degradation model, brake pad and truck.

Lista de Ilustrações

2.1	Participação dos Modais no Mundo	09
2.2	Valor do frete rodoviário	12
2.3	Acidente com caminhão na rodovia Anchieta	13
3.1	Cronograma de planejamento da qualidade do produto	16
3.2	Classificação das falhas	17
3.3	Exemplo da curva da banheira para componentes eletrônicos	20
3.4	Exemplo da curva da banheira para componentes mecânicos	21
3.5	Tipos de censuras utilizadas em confiabilidade	22
3.6	Variação da Confiabilidade $R(t)$ e da Densidade de falha $f(T)$	26
3.7	Influência dos parâmetros na variação da Taxa de falha	28
3.8	Influência da Média e do Desvio-padrão para Lognormal	29
3.9	Curvas da densidade da probabilidade de falha em função do tempo	33
3.10	Influência do Parâmetro β na Função de Confiabilidade $R(t)$	33
3.11	Influência do Parâmetro β na Função Taxa de Falha $\lambda(t)$.	34
3.12	Função densidade de probabilidade exponencial	35
3.13	Procedimentos básicos para análise de degradação	40
3.14	Modelo linear com degradação iniciando logo após o primeiro uso	41
3.15	Modelo linear com degradação iniciando após algum uso	42
3.16	Modelo não-linear com degradação iniciando após algum uso	43
3.17	Grau de correlação dos dados em relação a sua disposição gráfica	45
3.18	Tipos de intervalos de confiança	51
4.1	Esquema de funcionamento dos freios a disco	56
4.2	Esquema de funcionamento dos freios a tambor	57
4.3	Janela para inspeção das pastilhas de freio	61
5.1	Árvore funcional	63
5.2	Componente do sistema de freios	63
5.3	Disco vitrificado e pastilha desgastada	64

5.4	Distribuição das pastilhas no caminhão	66
5.5	Sistema de freio da roda	68
5.6	Fluxograma para a caracterização dos parâmetros	71
6.1	Esquema do estudo de caso	73
6.2	Diagrama causa efeito desgaste das pastilhas de freio	74
7.1	Fluxograma para análise dos dados dos testes	80
7.2	Gráficos de probabilidade – weibul para as pastilhas do eixo dianteiro direito	89
7.3	Gráficos de probabilidade – weibul para as pastilhas do eixo dianteiro esquerdo	90
7.4	Gráficos de probabilidade – weibul para as pastilhas do eixo traseiro direito	91
7.5	Gráficos de probabilidade – weibul para as pastilhas do eixo traseiro esquerdo	92
7.6	Probabilidade de falhas x quilometragem eixo dianteiro roda lado direito	94
7.7	Probabilidade de falhas x quilometragem eixo dianteiro roda lado esquerdo	95
7.8	Probabilidade de falhas x quilometragem eixo traseiro roda lado direito	95
7.9	Probabilidade de falhas x quilometragem eixo traseiro roda lado esquerdo	96

.....

Lista de Tabelas

2.1	Acidentes por falta de freio rodovias Anchienta/Imigrantes	13
5.1	Análise de FMEA de projeto	64
6.1	Distribuição dos veículos do teste da aplicação real	78
7.1	Teste de aderência MSE	81
7.2	Tempo estimado (quilometragem) até a falha para o teste simulação	82
7.3	Tempo estimado até a falha para o teste aplicação real (Eixo dianteiro roda lado direito)	84
7.4	Tempo estimado (quilometragem) até a falha para o teste aplicação real (Eixo dianteiro roda lado esquerdo)	84
7.5	Tempo estimado (quilometragem) até a falha para o teste aplicação real (Eixo traseiro roda lado direito)	86
7.6	Tempo estimado (quilometragem) até a falha para o teste aplicação real (Eixo traseiro roda lado esquerdo)	85
7.7	Resultados iniciais de análise	86
7.8	Detalhes da análise	87
7.9	<i>Ranking</i> das distribuições para os testes na aplicação real e testes por simulação	87
7.10	Parâmetros para os testes na aplicação real e testes por simulação	88
7.11	Probabilidade de falha	93

.....

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras latinas

F - Falha

f - Número de Falhas.

f(x) - Função Densidade de Probabilidade.

f(t) - Função Densidade de Falha.

F(x) - Função Distribuição Acumulada.

F(t) - Função Densidade de Falha Acumulada.

P (t) - Probabilidade de Encontrar o Sistema no Estado Si no Tempo t.

Q - Probabilidade de Falha.

Q(t) - Função Distribuição de Falhas.

R(t) - Função Distribuição dos Sobreviventes ou de Sucesso.

S - Suspensão.

t - Variável Tempo.

x - Valores da Variável Aleatória X.

.....

Letras Gregas

γ - Vida mínima, parâmetro de posição.

β Parâmetro de Forma ou Inclinação.

ε - Erro Admissível.

δ - Função Distribuição de Probabilidade Condicional.

γ - Função de Distribuição Condicional.

λ - Taxa de Falhas.

$\lambda (t)$ - Função Taxa de Falhas.

μ - Média.

μ - Taxa de Reparo.

ρ - Matriz das Taxas.

σ - Desvio Padrão.

.....

Abreviações

FMEA - Failure Mode and Effect Analysis.

FTA - Fault Tree Analysis.

MTTF - Mean Time To Failure.

MTBF - Tempo Médio Entre Falhas

TPM – Total Productive Maintenance.

PIB – Produto Interno Bruto

CNT – Confederação Nacional do Transporte

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

RPN – Risk Priority Number

ABS – Anti-lock Brake System

CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito

.....

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
	2.1. Confiabilidade em produtos	3
	2.2. O Ambiente competitivo e o papel da confiabilidade	6
	2.3. O Mercado de transporte de carga brasileiro e os veículos comerciais	9
3	CONFIABILIDADE – CONCEITOS BÁSICOS	14
	3.1. Classificação de falhas	17
	3.2. Função Taxa de falhas	19
	3.3. Classificação dos dados	21
	3.4. Distribuições estatísticas	23
	3.4.1. Distribuição Lognormal	23
	3.4.2. Distribuição de Weibull	30
	3.4.3. Distribuição Exponencial	34
	3.4.4. Distribuição Normal	36
	3.5. Modelo de degradação	38
	3.5.1. Modelo de degradação para dados não acelerados	40
	3.5.2. Principais modelos matemáticos de degradação	44
	3.6. Conceitos básicos sobre correlação e verossimilhança	45
	3.7. Teste do ajuste da distribuição	48
	3.8. Conceito de intervalo de confiança	50
	3.9. Análise do Modo e Efeito de Falhas (FMEA)	51
4	SISTEMA DE FREIOS	53
	4.1. Funcionamento dos freios a disco	56
	4.2. Funcionamento dos freios a tambor	57
	4.3. Vantagens do uso do freio a disco em relação ao freio a tambor	58
	4.4. Materiais de fricção das pastilhas e lonas de freio	59
	4.5. Manutenção dos freios	60
5	METODOLOGIA	62
	5.1. Análise preliminar da Confiabilidade do sistema de freio	62
	5.2. Tamanho da amostra	65
	5.3. Requisitos de confiabilidade para o componente pastilha de freio	65
	5.4. Distribuição das pastilhas de freio nos caminhões	66
	5.5. Obtenção dos dados	67
	5.6. Seleção de <i>softwares</i> para análise da confiabilidade	68
	5.7. Análise dos Dados	70

6 ESTUDO DE CASO	72
6.1.Descrição do Problema	72
6.2.Planejamento dos testes	73
6.2.1.Planejamento para o teste de confiabilidade simulação	74
6.2.2.Planejamento para o teste de confiabilidade na aplicação real	76
7 RESULTADOS	79
7.1.Dados coletados	79
7.2.Analise dos dados	80
7.2.1.Análise de degradação	80
7.2.2.Estimativa da confiabilidade	85
7.3.Comparação da probabilidade de falha para as pastilhas	93
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	97
REFERÊNCIAS	100
ANEXOS	104

1 INTRODUÇÃO

No ambiente competitivo atual é fundamental para qualquer empresa, que deseja manter-se no mercado, a melhoria continua da qualidade e a redução dos custos. Para as empresas montadoras de veículos, tais aspectos surgem logo no início do desenvolvimento de um novo produto, pois, devido a demanda de mercado, o tempo para lançamento de novos produtos está cada vez mais reduzido, com essa condição os engenheiros precisam desenvolver procedimentos e metodologias de forma a minimizar o custo e o tempo para homologação de novos componentes. Para componentes de segurança, a redução do tempo de desenvolvimento torna-se ainda mais crítico, porque as novas exigências quanto às responsabilidades civis e criminais são cada vez mais severas.

Nos últimos anos, percebeu-se que o número de chamados das empresas automobilísticas, devido à reparação ou troca de componentes, que podem resultar em acidentes, tem aumentado continuamente. Os custos relativos para essas ações são extremamente altos e trazem prejuízos não apenas financeiros, mas também ônus moral para a empresa. Além desses prejuízos, em alguns casos, produtos que levaram anos para serem desenvolvidos são retirados do mercado antecipadamente.

Este é um dos motivos pelo qual a utilização da engenharia da confiabilidade tornou-se uma das ferramentas mais importantes para empresas automobilísticas, pois auxiliam na tomada de decisões pela direção das empresas, fornecendo dados relativos ao desempenho do produto antes mesmo do seu lançamento no mercado.

Para a aplicação da engenharia de confiabilidade no desenvolvimento de qualquer produto, é necessário o acervo de dados, sejam de falhas ou de dados censurados. No caso de veículos comerciais, existem algumas formas para se obter as informações sobre falhas antes do lançamento do veículo, que pode ser feito com a realização de testes de vida acelerados, ou ainda, através da simulação das condições reais de operação do veículo, ambos utilizando modelos de degradação.

Para alguns componentes, os ensaios de vida acelerados não conseguem reproduzir as condições reais de operação. Segundo Pohl & Ribeiro (1999) os testes de vida acelerados

apresentam-se como uma alternativa usual para obter dados de confiabilidade em um tempo reduzido, podendo, contudo, resultar em pouca ou nenhuma falha, ou ainda, não sendo aplicáveis na prática. Alguns testes não podem ser acelerados, pois os produtos são utilizados em condições ou frequência de uso extremo, e outros têm o seu modo de falha modificado, invalidando a análise.

Uma alternativa aos testes de vida acelerados é o uso de modelos de degradação. Nesse caso, os ensaios são feitos em condições normais de operação, mas o produto não é conduzido até a falha. Antes que a falha ocorra, o produto é avaliado através de variáveis que caracterizam o seu desempenho, ou seja, o seu estado de degradação. Com base em tais medições, é possível ajustar modelos que relacionam a degradação com o tempo de uso, podendo, então, concluir a respeito da provável vida útil do produto. Tais modelos podem ser aplicados à indústria automobilística utilizando dados das condições normais antes do lançamento no mercado. Para isso, as montadoras desenvolvem ensaios visando simular condições de uso dos clientes, para obtenção de dados representativos.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia baseada em modelos de degradação e testes estatísticos, aplicada à comparação de diferentes testes veiculares com foco em pastilhas de freio. São agrupadas e estudadas amostras provenientes de teste por simulação e teste na aplicação real. Esse estudo, propõe uma metodologia para validação de testes de confiabilidade com aplicação em veículos comerciais, realizados durante a fase de desenvolvimento para itens de desgaste.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Confiabilidade de produtos

Segundo Possamai e Souza (2000), para se obter qualidade e confiabilidade de produtos, são necessários investimentos expressivos, a falta desses estudos normalmente resultam em custos muito maiores. Garantias, responsabilidades, *recalls* e reparos custam milhões de dólares a cada ano às organizações, em função de não ter sido dada a devida ênfase à qualidade e confiabilidade durante o desenvolvimento do projeto, principalmente durante o projeto preliminar e fabricação.

Conforme Ramkumar (1993) até a 1ª guerra mundial, conforme, a avaliação da confiabilidade era realizada de forma qualitativa e subjetiva, através da experiência dos engenheiros. Em 1930, a confiabilidade passou a ser quantificada, em termos de taxa média de falhas e número médio de falhas, após o aumento da produção de motores aeronáuticos utilizados em aeroplanos e dirigíveis.

Porém, somente após a 2ª guerra mundial, a confiabilidade tornou-se assunto de grande interesse, devido a baixa disponibilidade e altas taxas de falha de equipamentos militares. Durante a década de 60, os conceitos de confiabilidade foram empregados no projeto de reatores de usinas nucleares, e também na indústria de fornecimento de eletricidade, com o objetivo de evitar falhas locais ou *blackout* de larga escala.

De acordo com Cavalca (2006), na década de 70, os estudos de confiabilidade tiveram uma alteração no foco de trabalho. Iniciavam-se os estudos de análise de confiabilidade de sistemas complexos através de técnicas probabilísticas, como por exemplo: árvores de falhas.

Conforme Marques (2004) durante a década de 90, vários trabalhos que abordam o ajuste de modelos e estudos comparativos foram publicados. Métodos para seleção da distribuição mais adequada a uma amostra de dados e procedimentos de inferência estatística, para estimação de parâmetros e testes de hipóteses, foram extensivamente tratados. Esses conceitos são abordados nas obras de Nelson (1990), Doty (1989), Ramakumar (1993), Lewis (1996), Ebeling (1997).

Segundo Berke e Zairo (1991), “apud” Morello (2005), o valor ou importância de uma garantia depende fortemente da forma em que esta é analisada. Longos períodos de garantias servem como um indicador da confiabilidade do produto e podem aumentar as vendas. O período de uma garantia pode ser fortemente influenciado pela competição do mercado. Estudos de confiabilidade auxiliam na previsão dos períodos de garantia fornecidos para diferentes produtos.

Segundo O’Connor (1988), a análise da confiabilidade implica no estudo sobre as falhas que podem ocorrer com o produto durante o seu ciclo de vida, ou seja, não é um simples cálculo da taxa ou probabilidade de um componente falhar, mas sim a procura, análise, validação e correção de todas as falhas que podem ocorrer com o produto.

De acordo com Meeker e Hamada (1994), na fase de desenvolvimento de um projeto, o trabalho pode ser direcionado para projetar confiabilidade usando ferramentas da qualidade, desenvolvimento e confiabilidade, mas apesar de todo o esforço, testes preliminares de desenvolvimento são necessários para avaliar a durabilidade do produto, identificar problemas e alcançar o crescimento da confiabilidade. Antes de distribuir os produtos aos clientes, testes de validação da confiabilidade devem ser realizados para demonstrar que o produto novamente reúne e atinge as metas pretendidas.

Guida e Pulcini (2002), “apud” Teixeira (2004), propuseram um procedimento para avaliação da confiabilidade automotiva, baseada em dados do histórico e do conhecimento técnico, uma vez que não se pode ignorá-los durante o desenvolvimento de novos produtos, podendo economizar tempo e custos em testes desnecessários e retrabalho.

Anjo (2007) desenvolveu um modelo para descrever o comportamento de um produto exportado e prever a sua confiabilidade no campo. O estudo concluiu que, durante o desenvolvimento do produto, deveriam ser considerados todos os requisitos do país onde o produto será utilizado e, posteriormente, realizada a validação, não só no país onde foi desenvolvido o projeto. Também deve-se considerar a avaliação dos clientes na validação, pois há aspectos que só serão revelados e/ou observados como críticos quando avaliados pelo cliente final, por exemplo ruído de freios.

Morello (2005) apresentou uma metodologia utilizando as ferramentas estatísticas de Confiabilidade, *FTA (Fault Tree Analysis)* e planejamento experimental, para obter uma árvore de falhas geral do sistema de mudança de marchas em veículos (caminhões), e a partir dela,

obteve uma árvore de falhas reduzida. Para obtenção dos dados, foram realizados testes em aplicações reais nos veículos em conjunto com o próprio cliente e informações adquiridas no Banco de Dados de garantia da empresa.

Haviaras (2005) desenvolveu uma metodologia de análise de confiabilidade utilizando-se de amostras de pneus sucata de veículos pesados do transporte rodoviário. O método permite sistematizar e mensurar cada tipo de falha e identificar as principais causas das falhas críticas, possibilitando a criação de medidas preventivas adequadas para a remoção do pneu antes da falha completa.

Castro e Pinheiro (2005) desenvolveram uma pesquisa aplicada, com objetivo de definir um sistema de gestão de atividades de manutenção veicular, que considerou a probabilidade de ocorrência futura de falhas (através do monitoramento da confiabilidade de todos os componentes de um veículo) e o risco de ocorrência de falhas (através da definição do índice de Risco para cada modo de falha). Observou-se durante o estudo, que a manutenção veicular não é tratada e nem planejada de forma sistêmica, com base no risco, e não considera aspectos importantes, tais como a frequência histórica de falhas ou o risco associado às falhas históricas (já ocorridas) ou potenciais (falhas que ainda não ocorreram). Em geral, as ações e os planejamentos preventivos são definidos com base em informações de fabricantes (fornecedores), e estes planejamentos não são alterados ou adaptados à realidade operacional das frotas. Este tipo de manutenção resulta em um alto índice de perdas (paradas corretivas), alto índice de acidentes com mortes e/ou ferimento de pessoas.

Pohl e Ribeiro (1998) desenvolveram modelos de degradação que ajustam dados advindos tanto de ensaios não-acelerados como de ensaios acelerados, onde nestes últimos os testes de um componente mecânico não são conduzidos até a ocorrência de falha, e após a análise de degradação, foi possível estimar o tempo até a falha e estimar a confiabilidade. O método utilizado apresentou-se como uma alternativa eficaz, considerando que, nos dias atuais, os prazos para o desenvolvimento de produtos são cada vez menores.

Teixeira (2004) fez uma interação entre o Modelo de Kano e o QFD, Custeio Alvo e Análise de Valor, a fim de avaliar o grau de atendimento aos requisitos do cliente para uma embreagem automotiva, determinando quais as funções cujos custos relativos estão acima das necessidades relativas, como fonte potencial para otimização de projeto. Em seguida, foi

construída a Árvore de Falhas (FTA) para identificação dos componentes críticos que oferecem maior risco de falha no sistema, e realizada a análise de Confiabilidade e Regressão dos resultados obtidos nos ensaios, para determinação da confiabilidade dos componentes a serem melhorados ou otimizados, bem como criar uma metodologia para desenvolvimento de produtos otimizados.

Segundo Ireson e Coombs (1988), a mais aceita definição sobre o tema é: “Confiabilidade é a capacidade de um produto desempenhar a sua função sem falhar quando submetido a condições especificadas durante um período de tempo determinado ou número mínimo de ciclos ou eventos”.

2.2. O Ambiente competitivo e o papel da confiabilidade

Devido à crescente pressão da concorrência global e às necessidades de seus clientes, as empresas buscam aprimorar suas atividades, a fim de ganhar e garantir sua participação no mercado. Para tanto, buscam atingir melhores níveis de competitividade, utilizando diversas estratégias que, segundo Porter (1980), são agrupadas em três tipos distintos: liderança por custo, diferenciação ou enfoque.

As estratégias de competitividade adotadas pelas empresas sofreram modificações desde a década de setenta, quando a vantagem competitiva era obtida por meio de uma estratégia de custos, baseada em economias de escala. Na década seguinte, devido ao crescimento da importância da inovação tecnológica, para se obter vantagem competitiva, não era possível limitar-se à estratégia em custos. Logo, as empresas começaram a considerar a estratégia de diferenciação de seus produtos e serviços, seja pela qualidade, prazo de entrega ou introdução de novas tecnologias (Contador, 1996).

Baxter (1998) afirma que inovar é fundamental para um excelente resultado, mostrando que a garantia da competitividade no mercado atual depende fortemente da diferenciação.

Sabe-se que, no mercado atual, as pressões competitivas se dão em níveis mundiais, aumentando ainda mais a necessidade de inovação. Além disso, as empresas adotam a estratégia de introduzir novos produtos em tempos cada vez mais curtos, a fim de se adaptarem às mudanças das necessidades do mercado consumidor (Baxter, 1998).

Em suma, nota-se o atual aumento de competitividade do mercado e o desenvolvimento de produtos, cada vez mais complexos, atrelados a consumidores mais exigentes; os quais demandam produtos com o máximo de valor agregado à custos reduzidos, a fim de aumentar a produtividade, e, conseqüentemente, garantir a continuidade da empresa neste segmento, sempre visando atender a requisitos de qualidade, confiabilidade, preço e prazos de entrega.

Nesse contexto, as empresas devem definir sua estratégia de introdução de novos produtos no mercado que, de acordo com Contador (2000), podem ser classificadas:

- retrógrada, a empresa cresce a uma velocidade menor que as mudanças do ambiente;
- estagnada, cresce a uma velocidade igual à das mudanças;
- desenvolvida, cresce a uma velocidade maior que as mudanças;
- inovadora, cresce a uma velocidade maior que a dos concorrentes.

Empresas que almejam a posição de “desenvolvidas” ou “inovadoras” desenvolvem estratégias do ponto de vista de manufatura. As empresas desenvolvidas ou inovadoras devem ter processos que garantam não apenas rapidez, mas também outros objetivos de desempenho, tais como qualidade, confiabilidade, flexibilidade e custos compatíveis. Tais objetivos têm relação entre si e devem ser priorizados de acordo com as necessidades e características da empresa ou do mercado consumidor (Slack, 2002).

Tais objetivos podem ser concretizados através de ferramentas de qualidade preventiva, que acelerem a fase de projeto, sem causar prejuízos a essas atividades. Kaminski (2000) afirma que a qualidade no desenvolvimento significa “garantir a realização do processo de projeto de forma disciplinada, para que se tenha certeza de que o produto, produzido de acordo com os documentos de projeto emitidos, apresente desempenho satisfatório em serviço”. Qualidade de projeto agrega valor ao produto no mercado” (Branco, 1999).

Durante o desenvolvimento de produto, um campo de conhecimento que pode ser vastamente utilizado, devido à sua característica preventiva, é a análise de confiabilidade de componentes e sistemas, na qual é possível de assegurar boa qualidade no projeto resultando, por exemplo, em menores taxas de falha e maiores prazos de garantia do produto. Para a determinação de prazos de garantia, necessita-se conhecer a confiabilidade do produto, a fim de determinar o intervalo de tempo permitido, de modo que os custos envolvidos com os reparos, durante os prazos oferecidos, não ofereçam prejuízos ao fabricante.

Assim, a confiabilidade é uma arma estratégica para manter ou aumentar a competitividade da empresa no mercado. Entretanto, deve-se atentar ao fato de que, mesmo aplicando-se as técnicas de análise de confiabilidade, podem ocorrer falhas no componente ou sistema devido principalmente à dificuldade de prever com confiança todas as variáveis envolvidas na real utilização do produto. Por este motivo, a fase de ensaios em campo é uma das etapas mais importante no estudo de confiabilidade, devido à possibilidade de coleta de dados, auxiliando no entendimento do comportamento do produto em campo.

Geralmente, durante o prazo de vigência de garantia, esses dados são coletados pela assistência técnica. Estas informações são repassadas para a engenharia de desenvolvimento para que tenha uma ação precisa, na correção do problema, evitando ocorrências futuras. Porém, para alguns componentes considerados itens de desgaste pelas montadoras, os custos de garantia não são pagos, conseqüentemente, os dados não são registrados pelos concessionários, dificultando a análise de confiabilidade.

Segundo Rai e Singh (2003), os dados de garantia são uma rica fonte de dados da confiabilidade do produto, pois apenas os testes de vida em laboratório não são suficientes para prever com confiança o desempenho do produto em campo. Porém, esses dados de tempo e quilometragem de vida estão restritos apenas ao período coberto pela garantia, ou seja, constituem dados incompletos, pois é desconhecido pelas montadoras o comportamento do produto após esse período.

Os dados obtidos dentro do período de garantia, também apresentam valores com um certo grau de imprecisão de tempo, quilometragem e falhas em alguns relatórios. Trabalhar com dados nessa condição pode induzir a conclusões não precisas sobre taxa de falhas em campo, principalmente para itens de desgaste.

Apesar de tais dificuldades, são claros os benefícios oriundos da estimativa da confiabilidade em diversas fases do produto, das quais se destacam:

- a previsão da vida, para determinar o tempo de cobertura da garantia do produto;
- a criação dos planos de manutenção preventiva e corretiva;
- a criação de bancos de dados de confiabilidade, facilitando o novo desenvolvimento de produtos similares, entre outros usos.

2.3. O Mercado de transporte de carga brasileiro e os veículos comerciais

Os custos logísticos corresponderam, em 2004, a 12,6% do PIB (Lima, 2006a). Somente para os custos de transporte, a soma fica em 7,6% do PIB. Segundo Cavenaghi et al (1997): “Dentre as modalidades existentes, o transporte rodoviário de cargas é o mais utilizado, somando 1,1 milhões de caminhões, 12 mil empresas e outras 50 mil de carga própria e cerca de 350 mil autônomos”.

Segundo a CNT - Confederação Nacional do Transporte (2002) a participação dos modais rodoviário, ferroviário e aquaviário no transporte de cargas brasileiro é significativamente diferente daquela encontrada em outros países de dimensões continentais.

No Brasil existe uma excessiva concentração de transporte de cargas no Modal Rodoviário. A figura 2.1 indica a participação relativa, no transporte de cargas, dos modais rodoviário, ferroviário e aquaviário em diversos países do mundo.

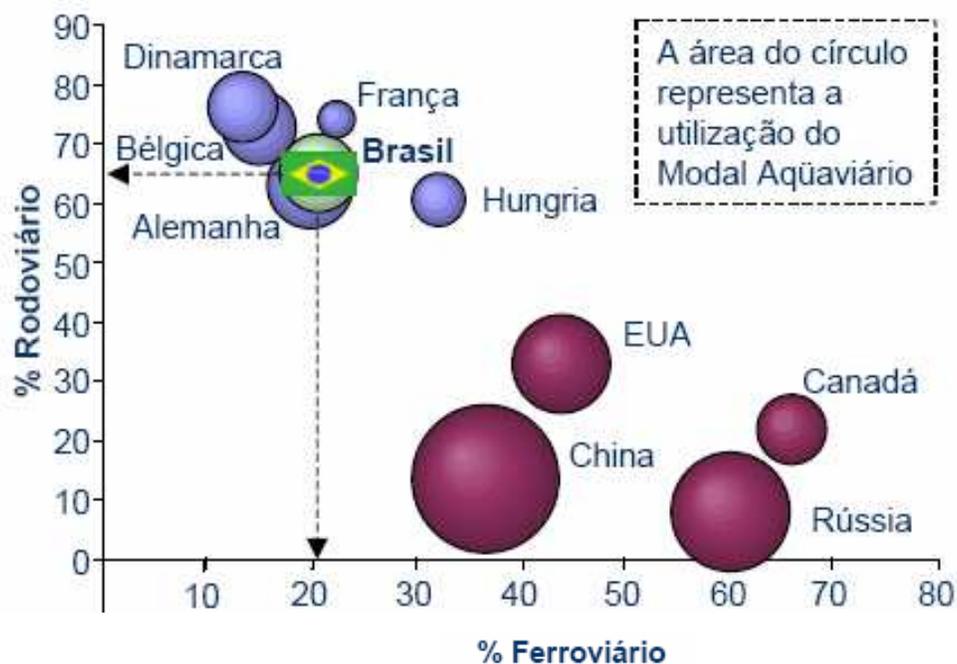


Figura 2.1 – Participação dos Modais no Mundo – Tonelada x Quilômetro útil

Fonte : Anuário estatístico 2001 – Geipot (CNT, 2002)

Analisando-se a figura 2.1 pode-se constatar que:

- Todos os países de grande extensão territorial, com exceção do Brasil, localizam-se à direita e na parte inferior do gráfico. Isto significa que esses países usam muito o Modal Ferroviário e, comparativamente, pouco o Modal Rodoviário;
- Os países de pequena extensão territorial estão localizados à esquerda e na parte superior do gráfico. Isto demonstra uma opção pelo Modal Rodoviário, em detrimento de outros Modais;
- É surpreendente verificar a posição do Brasil ao lado de países de baixa extensão territorial, indicando uma priorização do Modal Rodoviário menos eficiente.

Observando os dados acima, percebe-se a importância dos veículos comerciais no Brasil, considerando o baixo investimento em outras formas de transportar cargas.

Os gastos com transportes têm grande influência na economia brasileira (7,6% do PIB - CNT 2002), e a otimização de produtos afins, nas empresas desse setor, podem trazer grandes benefícios para a competitividade nacional. Nesse contexto, a frota deve ser encarada como objeto estratégico por se tratar de um fator que pode aumentar a competitividade logística do país.

Lima (2006b) afirma que “segundo dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), atualmente existem 719.741 registros de transportadores rodoviários no Brasil, dos quais 85% são autônomos. De uma frota de 1.385.994 veículos, 56% são de autônomos”. Tais números revelam a presença de um grande número de pequenos transportadores que, geralmente, possuem pouco conhecimento de custeio e administração.

As empresas do setor de transporte estão submetidas a um ambiente com escassez de regulamentação: falta exigência de padrões mínimos de qualidade, tais como renovação de frota, rastreamento dos veículos, segurança e qualificação de mão-de-obra, propiciando o crescimento desordenado e excessivo de empresas, levando as transportadoras a reduzirem suas tarifas, muitas vezes a valores inferiores ao seu preço de custo, por não considerarem os custos de capital (Lima, 2006b).

Segundo a CNT - Confederação Nacional do Transporte (2002), o número de ocorrências de roubo de carga tem crescido sobremaneira, e o prejuízo sofrido pelas empresas tem acompanhado este crescimento, dificultando ainda mais as operações do setor.

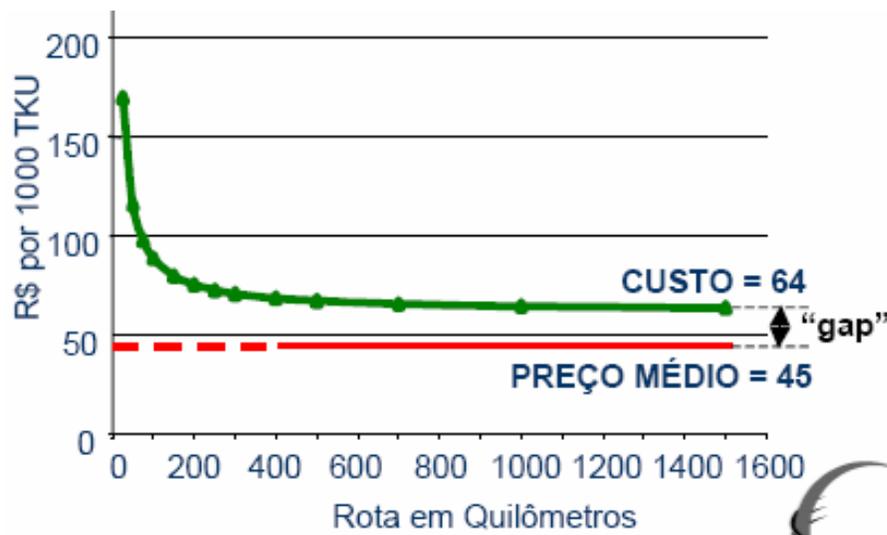
Considerando o número de Roubo de Carga no Brasil, as montadoras de veículos comerciais necessitam de desenvolver veículos que possuem condições de receberem equipamentos de segurança ou oferecer nos veículos os equipamentos instalados. Além dos equipamentos necessários para o monitoramento, os veículos devem ser confiáveis, ou seja, não podem falhar durante o trajeto, impossibilitando ou evitando o roubo de carga.

Apesar dos aspectos que dificultam a melhoria dos serviços prestados, existem as necessidades do consumidor sendo:

- tempos de produto em trânsito reduzidos;
- equipamentos que garantam acondicionamento do produto transportado sem danificá-lo;
- confiabilidade na entrega.

Por outro lado, os preços aceitos para pagamento do frete são baixos devido ao grande número de empresas e autônomos disponíveis no setor.

Conforme o Centro de Estudos em Logística – COPPEAD (2001) a figura 2.2 representa o que se denomina de baixo preço dos fretes rodoviários, comparando-se os custos padrão com o transporte, e a remuneração deste transporte para cargas fechadas em longas distâncias. De maneira conservadora, não foram considerados, na curva de custo apresentada, a depreciação do veículo e tampouco o custo de oportunidade do capital do caminhão.



Premissas: Ociosidade de 40%; Retirada Autônomo de 5 sal. mínimos; Trabalho de 189hs / mês; 2hs de carregamento e 3hs de descarregamento.

Figura 2.2 – Valor do Frete Rodoviário (R\$/Ton*km)

Fonte: Centro de Estudos em Logística - COPPEAD

A diferença entre custo e preço médio identificado como *gap* na figura 2.2, apresenta o que pode ser entendido como uma margem operacional média negativa.

As principais alternativas do transportador rodoviário de carga para trabalhar com este *gap* entre custo e preço são: redução da manutenção do veículo, jornada excessiva de trabalho, carregamento acima do peso máximo, inadimplência fiscal, entre outros.

Dessa maneira, as empresas de transporte estão sujeitas às exigências do consumidor, ou seja, critérios adversos como alto desempenho a baixo custo. Ao analisar tal cenário, observa-se que a frota tem novamente uma função fundamental, pois a disponibilidade da frota, bem como sua confiabilidade, afetam questões de desempenho dos serviços prestados e lucratividade das empresas de transporte.

Nota-se que a competição entre as transportadoras, as necessidades do consumidor, as condições de operação da frota e as necessidades legais afetam, em diferentes proporções, as questões de disponibilidade da frota e seus custos de manutenção. É fundamental a análise desses aspectos, os quais devem ser considerados na fase de desenvolvimento de veículos comerciais, na qual são definidos os critérios de projeto que maximizam sua disponibilidade, de maneira a aumentar a competitividade, pois aumenta a disponibilidade do equipamento.

Nesse sentido, componentes cujo modo de falha mais comum é o desgaste, devem ser projetados de maneira a minimizar as necessidades de parada para manutenção, a fim de contribuir positivamente na disponibilidade dos veículos comerciais.

Entre os itens que apresentam o modo de falha por desgaste em um veículo comercial, pode-se citar as pastilhas de freio. Na ocorrência de desgaste das pastilhas, acima do padrão especificado em projeto, deve-se realizar a troca desse componente, implicando na parada do veículo para manutenção, o que afeta negativamente a disponibilidade do veículo. Além disso, o desgaste prematuro das pastilhas pode provocar acidentes, colocando vidas em risco e provocando sérios danos ao equipamento. Conforme verifica-se na tabela 2.1, o número de acidentes por falha de frenagem é extremamente alto, como se exemplifica no caso da Rodovia Anchieta (figura 2.3).

VEÍCULOS COMERCIAIS (Acidentes por falta de freio)	
01/08/2000 a 31/07/2001	175

Tabela 2.1 – Acidentes por falhas na frenagem - Rodovias Anchieta/Imigrantes

Fonte: Seminário ECOVIAS (2002)



Figura 2.3: Acidente com caminhão na rodovia Anchieta

Fonte: Seminário ECOVIAS (2002)

3 Confiabilidade – Conceitos básicos

Neste capítulo, é feita uma revisão sobre conceitos teóricos em confiabilidade utilizados no desenvolvimento deste trabalho, tais como: definições técnicas, distribuições estatísticas aplicadas à confiabilidade, intervalos e nível de confiança, modelo de degradação e FMEA - *Failure Mode and Effect Analysis*.

Segundo Scapin (1999), “Confiabilidade é a probabilidade de um sistema ou um produto executar sua função de maneira satisfatória, dentro de um intervalo de tempo e operando em determinadas condições”. A confiabilidade (do inglês, *Reliability*) de um componente ou sistema, é igual a probabilidade de que o componente ou sistema não falhe durante um determinado intervalo de tempo $(0,t)$, ou de modo equivalente, confiabilidade é igual a probabilidade de que o componente ou sistema ainda esteja em operação no tempo t . Por exemplo, para um determinado sistema, $R= 0,90$ significa que 90% de seus componentes, utilizados sob dadas condições, estarão ainda em funcionamento no instante (t_1) , ou ainda, determina-se a vida B10, ou seja 10% dos componentes já falharam no instante (t_1) .

A confiabilidade é quantificada utilizando-se fundamentos da teoria de conjuntos, probabilidade e estatística, estimando o período de pleno funcionamento do produto ao longo de seu ciclo de vida. A confiabilidade, sob o ponto de vista de projeto, é uma qualidade projetada em função do tempo (qualidade temporal), sendo então uma grandeza quantificável. Devido a essa característica, a confiabilidade está diretamente relacionada ao padrão de desempenho do produto. A quantificação ou estimativa da confiabilidade envolve quatro componentes essenciais: probabilidade, desempenho, período de utilização ou tempo esperado e condições de operação.

Esses componentes devem ser considerados adequadamente em cada etapa do ciclo de vida do produto, em especial no processo de projeto, bem como na análise da atividade para garantia da confiabilidade.

A engenharia de projeto ou produto utiliza a confiabilidade para estimar a probabilidade de componentes e sistemas desempenharem funções para as quais foram projetadas em um período de tempo pré-estabelecido sob condições de utilização previstas. Essa quantificação e informação auxiliam empresas e centros de pesquisa na previsão da vida útil do produto, atribuindo ao

mesmo qualidade temporal, como durabilidade e segurança. Podem ser associadas, por exemplo, com a aplicação da confiabilidade, as seguintes informações:

- Determinação da vida útil do produto, com a classificação das falhas levantadas provenientes de: projeto, processo, ocasional, por desgaste ou fadiga;
- O Tempo Médio Entre Falhas (MTBF - *Mean Time Between Failures*), que permite o dimensionamento de estoques de reposição e planos de manutenção;
- A necessidade de correções em projetos ou de *recalls*, antes que as falhas em campo ocorram em grande volume;
- A confiabilidade necessária aos novos projetos, de modo a atender as expectativas crescentes do consumidor.

O elevado padrão da tecnologia atual exige que se adotem “medidas” que assegurem um bom desempenho de componentes e sistemas, bem como sua otimização, elementos estes indispensáveis na concepção e no desenvolvimento de projetos de máquinas e sistemas.

Para Richter e Lopes (2004), a confiabilidade do produto deve ser verificada com construção de protótipos para testes em campo ou para testes em banco de provas antes do lançamento do produto, as quais propiciam a verificação antecipada se determinadas peças e/ou subconjuntos atenderão às especificações de engenharia.

A confiabilidade do produto deverá ser verificada em campo. Mas, muito antes da construção de protótipos para testes de campo ou para testes de laboratório, diversas práticas podem ser adotadas, as quais permitem predizer se determinadas peças e/ou subconjuntos atenderão às especificações de engenharia. Estas verificações são muito importantes para reduzir o custo do projeto e o ciclo de desenvolvimento, como por exemplo, análises de elementos finitos, realidade virtual e simulações dinâmicas.

Uma vez feitas as análises virtuais selecionadas para o projeto em questão, pode-se iniciar a fase de testes de bancada em componentes e testes de campo em protótipos. A partir, do início dos testes há a monitoração dos dados de confiabilidade, através do registro dos dados de falhas, para se obter as funções de confiabilidade, e monitorar a situação real comparando-o com os objetivos estipulados na fase de planejamento.

A confiabilidade do produto será monitorada ao longo das outras fases do desenvolvimento, pelo registro e análise de falhas, permitindo uma comparação da evolução da confiabilidade do produto da fase de protótipo para a fase de lote piloto e início de produção.

Um resumo das atividades relativas a engenharia de confiabilidade, durante o desenvolvimento de produtos, pode ser visto na figura 3.1 (Richter & Lopes, 2004) .

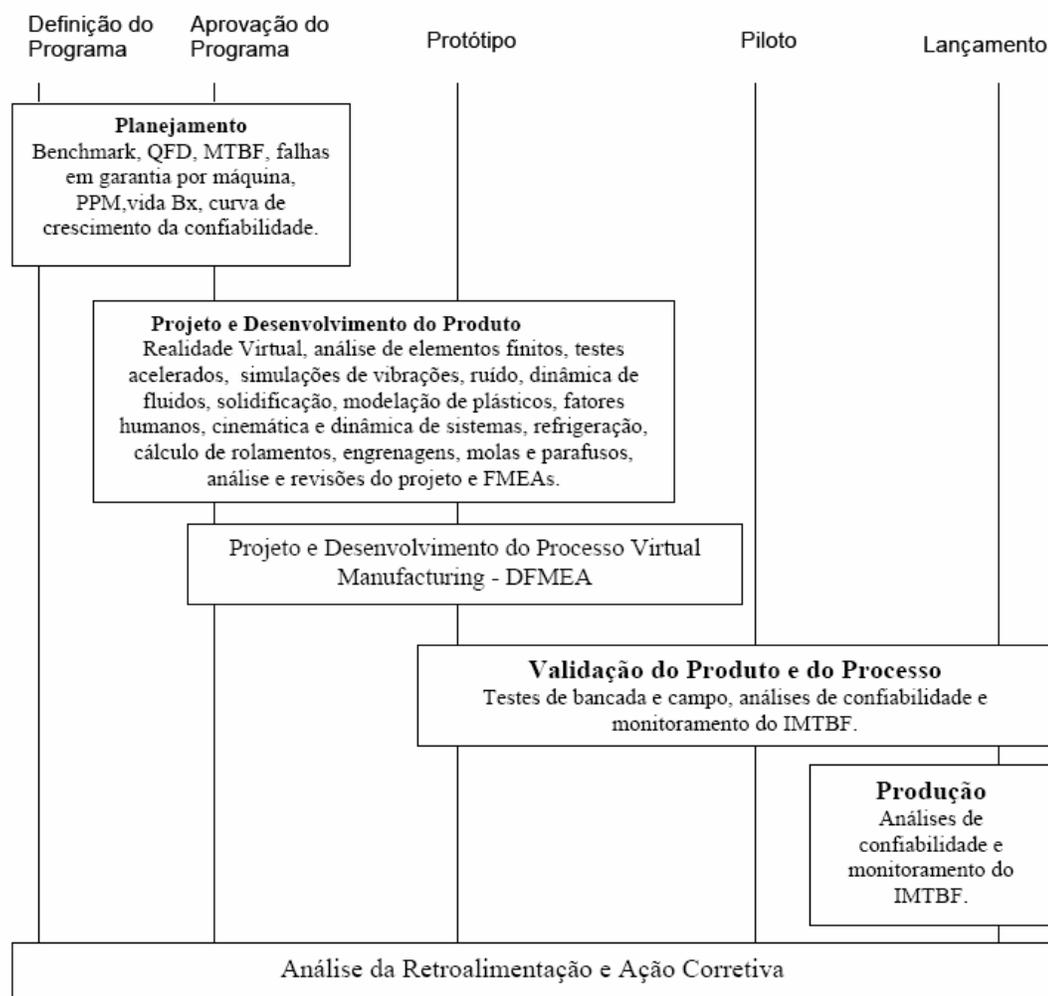


Figura 3.1 - Cronograma de planejamento da qualidade do produto (Richter e Lopes, 2004)

Como pode ser verificado na figura 3.1, a fase piloto é onde se inicia o teste de campo para verificação da confiabilidade do produto. Porém, ainda nesta fase, não é possível entregar o produto para serem testados pelo usuário, pois, o mesmo ainda não foi lançado no mercado. Sendo assim, são desenvolvidas pistas e condições de testes para simulação das aplicações reais

de operação dos veículos, visando a utilização dos dados para análises de confiabilidade, de maneira a agilizar e otimizar o desenvolvimento de novos componentes.

3.1. Classificação de falhas

Para Blashe (1994) para se obter uma boa estimativa da confiabilidade, as falhas devem ser detalhadas. O estudo de falhas é muito subjetivo, ou seja, o que para algumas pessoas são falhas, para outras não são. Fazendo uma analogia entre fabricantes e consumidores, o que para os fabricantes não são falhas, e sim desgaste de produtos com custos direcionados aos usuários, podem ser consideradas falhas por estes, ou seja, ocorre uma diversidade entre usuário e fabricante em relação ao que é exatamente desempenho degradado ou uma falha.

As falhas são efeitos que afetam a função de desempenho de um determinado produto, enquanto que os defeitos não afetam a função de desempenho. Segundo Blashe (1994), o critério de classificação de falha é apresentado na figura 3.2:

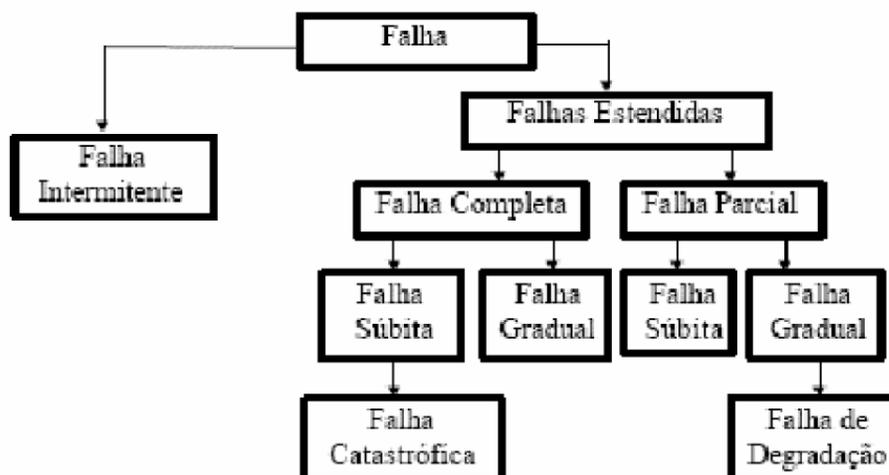


Figura 3.2- Classificação das falhas (Blashe, 1994).

Os tipos de falhas podem ser definidos como:

- Falha Intermitente: Falha que resulta em falta de alguma função do produto, apenas por um curto período de tempo. O componente retorna ao seu estado funcional imediatamente após a falha;
- Falha Estendida: Falha que resulta em falta de algumas funções, e que continuarão até que as partes falhadas sejam substituídas ou reparadas. Falhas estendidas se dividem em dois tipos:
 - Falha Completa: Falha que causa uma falta completa de uma função exigida.
 - Falha Parcial: Falha que conduz à falta de algumas funções;

Estas por sua vez, podem ser de natureza:

- Falha Súbita: Falhas que não podem ser prevenidas através de testes e inspeção;
- Falha Gradual: Falha que pode ser prevista através de teste e inspeção.

As falhas ainda podem ser combinadas para dar a seguinte classificação:

- Falhas Catastróficas: Falhas que são ambas Súbita e Completa e;
- Falha de Degradação: Falhas que são ambas Parcial e Gradual.

Blashe (1994) sugere, ainda, outros tipos de falha relacionados com o ambiente e modo de operação:

- Falhas de Desgaste: Falhas atribuídas ao processo normal de desgaste de um equipamento;
- Falhas de Mau Uso: Falhas atribuídas a aplicação de estresse, além das condições de uso para que o produto foi projetado.
- Falhas Inerentes a Fragilidade: Falhas devido a erros de projeto, produção ou montagem, que fazem com que o item falhe quando sujeito a estresse dentro das capacidades especificadas.

Outra proposta de classificação de falha é sugerido pela Norma MIL-STD-781, que define dois tipos de falha:

- Falha não Relevante: falha causada por uma condição externa que não é um requisito do produto e que não é esperada em campo durante o uso do produto.
- Falha Relevante: falha que é um requisito do produto e poderia razoavelmente ocorrer no campo.

3.2. Função taxa de falhas

A função taxa de falhas $\lambda(t)$ em diferentes situações e períodos de tempo, fornece informações sobre o ciclo de vida, assemelhando-se ao perfil de uma banheira (por isso a denominação em inglês (*BathCurve*), caracterizada por três regiões distintas (figuras 3.3 e 3.4):

Região I: corresponde às falhas precoces, que surgem durante a instalação: montagem, falhas no material, componentes com dimensões fora da tolerância ou mesmo falha no conceito do projeto, são alguns exemplos que podem causar altas taxas de falha no início da vida dos componentes. Premissas como controle total da qualidade na produção, utilização de ferramentas da qualidade, como FMEA e FTA, qualidade no processo de fabricação entre outras ações, proporcionam uma redução na variabilidade, tornando o processo e o produto mais robustos, reduzindo assim, possíveis falhas nesta região da curva da banheira.

Região II: corresponde ao tempo de vida útil do componente ou sistema. Durante este período, as falhas são aleatórias e a taxa de falhas é constante, correspondendo a uma função densidade $f(t)$ exponencialmente decrescente. Segundo Souza (2002), as falhas aleatórias normalmente se originam de carregamentos inevitáveis e inesperados e menos comumente devido a defeitos inerentes ao equipamento em si.

Região III: corresponde à fase de desgaste ou fadiga, durante a qual a taxa de falhas aumenta rapidamente com o passar do tempo.

Muitos fabricantes que trabalham com alta confiabilidade submetem seus produtos a uma “queima” inicial num período t_1 , eliminando desta forma a região I de falhas de início de funcionamento, na operacionalização do equipamento ou componente ou sistema. É interessante substituir o componente após $(t_1 - t_2)$ horas de operação, mesmo que não tenha falhado. Para

atingir elevados níveis de confiabilidade, todos os componentes devem operar dentro de seu período de vida útil.

Segundo O'Connor (1991), a predição da confiabilidade é desejável em qualquer desenvolvimento de produtos, pois está intrinsecamente ligada ao conhecimento das causas dos diversos modos de falhas, assim como as respectivas ações corretivas.

Conforme Ramakumar (1993), equipamentos eletrônicos apresentam um período de vida útil muito longo, com elevados valores de intervalo ($t_1 - t_2$). No caso de componentes mecânicos, a região III de desgaste tende a predominar, devido aos fenômenos de desgastes, fadiga, corrosão e outros efeitos que colocam o equipamento em processo de degradação. Estes dois casos extremos são ilustrados nas Figuras 3.3 e 3.4.

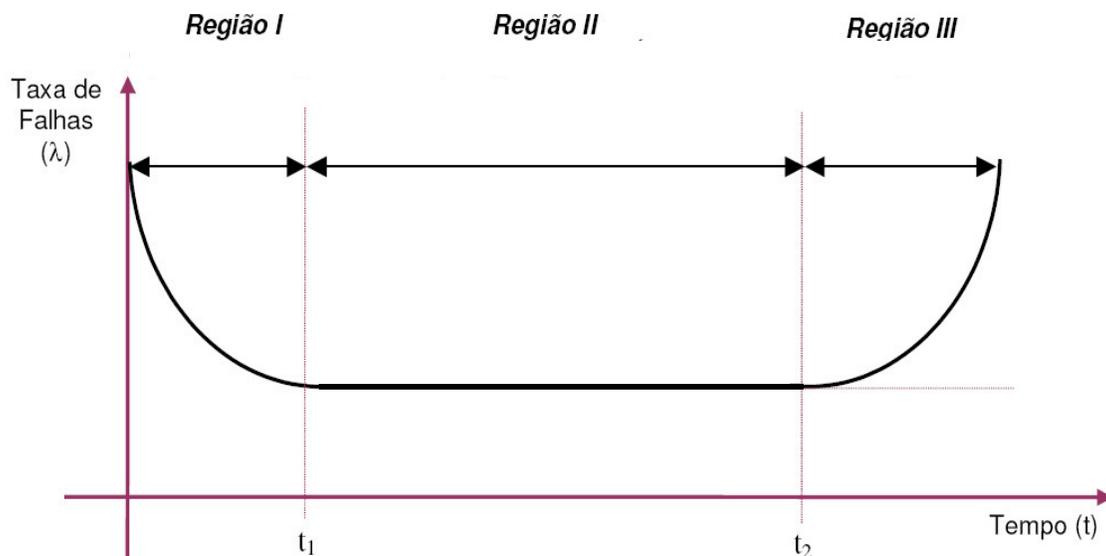


Figura 3.3 – Exemplo da curva da banheira para componentes eletrônicos (Ramakumar, 1993)

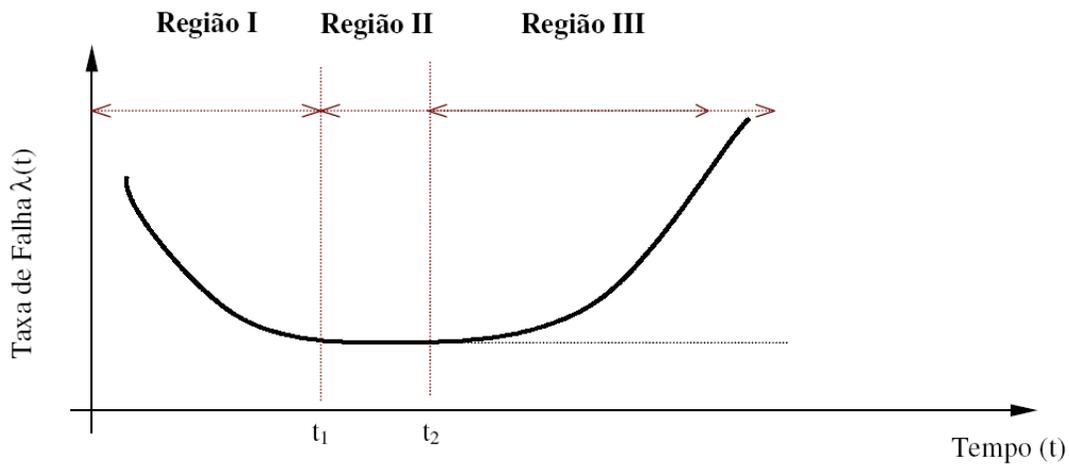


Figura 3.4 – Exemplo da curva da banheira para componentes mecânicos (Ramakumar, 1993)

3.3. Classificação dos dados

Segundo Gunter (1994), os dados de campo são considerados censurados, ou seja, existem registros sobre os dados dos veículos que falharam, porém não são registradas informações sobre os veículos que não falharam ao longo do período de garantia, nem mesmo a quilometragem ao final deste período.

Segundo Lopes (2001), os testes realizados para medir a confiabilidade ou durabilidade de um produto normalmente demandam muito tempo e apresentam custos elevados. Mesmo que leve algum tempo para o final do teste, alguns produtos podem ainda não ter falhado, portanto, essas informações são ditas incompletas ou parciais, e serão chamadas de observações censuradas. Mesmo que se tenham encontrado observações censuradas, todos os resultados provenientes do teste devem ser utilizados na análise estatística. Existem duas razões que justificam tal procedimento:

- 1) Observações censuradas fornecem informações sobre o tempo de vida do produto;
- 2) Com a apresentação das censuras, pode-se obter o efeito da omissão das censuras no cálculo das medidas de confiabilidade.

Alguns mecanismos de censura são diferenciados em testes de confiabilidade e durabilidade:

- Censura Tipo I é aquela cujo teste será terminado após um tempo pré-estabelecido;
- Censura Tipo II é aquela cujo teste será terminado quando um certo número de produtos pré-estabelecidos falharem;
- Censura múltipla, é a que ocorre quando existem tempos de suspensão diferentes misturados aos tempos de falhas. Normalmente, ocorre quando unidades são colocadas em testes em tempos diferentes. Esse tipo de censura pode ser classificado como tipo I ou tipo II.
- Censura Aleatória, é a que ocorre quando, por força maior, tira-se um produto do teste sem ter ocorrido uma falha. Geralmente, esse tipo de censura está associado a um outro tipo de falha qualquer, independente daquelas que estavam sendo analisadas.

Abaixo seguem os gráficos (Figura 3.5) esquematizados por Nelson (1990) para os tipos de censura simples I, II e censura múltipla.

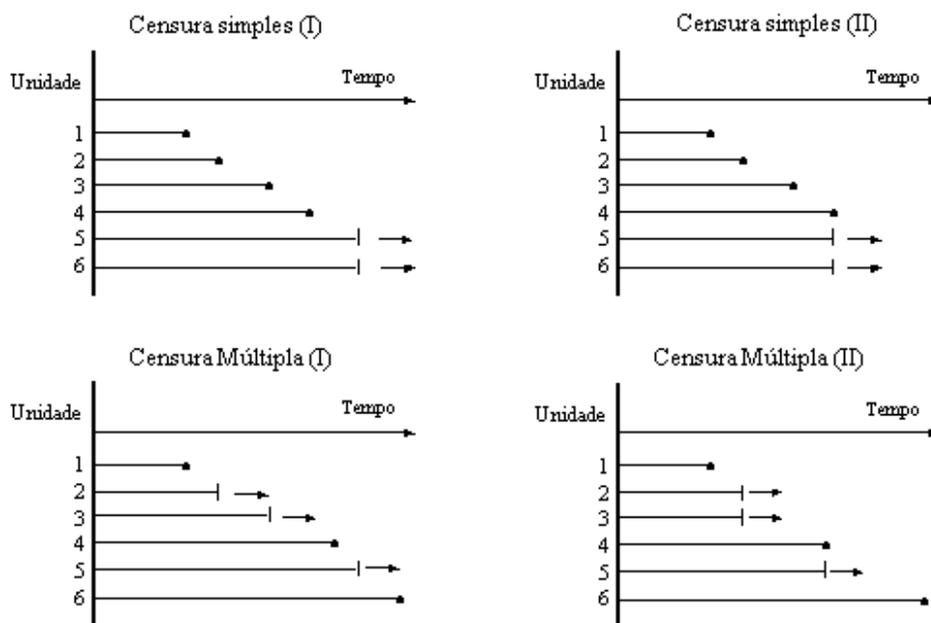


Figura 3.5 – Tipos de Censuras utilizadas em confiabilidade (Nelson, 1990).

3.4. Distribuições estatísticas

Existem várias funções que podem modelar uma distribuição probabilística de uma variável aleatória. Os parâmetros para escolha do modelo matemático estatístico a ser utilizado na análise de confiabilidade provêm do tipo de teste de falha realizado e do tipo e tamanho da amostra analisada.

Segundo Pallerosi (2006) há cinco tipos principais de distribuições utilizadas nas análises de confiabilidade:

- Weibull (com 1,2 e 3 parâmetros);
- Weibull – Mista (Bi – Weibull, Tri-Weibull) ou Multimodal;
- Exponencial (com 1 ou 2 parâmetros);
- Lognormal (com 2 parâmetros);
- Normal (com 2 parâmetros);

e as distribuições complementares,

- Logística (2 parâmetros);
- Log-logística (2 parâmetros);
- Menor valor extremo (2 parâmetros).

A seguir será feito um melhor detalhamento das principais distribuições.

3.4.1 - Distribuição Lognormal

A distribuição lognormal é aplicada, principalmente, quando ocorre uma significativa quantidade de falhas no início da vida do produto, e poucas falhas no fim da vida, apresentando assimetria em relação ao valor médio.

a) Principais características e propriedades da distribuição Lognormal

Uma variável aleatória (t) apresenta distribuição Lognormal se o seu logaritmo natural L(nt) é normalmente distribuído, dado pela densidade de probabilidade de falha correspondente à função:

$$f(t') = \frac{1}{\sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[(t' - \mu') / \sigma' \right]^2} \quad (3.1)$$

com os parâmetros,

Posição : μ' = Valor médio do logaritmo natural (Ln μ) dos tempos até falha;

Forma : σ' = Desvio - padrão do logaritmo natural (Ln σ) dos tempos até falha;

satisfazendo às condições,

$$f(t') \geq 0 \quad ; \quad t' > 0 \quad ; \quad -\infty < \mu' < \infty \quad ; \quad \sigma' > 0 .$$

e com as seguintes principais características e propriedades:

- A distribuição é assimétrica, tendendo a uma simetria para pequenos valores do Desvio-padrão (σ'), referente à variação da densidade de probabilidade de falha f (t').
- Os parâmetros de escala são dados por:

$$\text{Média} : \mu = \bar{T} = e^{\mu' + \frac{1}{2} \cdot (\sigma')^2} \quad (3.2)$$

$$\text{Mediana} : \tilde{T} = e^{\mu'} \quad (3.3)$$

$$\text{Moda} : \tilde{\tilde{T}} = e^{\mu' - (\sigma')^2} \quad (3.4)$$

- A distribuição é do tipo biparamétrica onde o Valor médio (μ') corresponde ao parâmetro de escala e o desvio-padrão (σ') ao parâmetro de forma.

- As principais aplicações práticas da distribuição Lognormal correspondem a falhas em rolamentos, motores e geradores, fadiga em metais, componentes do estado sólido (semicondutores, diodos e outros), e isolantes elétricos.

b) Equação da confiabilidade para distribuição Lognormal

A Confiabilidade $R(t)$ para distribuição Lognormal é do tipo biparamétrica, dada por:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t') \cdot dt = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[(t' - \mu') / \sigma' \right]^2} \cdot dt \quad (3.5)$$

com uma correspondente probabilidade de falha $F(t)$ dada por

$$F(t) = 1 - R(t) = \int_{-\infty}^t f(t') \cdot dt = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[(t' - \mu') / \sigma' \right]^2} \cdot dt \quad (3.6)$$

cuja variação típica é apresentada nas Figuras 4.26.a, satisfazendo à condição $R(t)+F(t)=1$

As equações (3.5) e (3.6) não possuem solução direta, sendo calculadas por meio de tabelas de números Normais ou por programas computacionais, como por exemplo o Weibull ++ [C01].

c) Influência da média e do desvio-padrão

Os significados dos parâmetros (μ', σ') da distribuição Lognormal, como indicado na Fig. 3.6.b, são :

O parâmetro de forma corresponde ao Desvio-padrão (σ') da distribuição Lognormal, dado pela relação

$$\sigma' = \{ \text{Ln} [(\sigma/\mu)^2 + 1] \}^{1/2} \quad (3.7)$$

- O desvio-padrão da distribuição é dado por

$$\sigma = [(e^{2 \cdot \mu' + (\sigma')^2}) \cdot (e^{(\sigma')^2} - 1)]^{1/2} \quad (3.8)$$

- O parâmetro de posição corresponde ao Valor médio (μ') dado por:

$$\mu' = \text{Ln } \mu - \frac{1}{2} \cdot \text{Ln} [(\sigma / \mu)^2 + 1] = \text{Ln } \mu - \frac{1}{2} \cdot (\sigma')^2 \quad (3.9)$$

- A densidade de probabilidade de falha da distribuição Normal é relacionada com a distribuição Lognormal por

$$f(t) = \frac{f(t')}{t} = \frac{1}{t \cdot \sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[(t' - \mu') / \sigma' \right]^2} \quad (3.10)$$

- A probabilidade acumulada de falhas $F(t)$ é crescente a partir de $t = 0$ até o valor da Moda (\tilde{T}) na qual assume o valor $F(t) = 0,5$ (50%), como indicado na figura 3.6.a. A seguir continua crescente, porém com menor intensidade.
- A densidade de probabilidade de falha é significativamente influenciada pelo desvio-padrão (σ'), como indicado na figura 3.6.b. Para grandes valores, por exemplo, $\sigma' = 5$ a distribuição Lognormal apresenta comportamento semelhante à distribuição de Weibull com $\beta < 1$ (valores sempre decrescentes).

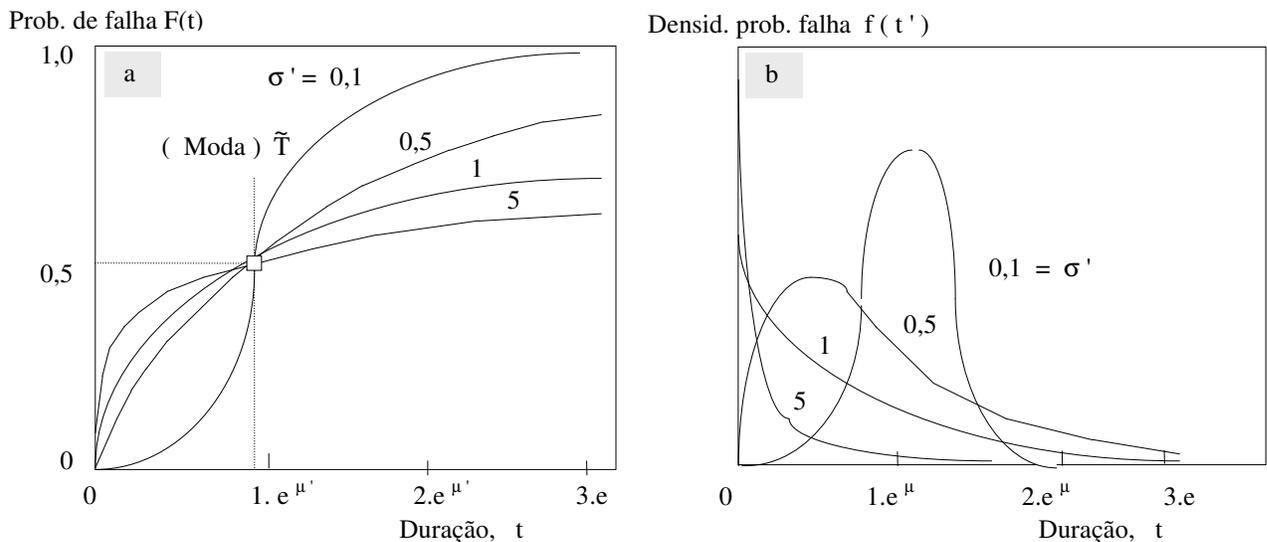


Figura 3.6 – Variação da Confiabilidade $R(t)$ e da Densidade de probabilidade de falha $f(t)$ na distribuição Lognormal, em função do Desvio-padrão (σ').

Por outro lado, a equação (3.6) pode ser escrita na forma:

$$F(t) = f(z') \quad \text{ou} \quad R(t) = 1 - F(t) = 1 - f(z') \quad (3.11)$$

$$\text{com } z' = \frac{t' - \mu'}{\sigma'} \quad (3.12)$$

d) Taxa de falha para distribuição Lognormal

A taxa instantânea de falha $\lambda(t)$ para a distribuição Lognormal, com média (μ') e desvio-padrão (σ') é dada por:

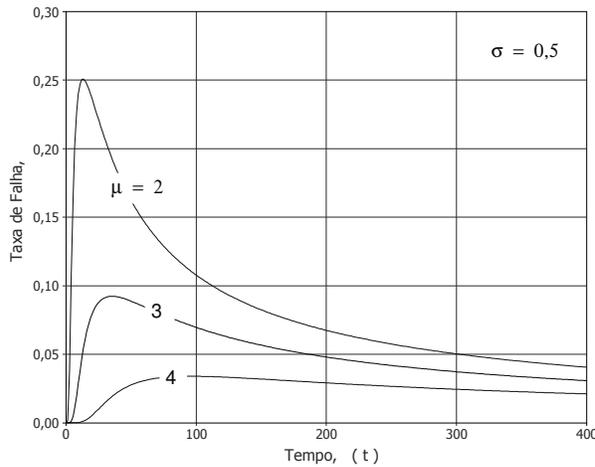
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{\sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} [(t-\mu')/\sigma']^2}}{\int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-[(t-\mu')/\sigma']^2} \cdot dt} \quad (3.13)$$

A solução desta equação é obtida, por meio de programas computacionais.

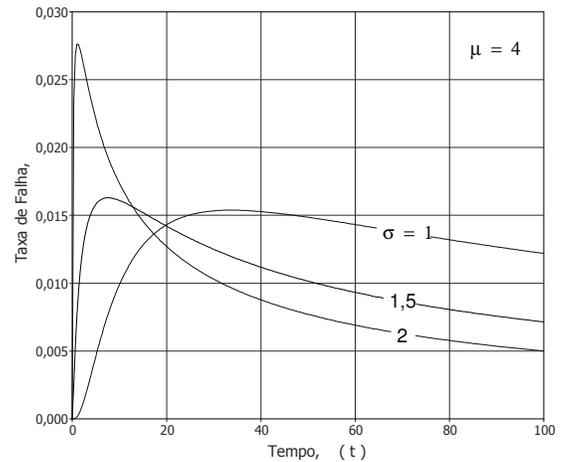
Na figura 3.7.a é mostrada a variação da taxa instantânea de falha $\lambda(t)$, em função da média (μ), nota-se que um aumento de seu valor desloca as curvas para baixo, ou seja, corresponde a uma diminuição da função taxa de falha (λ) para um mesmo valor da duração (t).

Na figura 3.7.b é mostrada a variação da taxa instantânea de falha $\lambda(t)$ em função do desvio-padrão (σ), verifica-se que um aumento de seu valor desloca as curvas para baixo, ou seja, corresponde a uma diminuição da função taxa de falha (λ) para um mesmo valor da duração (t).

Em ambos os casos (figuras 3.7.a e 3.7.b) as falhas concentram-se no início da vida do produto, o que é característico da distribuição Lognormal.



a) Influência da Média (μ').



b) Influência do Desvio-padrão (σ')

Figura 3.7 - Influência dos parâmetros na variação da taxa instantânea de falha para distribuição Lognormal.

e) Tempo médio para distribuição Lognormal

Neste caso a distribuição é assimétrica, com o Valor médio (\bar{T}) dado por:

$$\bar{T} = e^{\mu' + \frac{1}{2} \cdot (\sigma')^2} \quad (3.14)$$

f) Densidade de probabilidade para distribuição Lognormal

A densidade de probabilidade de falha $f(t)$, dada pela equação 3.15, é um importante instrumento de visualização de como ocorrem as falhas durante a vida do produto, e como estas estão estatisticamente distribuídas, ou seja,

- os produtos podem apresentar falhas concentradas no início, meio ou fim da sua duração;
- dois produtos podem ser comparados para verificação de possíveis e diferentes modos de propagação das falhas ao longo da vida.

$$f(t') = \frac{1}{\sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[(t' - \mu') / \sigma' \right]^2} \quad (3.15)$$

com os parâmetros,

Posição : μ' = Valor médio do logaritmo natural dos tempos até falha;

Forma : σ' = Desvio – padrão do logaritmo natural dos tempos até falha;

A influência dos parâmetros é apresentada na figura 3.8, onde um aumento da média (μ') desloca as curvas para a direita e reduz os valores de $f(t)$, e um aumento do desvio-padrão (σ') desloca as curvas para a esquerda e aumenta o valor máximo de $f(t)$.

Para a duração $t = 0$ (valor inicial) resulta, da equação (3.15), o valor de:

$$f(0) = \frac{1}{\sigma' \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[(-\mu') / \sigma' \right]^2} \quad (3.16)$$

ou seja, existe um valor inicial $f(t) > 0$, correspondente a uma probabilidade de falha $F(0) > 0$.

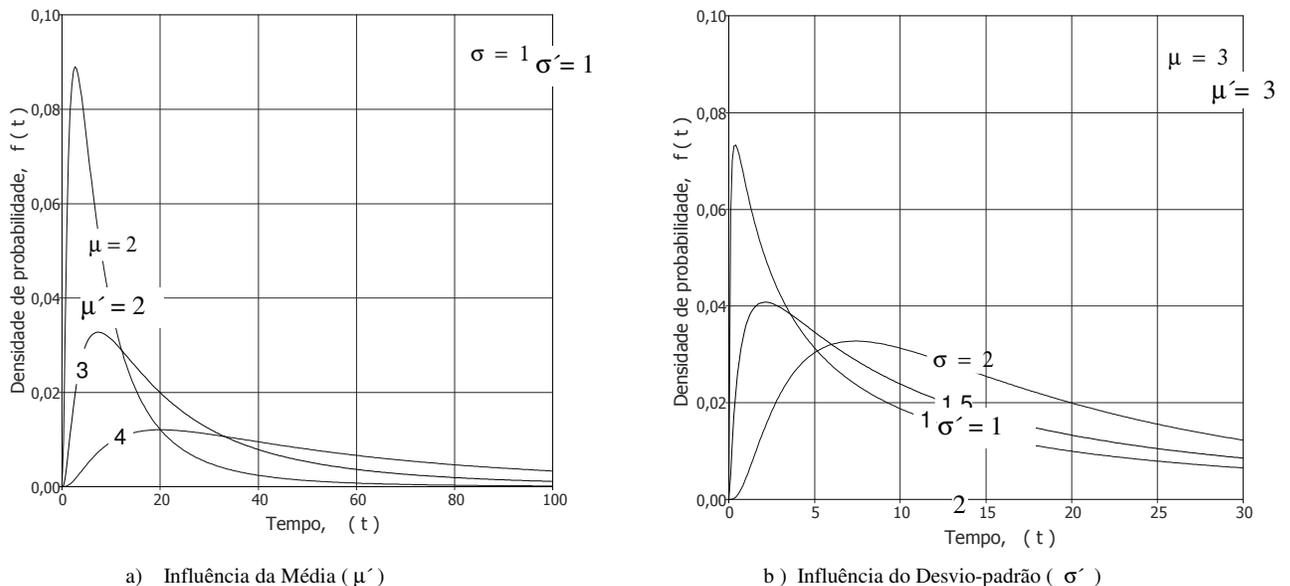


Fig. 3.8 - Influência da Média (μ') e do Desvio-padrão (σ'), distribuição tipo Lognormal.

3.4.2. Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull foi proposta originalmente por W. Weibull (1954) em estudos relacionados ao tempo de falha, devido a fadiga de metais. É uma distribuição frequentemente empregada para descrever o tempo de vida de produtos industriais. A distribuição de Weibull também descreve adequadamente o tempo de vida de componentes ou subconjuntos.

O modelo físico que ajusta a distribuição de Weibull origina-se da teoria dos valores extremos, mais especificamente, das distribuições de Gumbell.

A distribuição geral de Weibull apresenta as seguintes características:

- a) Permite uma aplicação à maioria dos casos práticos, com boa precisão, motivo de seu amplo emprego;
- b) A distribuição tipo exponencial resulta como um caso particular, e as do tipo Normal, Lognormal, Rayleigh, ou do Valor Extremo, como uma razoável aproximação, suficiente em grande número de aplicações práticas;
- c) Permite caracterizar as falhas durante a juventude, vida útil e velhice (obsolescência) dos componentes (tipo Weibull – Misto);
- d) Na sua forma simplificada (biparamétrica) pode ser aplicada a muitos casos práticos, por sua maior simplicidade e facilidade de entendimento;
- e) Na sua forma triparamétrica permite a análise dos casos onde o início da operação do produto não coincide com o início da análise, por exemplo, quando uma aeronave apresentava uma dada quantidade de horas de vôo anterior ao início do registro das falhas;
- f) A disponibilidade pode ser expressa por uma equação geral, quando a confiabilidade e a manutenibilidade são expressas pela distribuição tipo Weibull.

a) Confiabilidade para Weibull Triparamétrica

Em função da variável t , a equação geral de Weibull, na sua forma triparamétrica é dada por:

$$R(t) = e^{[\lambda_0 \cdot (t-\gamma)]^\beta} = e^{-\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]^\beta} \quad (3.17)$$

Onde:

t = variável de referência para tempo, distâncias, ciclos, etc.

γ = vida mínima ou parâmetro de posição.

λ = taxa de falha característica, correspondente ao valor $R = e^{-1} = 0,367879$ (37%). Seu valor é normalmente da ordem de 10^{-6} falhas/hora, ou seja, em quantidade de falhas por milhão, ou em % falhas/1000 h de uso (operação).

β = parâmetro de forma, que define a variação da confiabilidade, ao longo da vida do componente ou sistema. Quanto maior β , maior a inclinação da reta no gráfico.

$\eta = 1/\lambda^\circ$ = vida característica ou parâmetro de escala, correspondente ao valor da confiabilidade; $R = e^{-1} = 0,367879$ (37%) ou ao valor da probabilidade acumulada de falha de $F = 0,632121$ (63%).

A função F (probabilidade acumulada de falha) é dada por:

$$F(t) = 1 - e^{[\lambda_0 \cdot (t-\gamma)]^\beta} = 1 - e^{-\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]^\beta} \quad (3.18)$$

A função densidade probabilidade de falha é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]^\beta} \quad (3.19)$$

b) Confiabilidade para Weibull Biparamétrica.

Na sua forma biparamétrica, ou seja, quando o parâmetro de posição γ é nulo, geralmente correspondente a elementos (componentes, produtos) novos, em vida inicial, observada em registros históricos de bancos de dados de falhas ou resultados de ensaios, resulta para a confiabilidade (R) na equação:

$$R(t) = e^{-(\lambda_o t)^\beta} = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.20)$$

e para a probabilidade de falha (F):

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-(\lambda_o t)^\beta} = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.21)$$

A função densidade de probabilidade de falha é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.22)$$

c) Influencia dos parâmetros de forma de Weibull nas principais Funções de Confiabilidade

Como foi citado anteriormente, a lei de distribuição de Weibull é uma distribuição muito flexível, que pode se aproximar a outras distribuições segundo os valores do parâmetro de forma β , o que pode ser observado nas figuras 3.9 , 3.10 e 3.11 a seguir, obtidas de gráficos elaborados em planilha eletrônica a partir das equações anteriores:

a) Função densidade de probabilidade de falha – pdf :

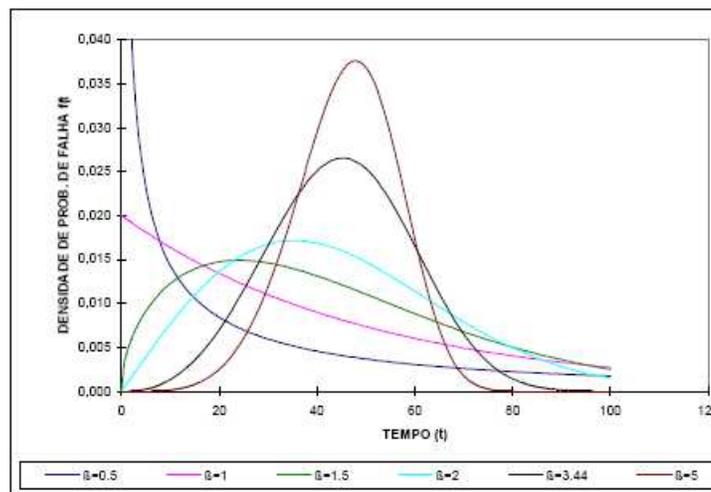


Figura 3.9: Cuvas da densidade da probabilidade de falha em função do tempo para beta variando de 0,5 a 5.

A Figura 3.9 mostra a forma da distribuição densidade de probabilidade de falha para diferentes valores de parâmetro β . Para $\beta = 1$, a distribuição de Weibull é a distribuição Exponencial. Para $\beta = 2$, a distribuição passa a ser a distribuição de Rayleigh. Para valores $3 \leq \beta \leq 4$, é próxima a distribuição normal.

b) – Função de Confiabilidade:

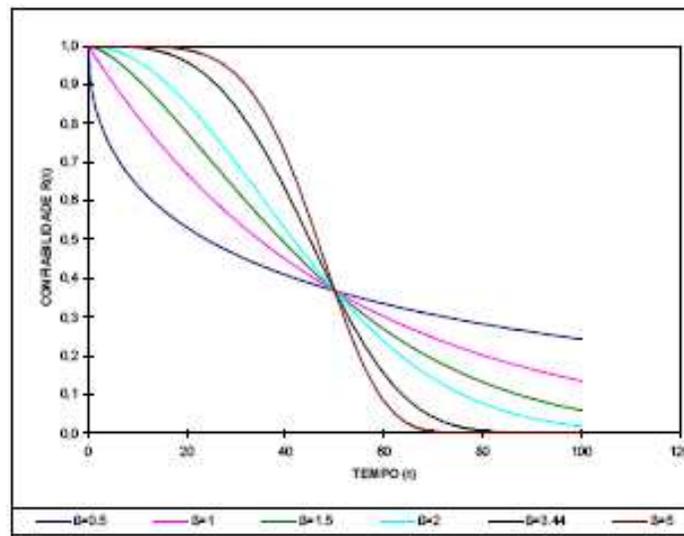


Figura 3.10 : Influência do Parâmetro β na Função de Confiabilidade $R(t)$

Quanto maior o parâmetro de forma, maior a área sob a curva $R(t)$ até o ponto de inflexão, e a função de confiabilidade decresce de forma mais acentuada. Esta área corresponde ao tempo médio até a falha, ou ainda, *MTTF - Mean Time To Failure*.

c) – Função Taxa de Falha :

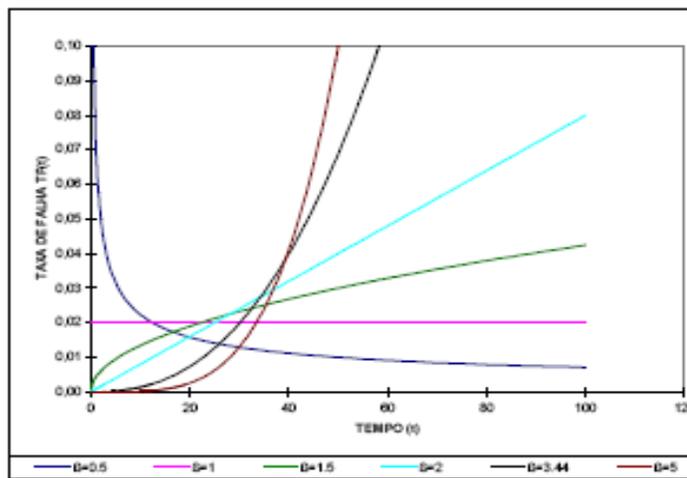


Figura 3.11 : Influência do Parâmetro β na Função Taxa de Falha $\lambda(t)$.

Quanto maior o valor de β , mais acentuado é o crescimento da taxa de falhas.

3.4.3. Distribuição exponencial

É uma distribuição de probabilidade que se caracteriza por ter uma função de taxa de falha constante. A função de densidade para um tempo de falha T com distribuição exponencial é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{t}{\alpha}}, (t \geq 0), \quad (3.26)$$

$\alpha \geq 0$ vem a ser o tempo médio de vida e $\lambda = 1 / \alpha$ conforme Figura 3.12.

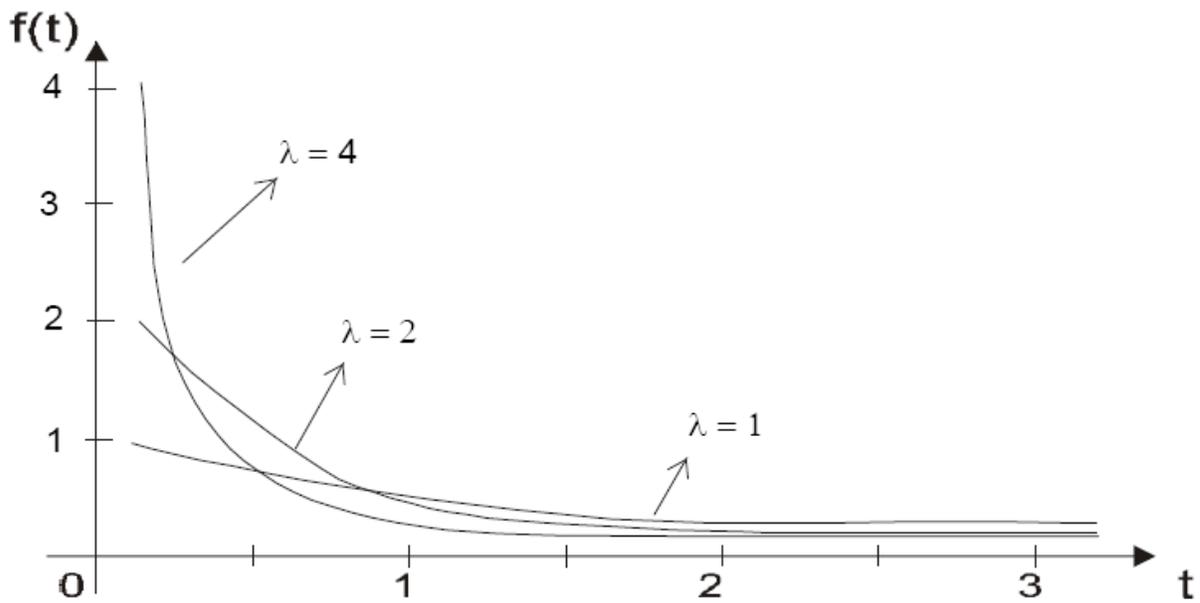


Figura 3.12: Função densidade de probabilidade exponencial para alguns valores de λ

a) Características da distribuição exponencial

- Esperança matemática da distribuição exponencial = MTTF

$$MTTF = E(T) = \frac{1}{\lambda} = \alpha \quad (3.27)$$

- Variância da distribuição exponencial

$$V(T) = \frac{1}{\lambda^2} = \alpha^2 \quad (3.28)$$

- Função de confiabilidade

$$R(t) = e^{-\frac{t}{\alpha}} \quad (3.29)$$

3.4.4. Distribuição Normal

A distribuição normal, também denominada de distribuição gaussiana, é a mais importante e a mais utilizada dentro da estatística. Está associada aos nomes de Pierre Laplace e Carl Gauss. A distribuição da curva normal provém de erros de medida, fenômeno, que Gauss denominou de “lei normal dos erros”. Nos primórdios de seu uso, muitos acreditavam que todos os fenômenos deveriam seguir a Lei Gaussiana, porém, posteriormente, percebeu-se que em muitas situações a distribuição não seguia a forma da normal.

Segundo Cavalca (2006), “em confiabilidade, a distribuição normal é utilizada para analisar produtos durante o início de vida e na fase de degradação natural, ou ainda, falha por fadiga ou desgaste”.

Na distribuição normal, a função densidade de probabilidade (fdp) é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi}\sigma_t} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t - m_t}{\sigma_t} \right)^2 \right], -\infty \leq t \leq +\infty \quad (3.30)$$

sendo t a variável aleatória.

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

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

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\Pi}\sigma_t} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t - m_t}{\sigma_t} \right)^2 \right] dt \quad (3.31)$$

Considerando as dificuldades envolvidas na integração da função densidade de probabilidade da distribuição normal, a função distribuição acumulada é dada em forma de tabela. Buscando a padronização desta tabela, apresenta-se a função distribuição acumulada a partir da denominada distribuição normal reduzida, para a qual tem-se: (m)=0 e (σ)=1.

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

$$P(t < t_0) = F(t_0) = \Phi\left(\frac{t_0 - m_t}{\sigma_t}\right) \quad (3.32)$$

Onde:

Φ = distribuição acumulada da distribuição normal reduzida;

m_t = média da população;

σ_t = desvio padrão da população;

A mudança de variável para expressar a distribuição normal reduzida, caracterizada por (m_t) = 0; (σ_t) = 1, é dada por:

$$u = \frac{t_0 - m_t}{\sigma_t} \quad (3.33)$$

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

O valor esperado ou média da distribuição é determinado utilizando a equação abaixo:

$$E[t] = \int_{-\infty}^{+\infty} tf(t)dt = m_t \quad (3.34)$$

A variância é definida por:

$$Var[t] = E[t^2] - E^2[t] = \sigma_t^2 \quad (3.35)$$

Percebe-se que a distribuição normal é totalmente caracterizada pelos parâmetros média e variância (desvio padrão).

A distribuição normal é simétrica, centrada na própria média da população, sendo coincidentes os valores da moda, mediana e média. Dessa 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 (Haviaras, 2005)

3.5. Modelo de degradação

Com a redução nos prazos de desenvolvimento de produtos, tendência que se observa no cenário atual, os testes de confiabilidade precisam ser conduzidos com severas restrições de tempo. Tradicionalmente, são usados testes de vida, que necessitam somente do tempo até a falha para estimar a confiabilidade de um produto ou componente. No entanto, algumas vezes, os testes de vida resultam em pouca ou nenhuma falha, dificultando a estimativa da confiabilidade. Para alguns componentes, as medidas de degradação tomadas ao longo do tempo, contêm informação suficiente sobre a confiabilidade do produto. Segundo Ribeiro (1998), se a falha é definida em termos de um nível específico de degradação, é possível construir um modelo de degradação e estimar a distribuição do tempo até a falha a partir das medidas de degradação. Assim, a falha e a distribuição do tempo de vida podem ser previstas mesmo que nenhuma unidade falhe.

Meeker e Hamada (1995) colocam que as medidas de degradação podem, particularmente onde pouca ou nenhuma falha é esperada, proporcionar considerável informação em relação aos dados de tempo até falhas disponíveis. Colocam, ainda, que a observação direta do processo de degradação, em substituição aos testes acelerados comumente usados para obter informações

mais rápidas em testes de confiabilidade, permite modelagem direta do mecanismo de causa da falha, proporcionando maior credibilidade, e base para extrapolações.

Segundo Pohl e Ribeiro (1998), um modelo de degradação constitui-se em uma curva, ou uma família de curvas, que revela a evolução da degradação, ou queda de desempenho, de um determinado componente ou produto, submetido a uma determinada carga de trabalho ao longo do tempo. Para um produto específico, existem propriedades padrão de desempenho e métodos para medi-las. Certas propriedades degradam-se com a idade do produto e esta degradação pode ou não ser acelerada na presença de altos níveis de solicitações.

Segundo Pallerosi (2006), a análise de degradação envolve os procedimentos apresentados na figura 3.13.

O modelo de degradação proposto neste trabalho ajusta dados advindos de ensaios não-acelerados. O modelo não contempla o uso de variáveis de aceleração, somente o tempo de uso e a respectiva degradação (desgaste) do produto, e utiliza todos os procedimentos descritos na figura 3.13.

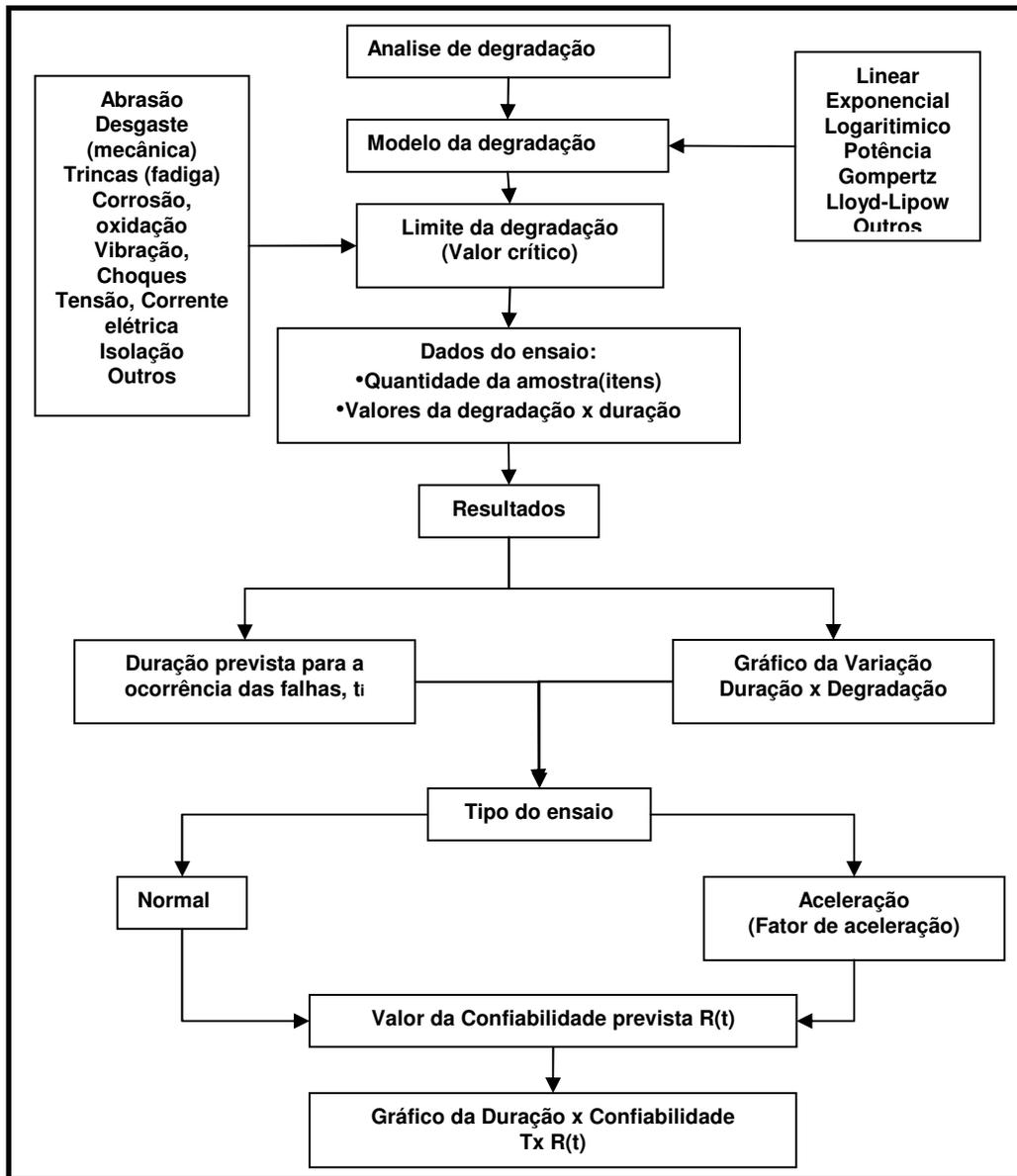


Figura 3.13 – Procedimentos básicos para a análise de degradação (Pallerosi, 2006).

3.5.1. Modelo de degradação para dados não-acelerados

Para se obter valores de confiabilidade de um determinado produto são necessários os dados referentes aos tempos até a falha. Devido à necessidade de se antecipar os resultados de testes ou, muitas vezes, quando se trata de testes em veículos que possuem inúmeros componentes em teste simultaneamente, sendo que se um determinado componente falha, não sendo possível a sua substituição, e os demais componentes dependem desse componente para chegar até a falha, é

necessário a utilização do modelo de degradação para alcançar o objetivo com os dados de desgaste obtidos até aquele instante.

Com a crescente necessidade de reagir e adaptar-se às rápidas mudanças do mercado, o tempo disponível para testar um produto têm sido cada vez menor.

Com base nas medidas de degradação é possível ajustar modelos que relacionam a degradação com o tempo de uso e, então, concluir a respeito da provável vida útil do produto.

Segundo Polh e Ribeiro (1998), o modelo de degradação para dados não-acelerados contempla quatro modelos básicos, os quais representam o comportamento de um grande número de produtos, incluindo alimentos, produtos eletro-eletrônicos, componentes mecânicos, entre outros. Esses quatro modelos podem ser classificados em: modelo linear ou não linear, com início da degradação no tempo zero ou após algum tempo de uso.

a) Modelo linear com degradação iniciando logo após o uso

Esse modelo incorpora o caso de produtos cuja degradação é linearmente proporcional ao tempo de uso, iniciando-se imediatamente após a primeira utilização do produto como apresentado na figura 3.14.

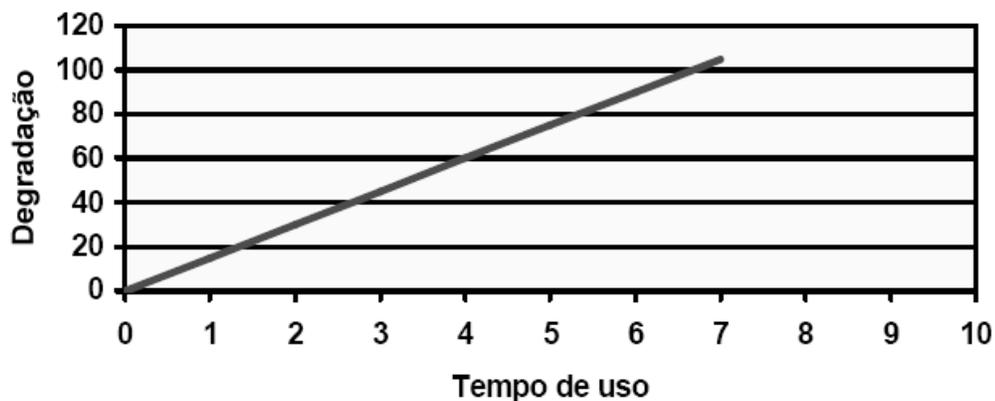


Figura 3.14: Modelo linear com degradação iniciando logo após uso (Polh e Ribeiro, 1998).

b) Modelo linear com degradação iniciando após algum tempo de uso

Esse modelo também prevê uma degradação linearmente proporcional ao tempo de uso, mas agora tem-se que a degradação somente iniciará algum tempo após o início da utilização do produto, como apresentado na figura 3.15.

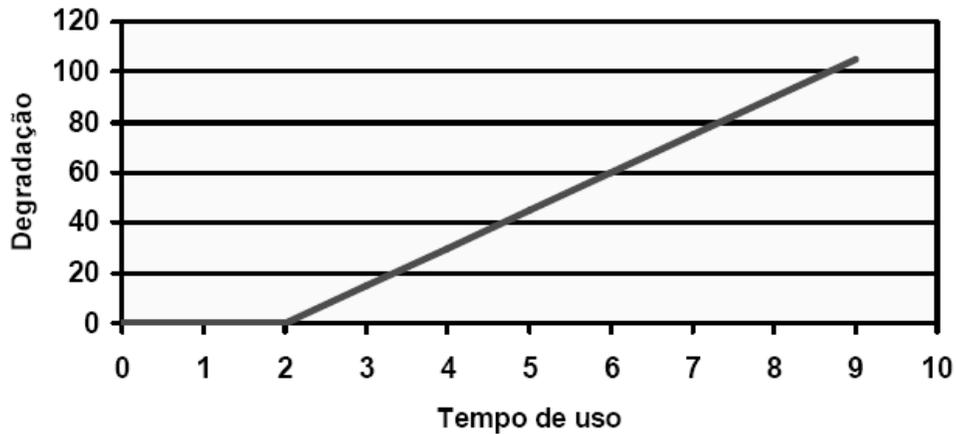


Figura 3.15: Modelo linear com degradação iniciando após algum tempo de uso (Polh e Ribeiro 1998).

c) Modelo não-linear com degradação iniciando após algum tempo de uso

Este modelo também prevê uma degradação não linear, mas agora tem-se que a degradação somente iniciará algum tempo após o início da utilização do produto. Novamente, a não linearidade, é vista, em geral, como um crescimento exponencial da degradação, como apresentado na figura 3.16.

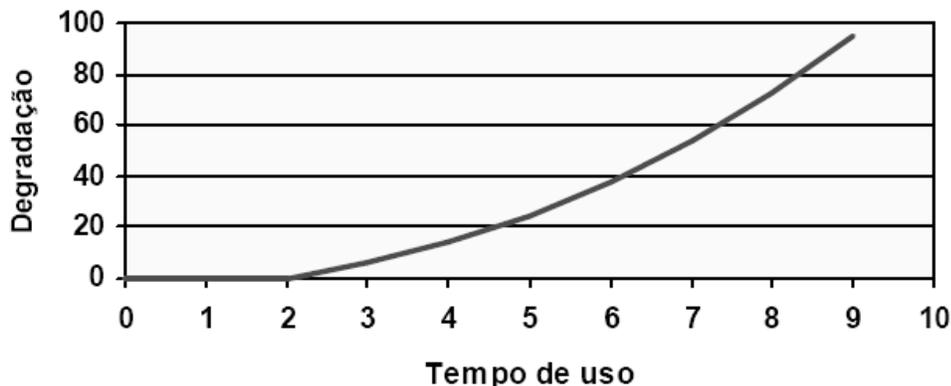


Figura 3.16: Modelo não-linear com degradação iniciando após algum uso (Polh e Ribeiro 1998)

Nelson (1990) coloca que os testes acelerados de degradação têm algumas vantagens sobre testes de vida acelerados. Dentre as vantagens apontadas, salienta que dados de degradação podem ser analisados mais rapidamente, por exemplo, antes que alguma unidade falhe.

Para ele, isso é feito por meio da extrapolação da degradação de desempenho para estimar o tempo no qual o desempenho atinge um nível inaceitável. Essa extrapolação leva a examinar o efeito na vida do produto de diferentes tipos de projetos ou suposições sobre o nível de desempenho que resulta em falha.

Nelson (1990) coloca, ainda, que dados de degradação de desempenho podem fornecer estimativas de vida mais acuradas do que dados de testes de vida com poucas falhas. Além disso, dados de degradação de desempenho proporcionam maiores conhecimentos sobre o processo de degradação do produto e como melhorá-lo.

Existem componentes mecânicos nos quais, caso ocorra a degradação completa, não é possível fazer a sua análise, e este acaba por degradar outros componentes que interagem entre si, por exemplo, a evolução do desgaste de pastilhas de freio será acompanhada durante toda sua vida, pois caso o desgaste do material de atrito seja completo, torna-se impossível a análise da pastilha e do disco de freio. Logo, intervalos de inspeção ou monitoramento por sensores que controlam o desgaste, são adotados.

3.5.2. Principais modelos matemáticos de degradação

Os principais modelos matemáticos para análise da evolução do valor da degradação (y) em função da duração (t), são:

- 1- Linear : a variação é constante ao longo da duração do ensaio (ou uso);
- 2- Exponencial: a degradação aumenta significativamente com a duração, tendendo assintoticamente ao infinito;
- 3- Potência : a degradação aumenta significativamente no início da duração e depois tende assintoticamente a um dado valor, significando menor taxa de crescimento para longas durações;
- 4- Logarítmica : a degradação só começa a ocorrer significativamente após uma dada duração do ensaio (ou uso) e depois tende assintoticamente a um dado valor, de modo semelhante ao modelo tipo Potência;

	Degradação	;	Duração
1. Linear :	$y = a \cdot t + b$		$t = \frac{y - b}{a}$
2. Exponencial :	$y = b \cdot e^{a \cdot t}$		$t = \frac{\ln y - \ln b}{a}$
3. Potência :	$y = b \cdot t^a$		$t = \left(\frac{y}{b}\right)^{1/a}$
4. Logarítmica :	$y = a \cdot \ln t + b$		$t = e^{\frac{y - b}{a}}$

(3.36)

onde:

y = Valor (medida) da degradação (desgaste, corrosão, comprimento de trincas, perda de isolamento, desbalanceamento, e outros, com as correspondentes medidas (mm. Voltagem, etc.);

t = Duração (tempo, quilômetros, ciclos, operações, etc.);

a = Constante, corespondente à inclinação da reta no gráfico y x t, com $0 < a < \infty$;

b = Constante (Parâmetro de posição), com $0 < b < \infty$;

3.6. Conceitos básicos sobre Correlação e Verossimilhança

O coeficiente de correlação (ρ) significa o quão próximos os pontos medidos estão em relação a curva assumida pela regressão linear. Quanto mais próximos, melhor a representação (correlação) da amostra para a distribuição adotada. Os dados podem não apresentar nenhuma correlação, os seja, as falhas independem da duração no período analisado, não sendo possível gerar uma regressão linear. Por outro lado, podem apresentar de baixa correlação até uma excelente correlação (Figuras 3.17 a, b e c), com as falhas extremamente dependentes da duração (vida).

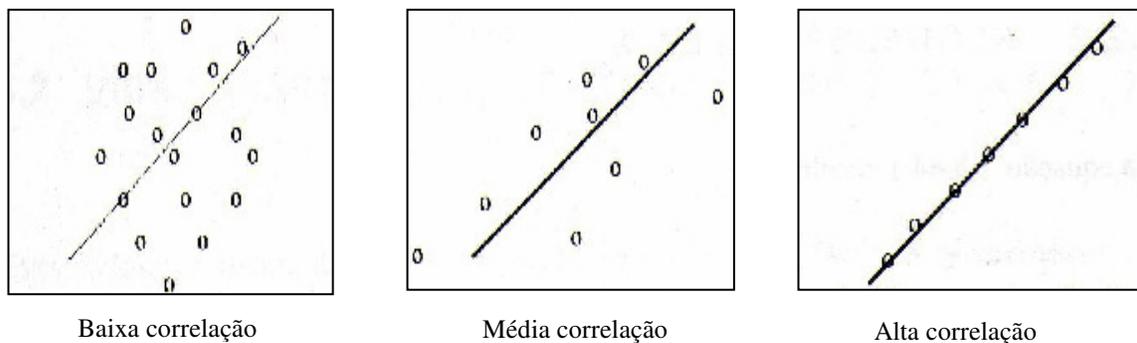


Figura 3.17: Grau de correlação dos dados em relação à sua disposição gráfica (Pallerosi, 2006).

Ao fazer o teste de aderência para verificar qual distribuição que melhor se correlaciona com os dados apresentados, deve-se prestar atenção se os dados possuem uma boa correlação com a curva conforme a figura 3.17, pois o *ranking* é feito com base numa boa correlação com os dados apresentados.

Conforme Ebeling (1997) apud Marques (2004), o ajuste de uma distribuição teórica pode ser visto como um processo de três etapas, consistindo da identificação de distribuições que hipoteticamente são adequadas aos dados da amostra, a estimação de parâmetros e a realização dos testes de aderência. O entendimento sobre o processo de falha, o conhecimento das características das distribuições teóricas e os gráficos de probabilidade auxiliam na seleção de um modelo adequado. As técnicas gráficas são extensivamente tratadas por Nelson (1983) e Lewis (1996), que discutem outras aplicações e limitações desses métodos.

A estimativa do coeficiente de correlação pode ser efetuada pelos métodos:

- Mínimos Quadrados, regressão X ou Y;
- Máxima Verossimilhança;

Segundo Marques (2004) o método gráfico acoplado ao ajuste por mínimos quadrados é muito utilizado em confiabilidade, devido à facilidade de interpretação e implementação computacional.

A estimativa ($\hat{\theta}$) do coeficiente de correlação, em uma amostra com " n " itens é dada pela equação

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \left[\left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^n y_j \right) \right] / n}{\left\{ \left[\sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left[\sum_{i=1}^n x_i \right]^2 / n \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (y_i)^2 - \left[\sum_{i=1}^n y_i \right]^2 / n \right] \right\}^{1/2}} \quad (3.37)$$

A equação é válida para regressão linear em X ou Y, com os valores x_i e y_i dados pelas equações correspondentes a cada tipo de distribuição (Weibull, Exponencial, Normal, Lognormal).

Ebeling (1997) afirma que esse procedimento não é o mais adequado, para estimar parâmetros de distribuições não normais, assim como em casos em que ocorram dados censurados, no qual o método de máxima verossimilhança é mais adequado.

Segundo Martinez-Espinosa (2004) apud Morello (2005), o estimador de máxima verossimilhança (EMV) de um parâmetro θ é o valor, que maximiza a função verossimilhança $L(\theta)$. O EMV de θ é usualmente denotado por $\hat{\theta}$, sendo baseado numa amostra aleatória geralmente representada por X_1, Y_2, \dots, x_n . Assim, o estimador ($\hat{\theta}$) que melhor explica os dados da amostra é o valor de θ que maximiza a probabilidade dos dados sob o modelo. Isto é, $\hat{\theta}$ é um estimador de máxima verossimilhança de θ se:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(y_i; \theta). \quad (3.38)$$

Sendo, que $f(y, q)$ é a função densidade de probabilidade discreta ou contínua. Observando que $f(y, q)$ pode ter mais de um parâmetro, geralmente representado pelo vetor $\tilde{\theta}$. Neste caso, a função verossimilhança dada pela equação (3.38) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$L(\tilde{\theta}) = \prod_{i=1}^n f(y_i; \tilde{\theta}). \quad (3.39)$$

$L(\tilde{\theta})$ são produtos de termos, o que facilita o trabalho com logaritmos, pois o logaritmo do produto é a soma do logaritmo dos fatores. Assim o logaritmo da função de verossimilhança é naturalmente o logaritmo de $L(\theta)$, sendo:

$$l(\theta) = \ln[L(\theta)] \quad (3.40)$$

O valor de θ que maximiza $L(\theta)$, do mesmo modo maximiza $l(\theta)$. Normalmente é mais fácil trabalhar com o logaritmo da função verossimilhança. Assim, EMV $\hat{\theta}$ é o valor de θ que maximiza o logaritmo da função verossimilhança.

Função verossimilhança para Weibull

A função verossimilhança para amostras de Weibull é:

$$L(\alpha, \beta) = \prod_{i=1}^r \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \prod_{j=1}^s \exp \left[- \left(\frac{t_j}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (3.41)$$

Por razões computacionais, os cálculos são realizados com o logaritmo da função verossimilhança:

$$\ln L(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^r \ln \beta - \beta \ln \alpha + (\beta - 1) \ln t_i - \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta + \sum_{j=1}^s \left(\frac{t_j}{\alpha}\right)^\beta \quad (3.42)$$

As equações de verossimilhança para a distribuição de Weibull são:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \ln L(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^r \left[-\frac{\beta}{\alpha} + \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta \right] + \sum_{j=1}^s \left[\frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t_j}{\alpha}\right)^\beta \right] = 0 \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \ln L(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^r \left[\frac{1}{\beta} + \ln\left(\frac{t_i}{\alpha}\right) - \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta \ln\left(\frac{t_i}{\alpha}\right) \right] - \sum_{j=1}^s \left[\left(\frac{t_j}{\alpha}\right)^\beta \ln\left(\frac{t_j}{\alpha}\right) \right] = 0 \quad (3.44)$$

3.7. Teste do ajuste da distribuição

Na escolha de um determinado modelo para ajustar dados relativos a tempo de vida; é imprescindível o uso de métodos gráficos ou analíticos para verificar a hipótese de que os dados seguem determinada distribuição. Uma vez obtidos os testes de ajuste e verificado que a distribuição é rejeitada, deve ser feito um novo ajuste com outro modelo mais adequado. Os principais métodos de adequação de ajuste são: Teste analítico de Qui-quadrado (χ^2), Método analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S).

a) Método analítico de Qui-quadrado (χ^2)

Esta prova baseia-se na comparação das freqüências observadas e esperadas (ou cálculos usando a distribuição do ajuste). Para isso é necessário agrupar as observações em intervalos, obtendo-se x_{ii} e x_{is} como limite inferior e superior do intervalo i . Para cada intervalo determina-se:

$$X_e^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_{oi} - f_{ei})^2}{f_{ei}} \quad (3.45)$$

sendo f_{oi} a ser a frequência observada no intervalo “i” e f_{ei} a frequência esperada no mesmo intervalo “i”. O valor f_{ei} é determinado através da função de probabilidade acumulada, obtida da seguinte forma:

$$f_{ei} = [F(x_{ii} - F(x_{is}))]n, \quad (3.46)$$

e k é o número de intervalos. O qui-quadrado calculado é comparado com o qui-quadrado tabelado e, logo após, conclui-se quanto ao ajuste ou não do modelo aos dados. A prova do χ^2 deve ser usada para um elevado número de observações, geralmente acima de 30 observações.

b) Método analítico de Kolmogorov-Smirnov (K-S)

Este teste consiste na comparação das frequências acumuladas observadas com as estimativas pela distribuição do ajuste. A comparação é feita usando-se as frequências acumuladas de X, e não as frequências agrupadas que se usam na prova de qui-quadrado.

Para cada índice i: $1 \rightarrow n$, determina-se:

- a frequência acumulada observada para o valor ordenado x_j , a qual é dada por:

$$S_n(x_i) = \frac{i}{n} \cdot 100$$

(3.47)

- a frequência acumulada teórica, usando a $F(x_i)$ da distribuição teórica;

- o máximo das distâncias entre $S_n(x_i)$ e $F(x_i)$, isto é:

$$DM = \text{Max}\{S_n(x_i) - F(x_i)\}. \quad (3.48)$$

se a distância é suficientemente pequena ($p < 0,05$), conclui-se que o modelo escolhido para o ajuste dos dados deve ser aceito.

Esta prova tem a vantagem de não depender de uma classificação arbitrária dos dados em intervalos, o que pode influenciar os resultados do ajuste. Outra vantagem é que pode ser usada para valores de $n < 4$, ou seja, amostras pequenas, o que exige muita cautela quando se utiliza a prova qui-quadrado.

Carvalho (2008), concluiu que não existe um consenso sobre um teste de aderência com aplicação universal. Ressalta-se, portanto, a importância do conhecimento de engenharia a ser utilizado no processo de escolha de um modelo adequado para representar os dados em estudo.

3.8. Conceito de intervalo de confiança

A elaboração dos dados de um ensaio mediante um estimador otimizado resulta em um número (estimativa pontual) mais ou menos próximo do valor verdadeiro (que é desconhecido) do parâmetro a estimar. Não se pode excluir a hipótese de que a utilização de um bom estimador resulte em uma estimativa ruim, ou seja, distante do valor verdadeiro do parâmetro. O risco dessa ocorrência é quantificado pelo intervalo de confiança (Doty, 1989; Billington, 1973).

Segundo Marques (2004) um intervalo de confiança quantifica a incerteza devido a erros de amostragem surgidos de tamanhos de amostras limitados, porém não quantificam erros provenientes de suposições inadequadas sobre o modelo estatístico utilizado. Um intervalo de confiança é constituído de faixas de valores dentro da qual pode-se estimar o valor médio correto.

Consideram-se, basicamente, dois casos práticos, correspondentes ao Intervalo de confiança (Superior e Inferior) e Unilateral (Superior ou Inferior), como apresentado na Figura 3.18.

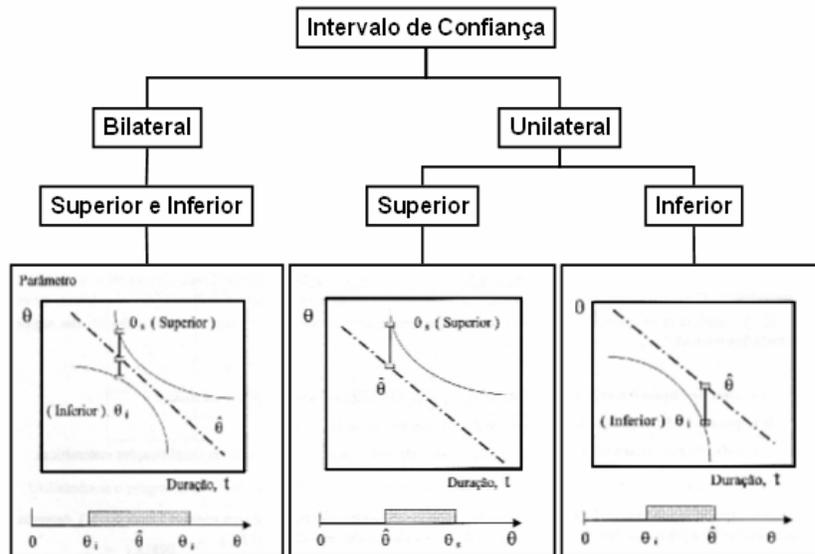


Figura 3.18: Tipos de Intervalos de confiança (Bilateral, Unilateral), referidos a uma parâmetro (θ) (Pallerosi, 2006).

A amplitude do Intervalo de confiança depende dos seguintes valores:

- Quantidade (n) da amostra ensaiada;
- Quantidade de falhas (i) observadas;
- Valores dos tempos (ou ciclos, etc.) até a ocorrência das falhas e da sua distribuição ao longo do ensaio;
- Nível de confiança (C) adotado, referente ao Risco (α) e ao tipo de Intervalo (Bilateral, Unilateral).

3.9. Análise do Modo e Efeito de Falhas (FMEA)

A metodologia de Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial (do inglês *Failure Mode and Effect Analysis* - FMEA) é uma ferramenta que visa, em princípio, evitar, por meio da análise das falhas potenciais e propostas de ações de melhoria, que ocorram falhas no projeto do produto ou do processo. Esse é o objetivo básico dessa técnica, ou seja, detectar falhas antes que se produza uma peça ou produto. Pode-se dizer que, com sua utilização, reduz-se as chances do produto ou processo falhar, ou seja, busca-se aumentar sua confiabilidade (Horita, 2002).

A análise FMEA inicia-se com a listagem dos componentes do produto e suas respectivas funções em uma tabela. Em seguida, para cada função, são indicados possíveis modos de falha, efeitos e causas, por exemplo, para o componente “ponta de eixo”, função “suportar roda”, modo de falha “fratura”, efeito “perda de controle do veículo” e causa “material inadequado”. Com essa análise crítica, é possível adotar medidas, ainda na fase de projeto, criando métodos para controle dos componentes e suas funções no processo produtivo, com a finalidade de eliminar os possíveis modos de falha.

Contudo, a análise do FMEA é um processo contínuo que, mesmo durante o ciclo de produção do produto, deve ser constantemente revisado, adicionando informações de campo, ou até pela própria mudança de algum item do produto, para avaliação do grau de criticidade, pois no FMEA são calculados índices para priorizar a importância de um determinado item. Tais índices são baseados na ocorrência (probabilidade de ocorrência de uma causa de falha), gravidade (grau de gravidade do efeito da falha), detecção (probabilidade da falha ser detectada antes de chegar ao usuário) os quais geram o Índice de Risco, que pode ser usado para priorização e tomada de decisões, sendo que este nada mais é que o produto dos outros três indicadores.

Stamatis (1995) cita quatro tipos de análise do tipo FMEA:

- FMEA de Sistema: usado para analisar sistemas e subsistemas no estágio de projeto. Uma análise FMEA de sistema foca os modos de falhas potenciais entre as funções do sistema causadas por deficiências do sistema;
- FMEA de Projeto: usado para analisar produtos antes de serem lançados para a manufatura. Uma análise tipo FMEA de projeto foca modo de falhas potenciais causadas por falhas de projeto;
- FMEA de Processo: usado para analisar processos de manufatura e montagem, analisando seus respectivos modos de efeitos e falhas potenciais;
- FMEA de Serviço: usado para analisar serviços antes deles atingirem o consumidor, analisando falhas causadas por deficiências do sistema ou processo.

No caso da indústria, o habitual é utilizar os FMEAs de projeto e de processo. Neste trabalho, é feita uma análise FMEA de projeto, visando identificar os modos de falha do sistema de freios de um veículo comercial, priorizando-os com maior potencial de falha, podendo causar deficiências a todo o sistema.

4 SISTEMA DE FREIOS

Com o desenvolvimento dos trens e início da fabricação dos automóveis no final do século XIX, surgiu a necessidade de se desenvolver um mecanismo para a frenagem dos veículos. O propósito do sistema de freio é desacelerar um veículo, transformando energia cinética em energia térmica pelo atrito e dissipando o calor para o ambiente.

Os elementos que interessam na segurança do veículo são vários, porém, em se tratando de segurança, o item mais lembrado é o freio. Isso é projetado de maneira que possibilite ao veículo uma capacidade de desaceleração várias vezes maiores que sua capacidade de aceleração, porém, ainda com essa elevada capacidade de desaceleração, o veículo percorre certa distância antes de parar por completo.

Duas são as razões para este efeito: a primeira, que o motorista não freia o veículo no mesmo instante em que vê necessidade, sempre há uma reação atrasada; a segunda é que, como o veículo está a certa velocidade, mesmo depois de aplicado o freio, desloca-se por certa distância até parar. Logo, a distância percorrida pelo veículo desde o momento que é reconhecida a necessidade até o carro parar é a soma dos dois casos acima.

Sendo os sistemas de freios uma das partes mais vitais e importantes de um veículo, normalmente seu projeto atende a normas regulamentadoras que são estabelecidas por órgãos governamentais de trânsito em diversos países. No caso dos veículos comercializados em território brasileiro, devem seguir o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), resolução CONTRAN 777/93 e normas relativas a sistemas de freios da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Essas regulamentações estabelecem basicamente os requisitos mínimos, aos quais os veículos devem atender para que possam trafegar oferecendo o nível mínimo de segurança para pessoas e passageiros, outros veículos e a carga, no caso de caminhões. O sistema de freios proporciona ao motorista a garantia de uma frenagem segura, sob as mais diversas condições de tráfego, seja ao obedecer a um semáforo ou ao se deparar com uma emergência.

O processo de frenagem é considerado complexo, porque envolve relações entre modelagem física e matemática, a qual nem sempre é desenvolvida facilmente. Por exemplo, tem-se as reações do motorista, do veículo, do sistema de freio, o contato entre pneumático e

pavimento, além da transformação de energia cinética e potencial em energia acústica e térmica durante a frenagem.

Segundo Fernandes (2000), de forma simplificada, o processo de frenagem de um veículo é composto por uma sucessão das seguintes fases no tempo:

Fase 1 – Sensibilização do motorista para a frenagem. Essa fase tem início na percepção de estímulos visuais, sonoros e outros pelo motorista, os quais são capazes de sensibilizá-lo para a necessidade de aplicar os freios do veículo que conduz, indo até o instante em que o motorista aciona o sistema;

Fase 2 – Atitude do motorista de iniciar a frenagem. Essa fase inicia-se com uma decisão cerebral do motorista de solicitar os freios do veículo, indo até o instante de efetivar tal atitude. Por meio dessa atitude de movimentar mãos ou pés de forma coordenada e no sentido de iniciar o contato com a superfície de controle do sistema de freios, responsável pela ativação destes pelo motorista (por exemplo, o pedal de freio);

Fase 3 – Ativação do sistema de freios. Esta fase compreende o início da aplicação do sistema de freios do veículo pelo motorista, até o começo da produção de esforço de frenagem pelo condutor;

Fase 4 – Atuação efetiva do sistema de freios. Esta fase inicia-se com a produção de esforço de frenagem pelo sistema de freios do veículo, indo até a redução da velocidade do veículo desejada pelo motorista, podendo ou não ser uma parada total do veículo.

No uso contínuo do veículo, nenhum sistema é tão intensamente sujeito a esforços e altas temperaturas quanto o sistema de freios, por ocasião das paradas. Embora os componentes de um sistema de freios sejam rigorosamente projetados e fabricados, a utilização dos freios durante um período de tempo pré-estabelecido resulta no desgaste natural de alguns dos seus componentes. Uma parte deste desgaste será compensada por dispositivos de ajuste incorporados ao sistema. Contudo, a necessidade de substituição de certos componentes, após certo período de tempo de uso, deve ser prevista.

Além dos requisitos de normas, os sistemas de freios e os veículos como um todo devem responder às expectativas dos usuários, atendendo aos requisitos de confiabilidade.

Segundo Canale (2007) o objetivo do sistema de freios é controlar a velocidade ou frear o veículo na menor distância possível, de forma segura, mantendo-se a dirigibilidade e a estabilidade em qualquer condição operacional admissível para o veículo em questão.

Em linhas gerais, um sistema de freios de um veículo automotor deve cumprir as seguintes funções principais:

- Parar rapidamente o veículo sempre que necessário;
- Diminuir a velocidade do veículo;
- Manter a velocidade constante quando em um declive;

No caso do freio de estacionamento, a função principal é permitir que o veículo permaneça estacionado sem a presença do condutor.

Com o intuito de atender às funções descritas, o projeto de um sistema de freios deve considerar os seguintes aspectos:

- Segurança: o sistema de freio deve ser eficiente em qualquer condição de utilização;
- Controle: a desaceleração deve ser proporcional à força aplicada no pedal de freio. Deve haver um esforço adequado para manter o controle do veículo;
- Confiança: a frenagem deve ser isenta de ruídos, trepidação, desvios de trajeto, etc.;
- Perda (do inglês “*fade*”) e recuperação: o sistema de freios deve ser capaz de ser submetido a frenagens sucessivas sem que haja comprometimento de sua eficiência. Porém, se houver perda, o sistema deve ser capaz de uma breve recuperação;
- Durabilidade: os componentes que possuem desgaste devem apresentar durabilidade adequada conforme verificada nos ensaios de confiabilidade do sistema;
- Projeto simples: possibilita, na maior parte dos casos, em facilidade de fabricação, redução de custos e simplicidade de manutenção.

O sistema de freios de um veículo pode ser controlado também por um módulo eletrônico que regula as frenagens e evita o travamento do freio, por exemplo: em curvas com pista molhada. Esse sistema é conhecido mundialmente como ABS (*Anti-lock Brake System*), ou ainda sistema de antitravamento de freios.

4.1. Funcionamento dos freios a disco

O freio a disco é um tipo de freio de roda comumente utilizado tanto em veículos comerciais quanto em automóveis de passeio. Seu princípio básico de funcionamento consiste na geração de força de frenagem através do contato das pastilhas nas superfícies laterais do disco por meio de sua movimentação axial, provida pelo êmbolo do conjunto freio a disco ou do inglês "caliper".

Há um disco de aço sobre o eixo da roda (daí o nome de freio a disco), contra o qual são pressionadas duas sapatas por ação de cilindros de freios (figura 4.1). O atrito entre as pastilhas e o disco reduz a velocidade do veículo.

As rodas dianteiras exigem maior pressão para serem imobilizadas (devido à distribuição da força de frenagem ser maior na dianteira). O atrito acontece entre as pastilhas de freio e os discos que se movimentam junto com as rodas. Tais elementos podem ser visualizados na figura 4.1.

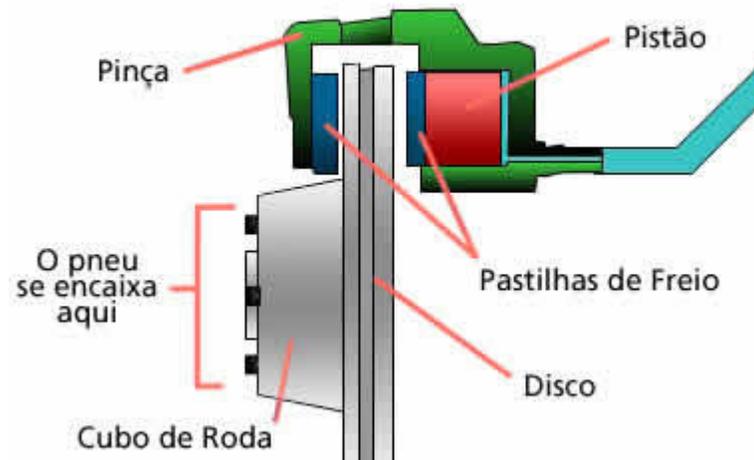


Figura 4.1 - Esquema de funcionamento dos freios a disco

O atrito é altamente desejável para os freios, pois é esse atrito que consegue frear o veículo. Os engenheiros desenvolvem materiais que podem oferecer atrito eficientes, de modo que quanto maior o atrito melhor. Como muito calor é gerado, o material usado nos freios também deve ser capaz de suportar altas temperaturas.

Um veículo em movimento tem certa quantidade de energia cinética e os freios removem essa energia do veículo para fazê-lo parar. Os freios convertem a energia cinética em calor gerado pelo atrito entre as pastilhas e o disco, por isso a maioria dos freios a disco são ventilados. Segundo Limpert (1999), a maior vantagem do uso de freios a disco baseia-se em sua baixa degradação em desempenho a altas temperaturas (de até 800°C a 900 °C). Além disso, apresenta comportamento linear entre o torque de frenagem e o coeficiente de atrito entre pastilha e disco.

4.2. Funcionamento dos Freios a Tambor

Normalmente, o freio de tambor é utilizado como freio traseiro de veículos de passeio ou comercial. A figura 4.2 mostra um esquema simplificado desse tipo de freio, no qual é exemplificado o cilindro de freio, que recebe a pressão hidráulica do sistema de acionamento. Os pistões do cilindro se movem pressionando a sapata sobre o tambor, sendo que as sapatas consistem no suporte metálico (contrasapata) e na lona de freio. O tambor é a parte que gira do conjunto e é solidário à roda dos veículos. O cabo serve para aplicar, o freio manualmente através da alavanca do freio. O compensador de folga move a lona para mais perto do tambor conforme vai se desgastando, diminuindo o curso até a frenagem. No tipo de freio visto, a força gerada no cilindro hidráulico move a parte superior das sapatas, que estão ancoradas no compensador de folga.

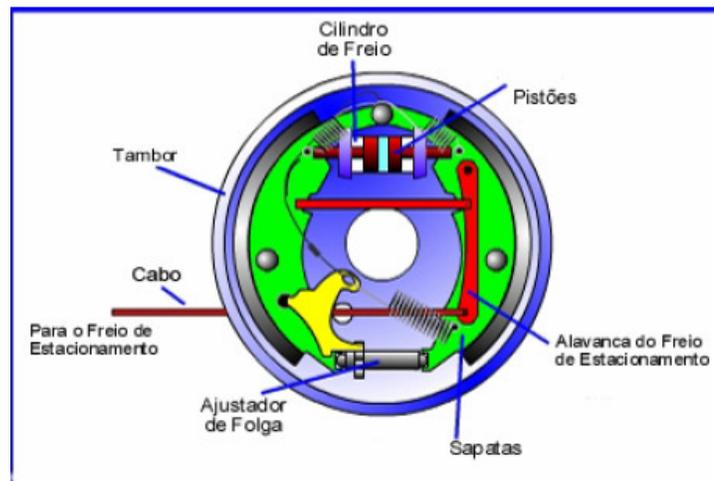


Figura 4.2 –Esquema de Freios a Tambor de Sapatas Internas para Veículos Automotivos

Com essa restrição, as sapatas não se movem lateralmente, mas giram em torno do ponto de ancoragem. Evidentemente, que o apoio da sapata sobre o tambor se dá, principalmente, na parte superior da sapata, fazendo com que a pressão de contato seja maior nessa região.

4.3. Vantagens do uso do freio a disco em relação ao freio a tambor

A relação entre a força tangencial no tambor ou disco e a força aplicada pelo cilindro de roda, denominado fator de freio, depende (excluindo-se as dimensões que definem a geometria) apenas do coeficiente de atrito do conjunto lona/tambor ou pastilha/disco, indicando o crescimento inteiramente progressivo no caso de freios a tambor (que são dotados de auto energização), enquanto que nos freios a disco, o crescimento ocorre de maneira linear.

Segundo Shigeru (2002) para obter o mesmo efeito de frenagem, quando o coeficiente de atrito abaixar de 0,4 para 0,35, tem-se que aumentar o esforço no pedal de freio em cerca de 30% para freios a tambor, enquanto que para o freio a disco, apenas de 15%.

Além da desvantagem relativa à sensibilidade devido à variação do coeficiente de atrito, há ainda problemas relativos ao aquecimento do sistema a tambor, pois o tambor é resfriado em uma taxa maior as sapatas, ocorrendo a diminuição do raio do tambor em relação ao raio da sapata, que desgasta irregularmente as pontas das sapatas, reduzindo a eficiência de frenagem.

Segundo Canale (2007), os freios a disco apresentam uma menor variação no seu desempenho pelos efeitos térmicos, comparados com os freios a tambor, e proporcionam uma estabilidade maior na geração das forças de frenagem, o que se traduz no veículo em melhor estabilidade e dirigibilidade durante a frenagem.

Atualmente, no Brasil, as montadoras de veículos comerciais não utilizam o freio a disco em todos os projetos, devido ao alto custo de manutenção comparado aos custos do freio a tambor. Porém, existem estudos para a redução dos custos, visando a sua implementação em todos os projetos.

4.4. Materiais de atrito das pastilhas e lonas de freio

No passado, eram utilizados materiais como madeira, couro e feltro, denominados como materiais de atrito. O coeficiente de atrito era satisfatório para as primeiras aplicações em baixas velocidades, porém esses materiais tornaram-se inadequados para cobrir o aumento da temperatura de trabalho. Além disso, embora o couro e a madeira fossem suaves e silenciosos em sua ação, as superfícies tornavam-se frequentemente carbonizadas, provocando uma perda quase completa do coeficiente de atrito.

Antes de 1925, os veículos automotores usavam freios de contração externa montados somente no eixo traseiro, pois poderiam influir negativamente na dirigibilidade se fossem montados na dianteira do veículo. Essa configuração expunha o material de atrito ao tempo, lama, água, areia, prejudicando bastante a sua ação. A partir de 1925, começou-se a utilizar freios com sapatas internas e a iniciar o desenvolvimento de materiais de atrito frente à necessidade de um material de atrito que resistisse a elevadas temperaturas e que tivesse boa resistência mecânica, o que conduziu ao uso do amianto. A partir da utilização desse material, iniciou-se o desenvolvimento de materiais alternativos, visando à substituição do amianto devido ao mesmo provocar problemas de saúde. As principais características dos materiais de fricção das pastilhas e lonas são:

- Resistência à perda de atrito: devido ao calor gerado durante as frenagens;
- Recuperação: é uma importante propriedade das lonas e pastilhas de voltar rapidamente ao nível original, após um dado valor de redução de temperatura;
- Sensibilidade à velocidade: as características de atrito do material de fricção não devem variar com a velocidade do veículo;
- Estabilidade: é uma das mais importantes características ao longo da vida útil das pastilhas ou lonas, fazendo com que as mesmas mantenham a sua eficiência de frenagem;
- Sensibilidade à água: os materiais de fricção devem proporcionar segurança mesmo quando submetidos ao excesso de água.

Desgaste reduzido de pastilhas, lonas e dos seus respectivos discos e tambores, estão vinculados à qualidade do elemento de fricção, que além de propiciar uma frenagem segura, também evita o desgaste prematuro dos componentes.

O material de fricção das pastilhas e lonas atualmente é composto por:

- Fibras naturais e sintéticas que são elementos estruturais e que resistem a altas temperaturas, como exemplo: fibra de vidro, kevlar, lã de rocha;
- Resinas e catalisadores utilizados como elementos aglutinantes;
- Elementos metálicos responsáveis pela distribuição do calor gerado na superfície de fricção: latão, limalha de ferro, alumínio;
- Elementos de carga adicionados, cuja função é antioxidante;
- Agentes modificadores de atrito, lubrificantes, abrasivo, corantes, materiais de enchimento (caulim, barita) e materiais para facilitar o processo de fabricação.

A formulação básica dos elementos de fricção contém aproximadamente os seguintes materiais: Kevlar de 40 a 50%, resinas de 15 a 20%, barita de 15 a 30%, lubrificantes de 4 a 6% e atritantes de 2 a 6%.

Os componentes de fricção são produzidos através de moldes, trançados ou sinterizados. Após a fabricação, são submetidos ao tratamento térmico de normalização, com a finalidade de estabilizar termicamente o material de fricção.

4.5. Manutenção dos freios

A necessidade mais comum na manutenção de freios é a troca dos componentes de desgaste, tais como: pastilhas, lonas, discos e tambores. A distribuição do esforço de frenagem é concentrada no sistema de freios do eixo dianteiro do veículo e, em menor proporção, no sistema de freios do eixo traseiro. Observa-se a existência de uma maior ocorrência de desgaste no sistema de freios dianteiro, no disco e na pastilha de freio.

A vida útil do sistema de freios a disco está diretamente ligada à manutenção regular e, principalmente, a maneira do motorista dirigir.

Existe uma abertura para inspeção na pinça para a verificação do desgaste das pastilhas de freio (Figura 4.3).

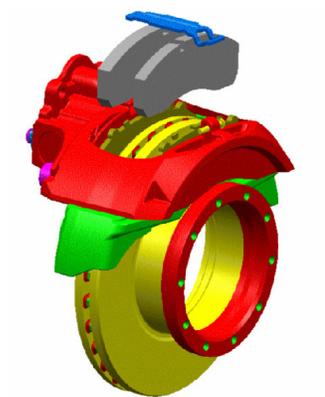


Figura 4.3 - Janela para inspeção das pastilhas de freios

Há ocorrência de danos nos discos quando as pastilhas se encontram acima dos limites mínimos de espessura especificados em projeto. Esse desgaste acentuado das pastilhas gera a diminuição da eficiência do sistema de freio e o comprometimento da planicidade dos discos de freio, causando desconforto devido a vibrações ao frear o veículo. Tal problema é resolvido torneando ambos os lados do disco visando obter novamente uma superfície plana. É necessário atentar nessa ocasião, a espessura mínima do disco recomendada pelo fabricante.

Todos os discos de freio têm uma especificação de espessura mínima permitida antes de serem substituídos. Essa especificação é encontrada no manual de reparação de cada veículo.

5 METODOLOGIA

Com o objetivo de validar a análise de confiabilidade utilizada para verificar o desempenho de veículos comerciais, quando aplicados a itens de desgaste, foi estabelecida uma metodologia para comparar os resultados com testes de confiabilidade na aplicação real.

Esta metodologia consiste em:

- Análise preliminar da Confiabilidade do sistema de freio, para escolha de um item de desgaste para a análise;
- Definição do tamanho da amostra;
- Planejamento dos testes;
- Levantamento dos dados de vida, para calcular a confiabilidade no teste simulação e aplicação;
- Tabulação e tratamento dos dados;
- Análise de degradação;
- Cálculo da confiabilidade;
- Comparação entre os testes;
- Avaliação dos resultados.

5.1. Análise preliminar da Confiabilidade do sistema de freio

Durante a fase de desenvolvimento de produtos, foi realizada a análise da árvore funcional, conforme mostrado na Figura 5.1, a fim de visualizar os componentes fundamentais para funcionamento, assim como interfaces com outros componentes, do sistema de freios.



Figura 5.1 - Árvore funcional

Os componentes do sistema de freio de um veículo comercial, citados na árvore funcional, podem ser visualizados na Figura 5.2.



Figura 5.2 - Componentes do sistema de freios (descrição tabela 5.1).

De posse das funções dos componentes do sistema de freios, passou-se para uma fase de levantamento dos modos de falha da pastilha de freio, a partir de uma análise do tipo DFMEA (*Development Failure Mode and Effect Analysis*), ou seja, uma análise de FMEA de projeto. Tal análise foi revisada após os resultados dos testes e é apresentada na Tabela 5.1.

Análise de FMEA - Projeto									
Posição	Nomenclatura	Função	Modo de falha	Causa	Efeito	Classe de severidade	Taxa de ocorrência	Deteccção	RPN
1	Pinça	Pressionar pastilhas contra o disco	Travamento	Presença de impurezas	Elevado esforço de frenagem	9	1	9	81
2	Discos	Reduzir a energia cinética das rodas	Empenamento	Temperatura elevada	Redução da eficiência de frenagem	5	8	7	280
			Vitrificação	Temperatura elevada	Redução da eficiência de frenagem	5	7	7	245
3	Pastilhas	Prover atrito	Desgaste Prematuro	Uso contínuo, Material inadequado	Redução da eficiência de frenagem	5	10	6	300
			Perda de atrito	Temperatura elevada	Redução da eficiência de frenagem	5	6	6	180
			Vitrificação	Temperatura elevada	Redução da eficiência de frenagem	5	5	6	150
4	Cilindros atuadores	Pressionar pinça e pastilha	Travamento	Impurezas	Elevado esforço de frenagem	9	3	9	243
5	Cubo da roda	Propiciar frenagem	Fratura	Aplicação de carregamento acima dos limites de projeto	Perda do sistema de freios	10	1	4	40
6	Mangueira flexível	Prover pressão pneumática	Vazamento	Uso contínuo, Ambiente agressivo	Perda de eficiência do sistema	10	5	5	250

Tabela 5.1 - Análise de FMEA de projeto

Alguns modos de falha comuns nos testes de durabilidade do veículo foram a vitrificação de discos e os desgastes prematuros de pastilhas, que podem ser visualizados na Figura 5.3.

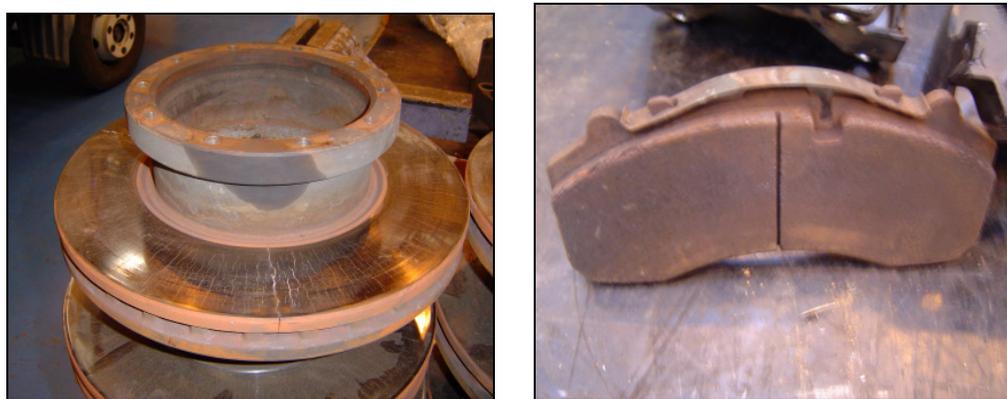


Figura 5.3 - Disco vitrificado e pastilha desgastada

Conforme destacado na Tabela 5.1 e apresentado na Figura 5.3, o modo de falha por desgaste prematuro de pastilhas de freio ocorreu durante os testes de durabilidade do produto. Como consequência, a probabilidade de ocorrência é elevada na análise FMEA, fazendo com que o índice RPN (*Risk Priority Number*) indique um risco alto para tal modo de falha. Assim, passou-se a uma análise detalhada do modo de falha por desgaste em pastilhas de freio.

Nota-se que a análise FMEA foi utilizada para priorizar aspectos de produto que deveriam ser tratados por meio do índice RPN.

5.2. Tamanho da amostra

O primeiro passo para a realização dos testes é determinar o tamanho das amostras (número de veículos) a ser analisados. O tamanho da amostra, quando possível, deve ser determinado por meio de históricos de projetos anteriores ou históricos de testes de durabilidade ou em banco de provas. Outro fator que influencia no tamanho da amostra é o estudo de viabilidade econômica, na qual é possível estimar os custos envolvidos e o possível retorno desses custos. Este estudo de viabilidade econômica muitas vezes torna-se uma restrição quanto ao tamanho e ao número de amostras que serão testadas.

Para o estudo realizado neste trabalho, as amostras foram determinadas por meio de históricos de projetos anteriores da empresa.

5.3. Requisitos de confiabilidade para o componente pastilha de freio

O componente pastilha de freio possui espessura inicial de 30 mm e apresenta o modo de falha por desgaste no decorrer de sua vida útil, que é considerada quando o componente atinge a espessura crítica de 11 mm.

Para esse tipo de veículo, a quilometragem esperada é de no mínimo 100.000 km, com uma confiabilidade de 90% com nível de confiança de 90%.

5.4. Distribuição das pastilhas de freio nos caminhões

Cada caminhão é composto de 2 eixos com 2 pastilhas de freios cada, distribuídas conforme (figura 5.4), sendo:

- 2 pastilhas na roda do eixo dianteiro esquerdo;
- 2 pastilhas na roda do eixo dianteiro direito;
- 2 pastilhas na roda do eixo traseiro esquerdo;
- 2 pastilhas na roda do eixo traseiro direito.

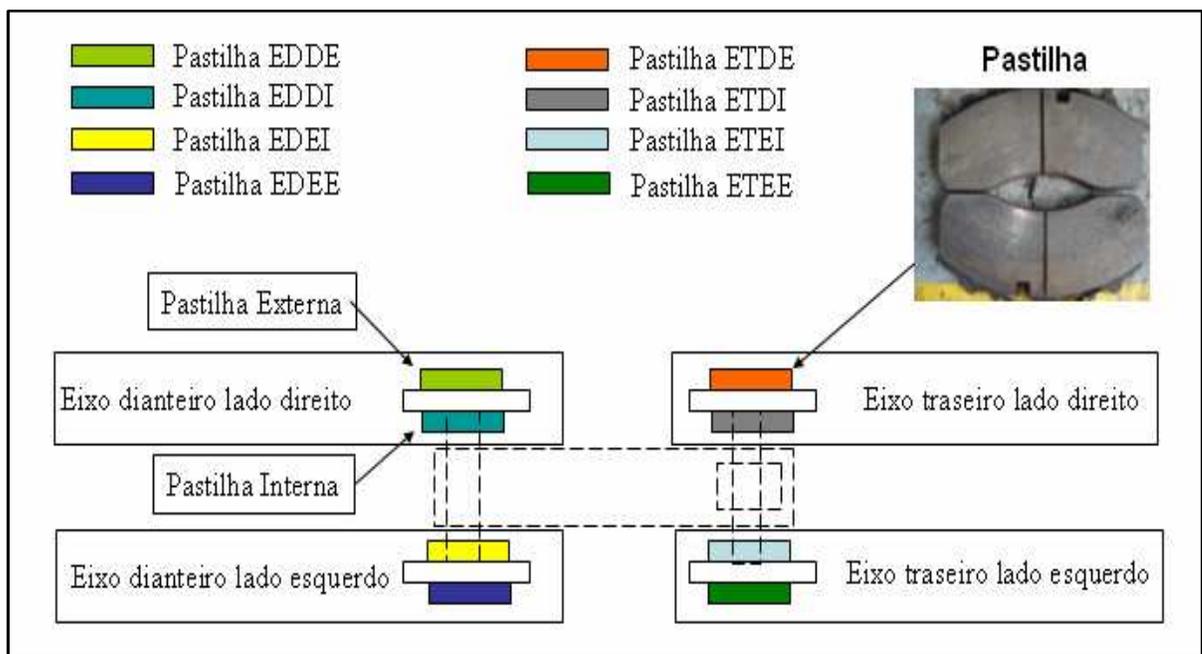


Figura 5.4 – Distribuição das pastilhas no caminhão

Para o teste de simulação, os dados foram colhidas a partir de 16 veículos, cada um com 8 pastilhas, totalizando 128 pastilhas de freio idênticas distribuídas da seguinte forma:

- 32 pastilhas na roda do eixo dianteiro esquerdo;
- 32 pastilhas na roda do eixo dianteiro direito;
- 32 pastilhas na roda do eixo traseiro esquerdo;
- 32 pastilhas na roda do eixo traseiro direito.

Para o teste de confiabilidade na aplicação real, os dados são provenientes de 39 veículos, totalizando 312 pastilhas de freio idênticas distribuídas da seguinte forma:

- 78 pastilhas na roda do eixo dianteiro esquerdo;
- 78 pastilhas na roda do eixo dianteiro direito;
- 78 pastilhas na roda do eixo traseiro esquerdo;
- 78 pastilhas na roda do eixo traseiro direito.

5.5. Obtenção dos dados

Em cada veículo foram utilizadas pastilhas de freios novas, e com espessura inicial de 30 mm. Os dados foram agrupados para análise da seguinte forma:

- Pastilhas eixo dianteiro lado esquerdo;
- Pastilhas eixo dianteiro lado direito;
- Pastilhas eixo traseiro lado esquerdo;
- Pastilhas eixo traseiro lado direito.

Para coleta de dados, foi realizada a medição da espessura da pastilha para cada lado dos eixos, tanto da pastilha interna com a da externa. porém para efeito da análise, foi considerado a média do desgaste das pastilhas (interna e externa), pois as mesmas são projetadas para chegarem no fim da vida útil com as espessuras de material de atrito bastante similares, possibilitando ao usuário a substituição do par, evitando assim o desgaste completo de um dos lados e a perda do disco de freio. (Figura 5.5).

Os veículos utilizados como amostra são equipados com um sensor que mede o deslocamento do caliper de freio em cada roda, possibilitando ao motorista acompanhar através do painel o desgaste médio das pastilhas por roda, indicando o momento exato da substituição.

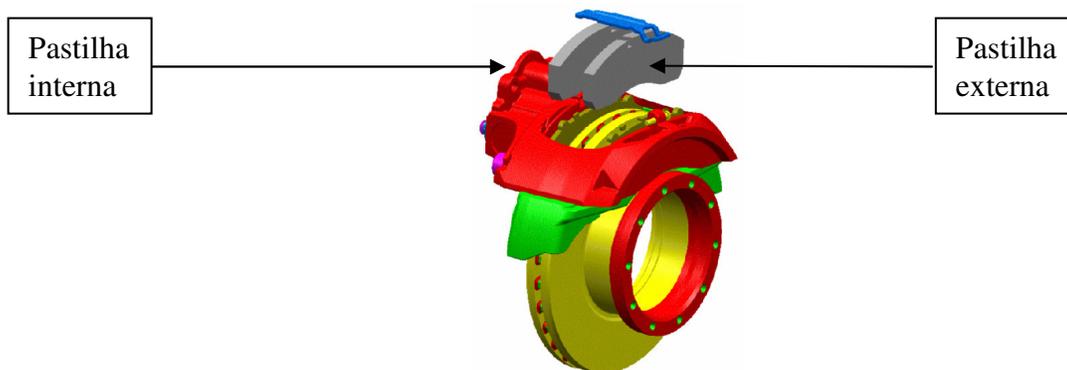


Figura 5.5 – Sistema de freio da roda

A variável “tempo”, de significativa relevância nos estudos de confiabilidade, foi medida em quilometragem (km), ou seja quando se lê “tempo” interpreta-se como quilometragem, a qual foi medida no hodômetro do caminhão.

Foram pré-definidas quilometragens para a medição da espessura da pastilha, entretanto, tais quilometragens não foram rigidamente obedecidas, pois o veículo depende do trajeto, que varia dependendo do dia, ocorrendo em alguns casos algumas variações nesta variável.

Nas verificações das dimensões das pastilhas, foram utilizados padrões de medição conforme anexo A.1. Assim, garantiu-se o mesmo procedimento para todas as pastilhas analisadas, reduzindo o nível de ruído oriundo da medição.

Todos os dados obtidos durante as medições foram armazenados em um banco de dados único, e as análises de desgaste das pastilhas foram feitas por engenheiros, a cada medição realizada conforme anexo A.2.

5.6. Seleção de *softwares* para análise da confiabilidade

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, foram selecionados *softwares* comerciais que utilizam os conceitos descritos no Capítulo 3, os quais possibilitam a análise da confiabilidade durante o desenvolvimento de um veículo comercial.

Barros Filho (2003) fez o levantamento dos *softwares* comerciais para cálculo de confiabilidade existentes no mercado internacional e difundido entre as empresas. Foram

levantadas informações em literatura especializada e também consultas em páginas de organismos voltados à manutenção na Internet.

Willis (2000) “apud” Barros Filho (2003) apresenta uma seleção de alguns *softwares* existentes no mercado para o cálculo da confiabilidade de sistemas simples e complexos: AVSIM; BLOCKSIM; CARE; MEADep; RAPTOR; RELEX; PAR e TIGER. O autor faz uma análise comparativa entre os aplicativos considerando vários fatores com o objetivo de validar a aplicação de um dos softwares de confiabilidade disponíveis na empresa.

Neste trabalho foi utilizado Weibull++ versão 7.0, que apresenta as seguintes características:

- O Weibull++ 7 oferece quatro módulos para análises dos dados. Esses módulos realizam a análise de degradação, análise de garantia, análise não paramétrica e análise de variância;
- O módulo “Análise de Degradação” permite extrapolação dos tempos até a falha de um produto baseando-se em seu desempenho após um dado tempo;
- O módulo de “Análise de Garantia” permite converter os dados de retorno de garantia em dados de tempos até falha e suspensões;
- O módulo de Análise Não Paramétrica faz análise de dados utilizando os métodos não paramétricos tais como Kaplan-Meier, contábil simples (*simple actuarial*) ou contábil padrão (*actuarial techniques*). É possível calcular a confiabilidade de um produto para um dado tempo e, então, gerar o gráfico não paramétrico de confiabilidade em função do tempo.

O Weibull 7.0 permite analisar todos os tipos de dados (completos, censuras à direita ou suspensos, censuras à esquerda, intervalos e censuras múltiplas), além de entrar com dados individuais ou observações em grupo;

O programa dispõe de recursos gráficos para os dados de confiabilidade, gerando os gráficos das funções de confiabilidade: confiabilidade pelo tempo, distribuição de falhas acumuladas pelo tempo, probabilidade de falhas e taxa de falha.

5.7. Análise dos Dados

Para obter-se uma análise de qualidade utilizando o Weibull++ é necessária uma correta inserção dos dados de confiabilidade no programa. Para isso, deve-se seguir alguns passos, conforme Figura 5.6 (Pallerosi, 2006).

O fluxograma da figura 5.6 propõe uma metodologia para a determinação dos parâmetros da confiabilidade envolve oito etapas:

Etapa 1 – Caracterização da amostra que representa a população;

Etapa 2 – Características dos dados obtidos nos ensaios;

Etapa 3 – Tipo da distribuição estatística (comportamento dos dados);

Etapa 4 – Método de regressão linear;

Etapa 5 – Determinação dos parâmetros da distribuição;

Etapa 6 – Determinação da precisão dos resultados obtidos;

Etapa 7 – Comparação dos resultados com outras distribuições estatísticas;

Etapa 8 – Seleção da melhor metodologia de cálculo.

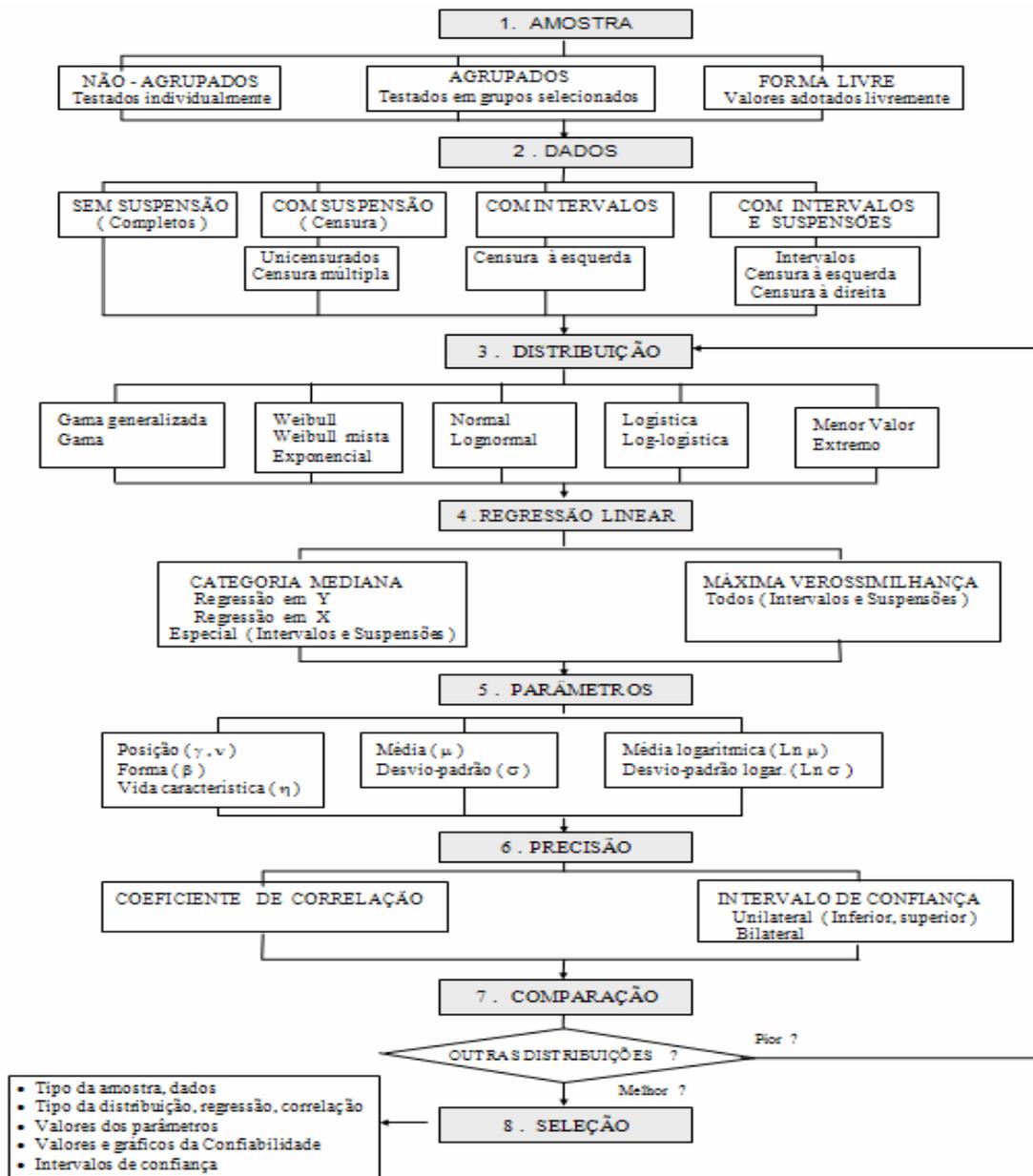


Figura 5.6: Fluxograma da Metodologia, para análise de Confiabilidade (Pallerosi, 2006).

6 ESTUDO DE CASO

Segundo Yin (2001), o estudo de caso representa uma investigação empírica e compreende um método abrangente, com a lógica do planejamento, da coleta e da análise de dados. Pode incluir tanto estudos de caso único quanto de múltiplos, assim como abordagens quantitativas e qualitativas de pesquisa. O estudo de caso têm várias aplicações e é apropriado para que um problema seja estudado em profundidade dentro de um período de tempo limitado.

6.1. Descrição do Problema

Como citado na introdução, o mercado logístico brasileiro, os veículos comerciais são as principais máquinas relacionadas ao transporte de carga. Portanto, durante a parada para manutenção, causa custos de médio e longo prazos. Sendo assim, durante o desenvolvimento de produtos, é necessário projetar os veículos de maneira a minimizar as necessidades de paradas para manutenção, mesmo aquelas previstas, como a troca de pastilhas de freio.

Para agilizar o desenvolvimento de novos componentes e simular as condições de uso de veículos pesados de carga, desenvolveu-se uma análise de confiabilidade para o veículo, antes do seu lançamento no mercado. Os testes devem simular condições próximas àquelas reais de aplicação dos veículos, visando gerar dados de falhas representativos para análise da confiabilidade.

Os testes feitos no trabalho, são utilizados há vários anos para análise de confiabilidade de muitos componentes de veículos, com sucesso, sendo que os resultados de confiabilidade obtidos durante os testes são constantemente comparados com os resultados de garantia, obtidos após o lançamento do veículo, visando validar a sua utilização. Porém, existem componentes que, por serem considerados itens de desgaste, não são considerados em garantia pela montadora, dificultando a comparação com os resultados obtidos durante o teste de simulação.

Com o objetivo de comparar os resultados do teste de confiabilidade de pastilhas de freio, realizado antes do início da produção de um determinado veículo, através do teste simulação, foram selecionados vários clientes que adquiriram os veículos após o seu lançamento, e realizou-se um teste de confiabilidade na aplicação real.

Os resultados de confiabilidade dos dois testes para comparação, utilizando a análise de confiabilidade, seguem o esquema apresentado na Figura 6.1.

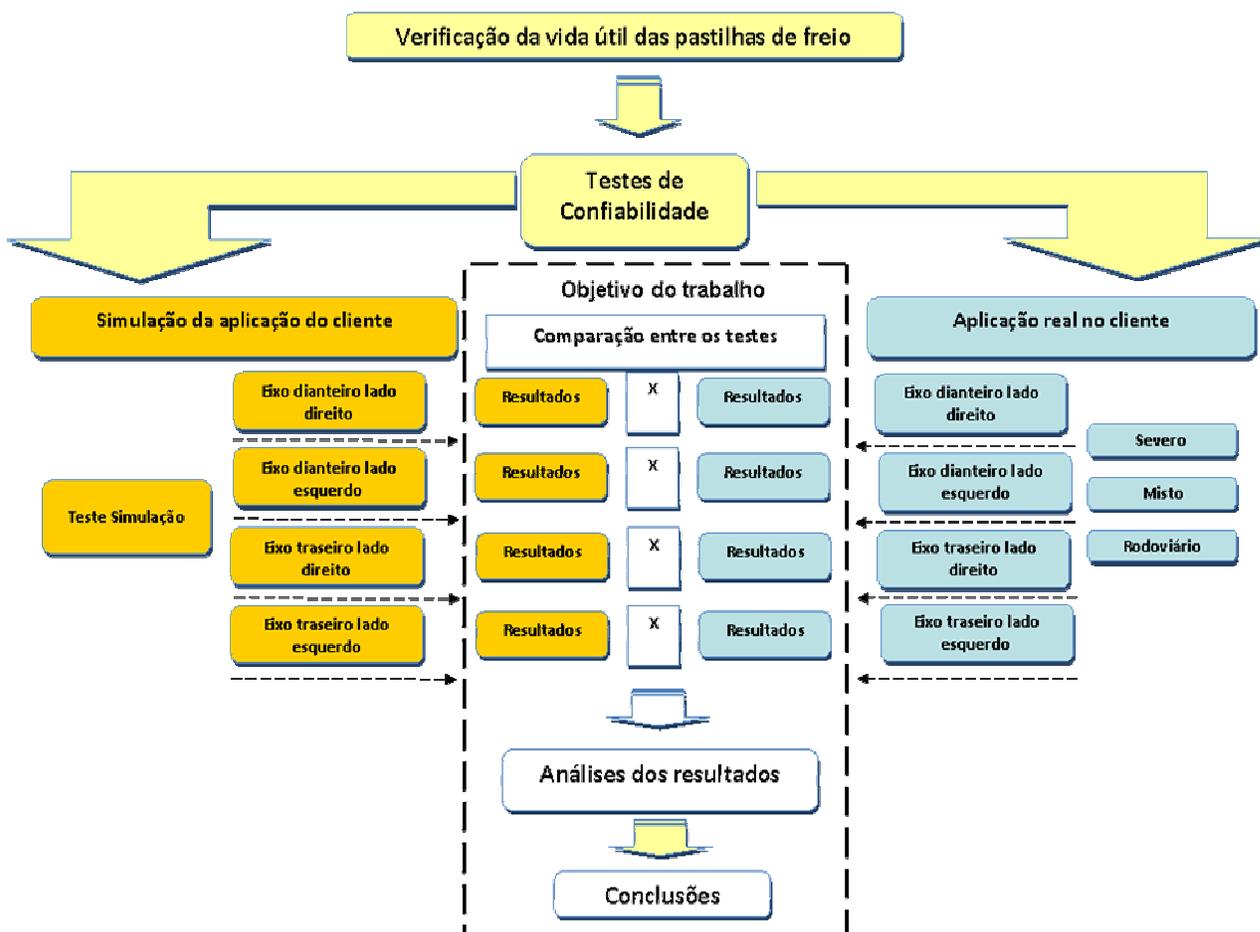


Figura 6.1 – Procedimento do estudo de caso para verificação da vida útil das pastilhas

6.2. Planejamentos dos testes

As pastilhas de freio foram submetidas ao Teste de Confiabilidade por meio de uma simulação da aplicação real e, em seguida na aplicação real (cliente final).

6.2.1. Planejamento para o teste de confiabilidade na simulação (ensaio controlado)

Antes do início do teste, utilizou-se o diagrama causa efeito (figura 6.2) para verificar os aspectos que influenciariam no desgaste das pastilhas de freio, criando-se ações para minimizar os seus efeitos.

Através de um *Brainstorming*, identificaram-se seis fatores que podem influenciar nos resultados do teste, reduzindo ou aumentando a durabilidade das pastilhas de freio e, como nenhum deles era o objetivo da análise, foram criadas ações para eliminar e/ou minimizar as influências dos mesmos.

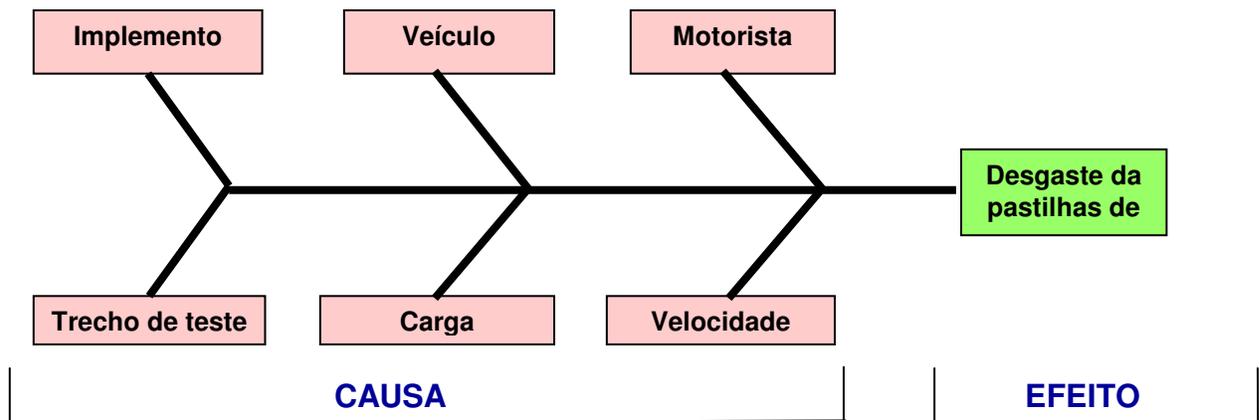


Figura 6.2 - Diagrama causa efeito do desgaste das pastilhas de freio

- **Implemento (Semi-reboque)** - É o nome dado ao tipo de equipamento que é usado para carregar a carga do veículo, por exemplo: um caminhão pode ser utilizado com uma báscula para carregar areia, ou com um tanque para carregar água. Ranganathan & Yang (1996) estudaram a influência do movimento longitudinal de carga líquida dentro de semi-reboque tanque na distribuição de forças normais e na aderência utilizada entre os eixos veiculares, assim como no desempenho do veículo trator semi-reboque na frenagem. Nesse estudo, foi analisado o efeito do deslocamento da carga líquida e, por consequência da posição longitudinal do centro de gravidade do semi-reboque, considerando vários parâmetros do veículo e da forma do tanque de carga, por meio de um modelo matemático e de uma simulação computacional. Os

resultados mostraram que a variação da posição longitudinal do centro de gravidade da carga pode influenciar significativamente no desempenho e na segurança do veículo durante a frenagem. A distribuição de carga e a inércia dos implementos são diferentes, o que pode influenciar no desgaste da pastilha. Para eliminar esse fator, que poderia influenciar o desgaste diferenciado entre os caminhões, foram adotadas para todos os caminhões os mesmos modelos de carretas para carga seca e carregadas com pedras britadas;

- **Veículo** – Refere-se ao tipo e modelo de caminhão que foi utilizado para o teste. Caso não fossem idênticos, possuiriam sistemas de freio, distribuição de carga, eixos traseiros e dianteiros diferentes. Neste caso, a distribuição de carga seria diferente, podendo resultar em um desgaste desigual entre as pastilhas de um roda e outra. Por esse motivo, adotaram-se como padrão 16 caminhões pesados tipo cavalo mecânico 4x2 com todos os sistemas idênticos;
- **Motoristas** - São chamados de pilotos de teste, ou seja, são motoristas contratados pela própria montadora para detectar eventuais problemas mecânicos ou elétricos nos veículos protótipos e, posteriormente, repassar essas informações aos engenheiros responsáveis. Se a forma de conduzir os veículos for diferenciada, por exemplo: modo de utilização do freio motor, modo de utilização de uma marcha para descida de serra, etc, resulta em diferentes desgastes entre os veículos. Visando reduzir essas diferenças, foi realizado um treinamento com todos os motoristas para padronização da forma de conduzir os veículos. Segundo Fernandes (2000), o processo de frenagem é considerado um fenômeno no qual o sistema motorista e veículo conduzido interagem entre si e com outros vários sistemas, como o pavimento, demais veículos, obstáculos, meio ambiente e outros, em uma sucessão de eventos no tempo.
- **Trecho de teste** - É o percurso que o veículo fez durante todo o teste. Para diferentes condições da pista, os desempenhos dos veículos seriam diferentes. Para este item, foi realizada uma pesquisa junto aos clientes, e foi selecionado um trecho que representasse as piores aplicações, nas quais o veículo seria utilizado após o seu lançamento no mercado.

- **Carga Transportada** - Um dos principais fatores, no projeto do sistema de freios de um veículo, é o seu peso total máximo permitido (Canale 2007). Cada caminhão é desenvolvido para uma determinada aplicação e para um determinado peso bruto total (PBT). Visando antecipar falhas que possam ocorrer no cliente, o carregamento foi padronizado e simularam-se as piores aplicações do mercado. Os veículos foram carregados com a carga máxima prevista pelo projeto e permitido por lei. Veículos com carga acima do peso total máximo indicado pelo fabricante certamente apresentarão problemas com a eficiência do sistema de freios nas frenagens de emergência e nas descidas de serra (Canale 2007);
- **Velocidade** - Segundo Canale (2007), dependendo da velocidade e da marcha escolhida para a descida da serra, a temperatura resultante nos freios poderá ser excessiva, a qual provoca desgastes acentuados do sistema de freios e a queda do coeficiente de atrito entre as guarnições e discos/tambores do sistema de freios. Sendo assim, foi adotado um padrão de velocidade máxima para trechos planos e para a descida de serra. O controle foi feito por meio do tacôgrafo e de um equipamento instalado no veículo com comunicação direta com a fábrica.

6.2.2 – Planejamento de teste de confiabilidade realizado na aplicação real

Para o teste na aplicação real foi utilizado o mesmo tipo de veículo do teste de simulação, viabilizando uma abordagem comparativa entre os testes de simulação e aplicação real. Para seleção dos clientes e do tipo de aplicação do veículo, foram utilizados os resultados de vendas nos primeiros 2 anos de lançamento. Porém, quando um veículo de carga é comercializado, os engenheiros, além de auxiliarem os clientes na escolha apropriada para cada aplicação, devem ainda considerar o melhor intervalo de manutenção que o veículo deverá seguir durante a sua vida útil. No caso do modelo de veículo utilizado no estudo de caso, existem três diferentes tipos de serviços nos quais o veículo pode ser distribuído: severo, misto e rodoviário. Sendo que, a forma de utilização do veículo determina o melhor tipo de serviço:

Serviço Severo

- Utilização do veículo em condições extremas, operando nos limites máximos de esforço ou de carga;
- Serviços em canteiros de obra, tráfego predominante fora de estrada com cargas pesadas;
- Tráfego constante em estrada de terra;
- Tráfego de curta distância com alta porcentagem de funcionamento do motor em marcha lenta;
- Tráfego rodoviário com percurso predominante em regiões de serras com subidas pronunciadas.

Serviço Misto

- Veículos que trafegam predominantemente em grandes cidades e vias com tráfego intenso;
- Tráfego regional com poucas vias expressas;
- Tráfego com freqüentes “para e anda”;
- Serviço regular de entrega;
- Tráfego predominante em rodovias mal conservadas;
- Percurso freqüente em regiões de serras.

Serviço Rodoviário

- Veículos que trafegam predominantemente em auto-estradas ou rodovias pavimentadas em bom estado, com velocidade média elevada e poucas paradas intermediárias.

Utilizando os critérios citados, os 39 veículos do teste da aplicação real foram distribuídos conforme a tabela 6.1.

Tipo do serviço	Quantidade de caminhões
Severo	14
Misto	13
Rodoviário	12

Tabela 6.1 – Distribuição dos veículos do teste da aplicação real

Não houve nenhum tipo de contato entre os técnicos e os motoristas durante todo o trabalho e durante a coleta de dados, de modo a evitar que as pessoas envolvidas interferissem na forma de conduzir o veículo. Todas as medições foram realizadas em concessionárias, com o acompanhamento da engenharia de desenvolvimento da fábrica.

7 RESULTADOS

7.1. Dados coletados

Nesta seção, são apresentados os dados que foram coletados de acordo com a metodologia descrita no capítulo 5.

É importante notar que a quilometragem prevista para as verificações de desgaste são de 35.000 km, 70.000 km e 105.000 km, mas as distâncias envolvidas nas entregas das transportadoras impediram que tais intervalos fossem respeitados rigorosamente, pois não é possível parar um veículo para a inspeção durante a entrega.

Os dados coletados, que serão apresentados, foram divididos da seguinte forma:

- 1- Planilhas com dados do teste de confiabilidade por meio da simulação:
 - Eixo dianteiro lado direito (Anexo A.3);
 - Eixo dianteiro lado esquerdo (Anexo A.4);
 - Eixo traseiro lado direito (Anexo A.5);
 - Eixo traseiro lado esquerdo (Anexo A.6)

- 2 - Planilhas com dados do teste de confiabilidade realizado na aplicação real;
 - Eixo dianteiro lado direito, Severo / Misto / Rodoviário (Anexo A.7);
 - Eixo dianteiro lado esquerdo, Severo / Misto / Rodoviário (Anexo A.8);
 - Eixo traseiro lado direito, Severo / Misto / Rodoviário (Anexo A.9);
 - Eixo traseiro lado esquerdo, Severo / Misto / Rodoviário (Anexo A.10)

7.2 Análise dos Dados

A análise dos dados foi dividida em duas etapas:

7.2.1. Análise de degradação:

7.2.2. Estimativa da confiabilidade:

Os dados serão apresentados conforme figura 7.1:

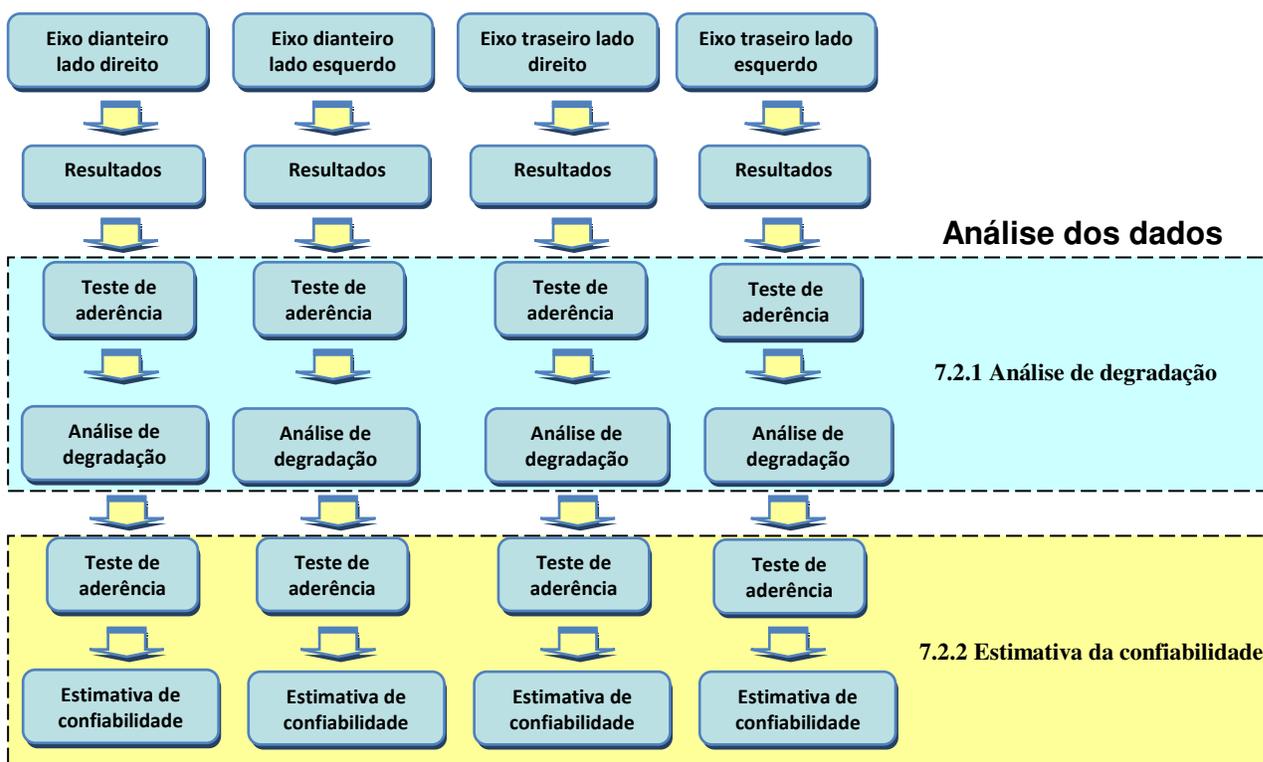


Figura 7.1 – Fluxograma para análise dos dados dos testes

7.2.1 Análise de degradação

Todas as pastilhas iniciaram o teste com 30 mm de espessura, e o limite mínimo que a pastilha deve alcançar no final de vida é de 11 mm. Na maioria dos casos, as pastilhas não atingiram o valor mínimo estipulado em projeto, devido a suspensão do teste antes da sua finalização. Vale ressaltar que os caminhões não rodaram especificamente para o teste das pastilhas de freio. Sendo assim, extrapolaram-se, com os dados apresentados e com a análise de

degradação, as quilometragens previstas em que as pastilhas chegariam, sem a necessidade de conduzir os testes até a falha total, ou seja, até atingir a espessura mínima das pastilhas.

Conforme o capítulo 3, a análise de degradação consiste em modelar matematicamente o desgaste ocorrido ao longo do tempo. Ou seja, o aplicativo ajusta os dados coletados em um modelo do tipo linear, exponencial, logarítmico ou de potência, selecionando uma função matemática em que o desgaste é função do tempo de uso. Com esta função, e fornecendo previamente o critério que determina a falha do componente por desgaste, projeta-se a vida esperada do mesmo (11 mm).

Com o auxílio do programa Reliasoft Weibull 7++, realizou-se uma análise de degradação. Para o cálculo da correlação entre a amostra e o modelo, utiliza-se o Mean Square Error (MSE). Estes valores são obtidos através da soma dos quadrados da diferença entre os pontos e a proximidade da linha de tendência com relação a X e Y. A distribuição que o software sugere é a que apresenta o melhor ajuste, ou seja, o menor desvio. Ao término da análise, todos modelos aparecerão com a sua respectiva posição conforme tabela 7.1.

Ranking	Modelo	MSE
1	Linear	20,67759004
2	Exponencial	38,78709109
3	Logarítmico	553,1576444
4	Potência	14963,90002

Tabela 7.1 – Teste de aderência MSE

a) Análise de degradação para o teste simulação

A análise de degradação foi realizada contemplando todas as pastilhas, classificadas para cada lado dos eixos, conforme anexos A3, A4, A5, A6. O teste de aderência sugeriu que o desgaste das pastilhas, para todos os lados dos eixos seguisse um modelo do tipo linear

Além dos resultados apresentados pela verificação da aderência dos dados a um modelo matemático, sabe-se por histórico dos engenheiros de desenvolvimento da fábrica, que o desgaste de uma pastilha de freio segue um modelo linear.

Sendo o modelo linear definido como $Y = AX + B$, sendo Y o desgaste e X a quilometragem, a tabela 7.2 apresenta o tempo estimado (quilometragem) até a falha, calculado através da função obtida para cada pastilha.

Quilometragem calculada considerando a espessura mínima das pastilhas de freio 11 mm.				
ID Unidade	Eixo dianteiro lado direito	Eixo dianteiro lado esquerdo	Eixo traseiro lado direito	Eixo traseiro lado esquerdo
100 A1	106.238	103.586	145.653	132.847
100 A2	154.418	172.564	124.674	126.422
100 A3	181.048	118.126	107.195	109.331
101 A2	159.494	173.050	202.374	208.941
101 A3	94.525	101.038	139.891	147.552
94 A1	150.953	165.909	215.783	212.742
94 A2	156.221	141.726	254.582	237.025
94 A3	123.901	159.012	282.935	204.995
95 A1	92.275	91.292	141.172	158.404
95 A3	176.318	190.747	173.795	177.812
96 A1	148.241	150.179	275.794	237.791
96 A2	122.979	124.901	221.880	193.859
96 A3	147.989	142.693	275.133	233.675
97 A1	130.725	142.513	186.474	194.346
97 A2	101.960	131.250	191.588	184.346
98 A1	201.135	196.714	255.729	275.400

Tabela 7.2 - Tempo estimado (quilometragem) até a falha para o teste simulação

b) Análise de degradação para o teste de confiabilidade realizado na aplicação real

A análise de degradação foi realizada contemplando todas as pastilhas, classificadas para cada lado dos eixos e conforme apresentado nos anexos A7, A8, A9 e A10.

Para o teste de aderência ser mais preciso, foram coletados ao menos três medições por veículo para ajustar a um modelo matemático real. Como não seria possível efetuar várias medições de espessura das pastilhas em todos os clientes, devido a necessidade do veículo ser desviado para concessionária a cada dois meses, selecionaram-se 3 veículos e foram realizadas mais de três medições por veículo. Sendo assim, foi feito um teste de aderência para os veículos que foram testados, e o modelo sugerido pelo teste de aderência foi modelo linear. Com este resultado, percebeu-se que o modelo para o desgaste da pastilha na aplicação real é o mesmo observado para o teste de simulação.

Sendo portanto, definido o modelo linear, as tabelas 7.3, 7.4, 7.5 e 7.6 apresentam o tempo estimado (quilometragem) até a falha, calculado por meio da função obtida para cada pastilha.

Severo		Misto		Rodoviário	
80.000	S1	280.000	M1	815.882	R1
105.530	S2	269.588	M2	490.833	R2
106.346	S3	457.254	M3	994.333	R3
121.273	S4	593.100	M4	623.438	R4
185.307	S5	837.727	M5	522.500	R5
217.248	S6	134.934	M6	941.364	R6
220.851	S7	351.336	M7	855.000	R7
229.182	S8	170.882	M8	377.031	R8
250.800	S9	112.000	M9	888.929	R9
273.051	S10	384.189	M10	583.571	R10
284.294	S11	342.000	M11	738.077	R11
286.248	S12	199.000	M12	617.500	R12
410.718	S13	255.969	M13		
561.339	S14				

Tabela 7.3 - Tempo estimado (quilometragem) até a falha para o teste aplicação real (Eixo dianteiro roda lado direito).

Severo		Misto		Rodoviário	
80.000	S1	280.000	M1	792.571	R1
96.218	S2	474.586	M10	583.571	R10
106.346	S3	371.739	M11	685.357	R11
129.358	S4	199.000	M12	665.000	R12
190.000	S9	189.195	M13	763.519	R2
217.248	S6	269.588	M2	994.333	R3
220.851	S7	348.656	M3	831.250	R4
252.571	S12	533.790	M4	522.500	R5
284.294	S11	921.500	M5	739.643	R6
293.678	S8	134.934	M6	665.000	R7
321.370	S5	351.336	M7	524.565	R8
388.572	S10	170.882	M8	732.059	R9
481.148	S14	112.000	M9		
483.198	S13				

Tabela 7.4 - Tempo estimado (quilometragem) até a falha para o teste aplicação real (Eixo dianteiro roda lado esquerdo).

Severo		Misto		Rodoviário	
122.581	S1	534.810	M1	630.455	R1
265.865	S10	556.412	M10	408.500	R10
284.294	S11	259.091	M11	436.136	R11
195.169	S12	199.000	M12	320.185	R12
410.718	S13	167.364	M13	361.667	R2
177.265	S14	413.078	M2	497.167	R3
96.941	S2	593.457	M3	906.818	R4
106.346	S3	360.669	M4	475.000	R5
180.500	S4	376.122	M5	545.000	R6
141.162	S5	234.138	M6	544.091	R7
160.078	S6	170.000	M7	928.077	R8
313.147	S7	170.882	M8	777.813	R9
185.107	S8	327.629	M9		
120.577	S9				

Tabela 7.5 - Tempo estimado (quilometragem) até a falha para o teste aplicação real (Eixo traseiro roda lado direito).

Severo		Misto		Rodoviário	
84.444	S1	539.543	M1	730.000	R1
99.586	S2	645.438	M10	680.833	R10
101.129	S9	237.500	M11	479.750	R11
106.346	S3	199.000	M12	360.208	R12
106.718	S6	197.794	M13	606.324	R2
134.721	S14	492.517	M2	596.600	R3
165.138	S4	357.596	M3	831.250	R4
165.143	S12	310.343	M4	522.500	R5
202.286	S8	383.958	M5	609.118	R6
284.294	S11	249.300	M6	460.385	R7
304.236	S13	170.000	M7	928.077	R8
313.147	S7	170.882	M8	691.389	R9
404.115	S10	250.950	M9		
445.075	S5				

Tabela 7.6 - Tempo estimado (quilometragem) até a falha para o teste aplicação real (Eixo traseiro roda lado esquerdo).

7.2.2 Estimativa da confiabilidade

Para a estimativa de confiabilidade, foram utilizados os dados de quilometragem obtidos por meio do modelo de degradação, os quais foram modelados usando distribuições usuais de confiabilidade.

Segundo Morello (2005) para o estudo e cálculo da confiabilidade em componentes mecânicos, durante sua vida útil, a distribuição estatística mais utilizada é a distribuição de Weibull. Sua utilização ocorre pela flexibilidade que o parâmetro de forma β fornece a esta distribuição, que pode assumir diferentes tipos de funções em determinados intervalos desse parâmetro. Para modelar falhas de início e de final de vida, que incluem os fenômenos de fadiga e desgaste, a Distribuição Normal é a mais indicada, pois apresenta uma taxa de falhas crescente, principalmente quando o componente aproxima-se de sua vida média. Também conhecida como distribuição Gaussiana, aplica-se a fenômenos naturais e medições que englobem grandes amostras e populações. Quando há valores de difícil visualização e grandezas elevadas, pode-se utilizar a Distribuição Lognormal em lugar da Normal, na qual se faz um ajuste de escala (Logarítma).

a) Estimativa da confiabilidade para os dados dos testes

Com os dados das tabelas dos anexos A11, A12, A13 e A14, utilizando o método da máxima verossimilhança (MLE) com o auxílio do *software* Weibull ++, verificou-se inicialmente a função de distribuição $f(t)$ mais adequada através de um teste de aderência numérico.

O teste de aderência é utilizado para selecionar a melhor distribuição e o *software* Weibull++ 7's utiliza três fatores para classificar as distribuições: o teste Kolmogorov-Smirnov (K-S), o coeficiente de correlação normalizado (ρ) e o LKV que contém valores de verossimilhança.

Conforme tabela 7.7, a segunda coluna (AVGOF) contém os valores obtidos pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S). A terceira coluna (AVPLOT) é referente aos resultados do teste de correlação do coeficiente normalizado (ρ), a quarta coluna (LKV) se refere aos valores da verossimilhança.

Distribuição	AVGOF	AVPLOT	LKV
Weibull 3	4,522617	4,054699	-187,9279
Weibull 2	0,531796	3,862441	-188,2318
Normal	4,188831	3,895131	-188,2033
Exponencial 1	99,73614	20,19853	-205,6504
Exponencial 2	59,82076	8,325426	-188,5467
Lognormal	22,14651	4,420102	-188,3383

Tabela 7.7: Resultados iniciais de análise.

Após o cálculo utilizando testes estatísticos, são atribuídos pesos aos resultados destes testes. Estes pesos são definidos pelo usuário do *software*, ou utiliza-se o padrão do *software*. Após a definição dos pesos utiliza-se a equação 7.1 para o cálculo do desvio (DESV).

$$\text{DESV} = (\text{AVGOF}_{\text{rank}} \times \text{AVGOF}_{\text{peso}}) + (\text{AVPLOT}_{\text{rank}} \times \text{AVPLOT}_{\text{peso}}) + (\text{LKV}_{\text{rank}} \times \text{LKV}_{\text{peso}}) \quad (7.1)$$

Na tabela 7.8, são apresentados os resultados combinados, com os respectivos pesos que foram atribuídos aos testes estatísticos utilizados pelo *software*.

Distribuição	RAVGOF	RAVPLOT	RLKV	DESV
Weibull 3	3	3	1	200
Weibull 2	1	1	3	200
Normal	2	2	2	200
Exponencial 1	6	6	6	600
Exponencial 2	5	5	5	500
Lognormal	4	4	4	400

Tabela 7.8: Detalhes da análise

Cada distribuição tem o seu valor de desvio (DESV) calculado, e estes valores são utilizados para determinar o ranking das distribuições estatísticas.

É importante salientar que o usuário especifica diferentes pesos dependendo do método de estimação dos parâmetros utilizado RR ou MLE.

Para definição do *ranking* das distribuições estatísticas para os testes na aplicação real e testes por simulação, foi utilizado o método relacionado acima e com os valores dos pesos conforme padrão do software. Os resultados encontram-se na tabela 7.9, sendo que a distribuição estatística sugerida pelo programa foi a Weibull com três parâmetros.

			Ranking			
			1º	2º	3º	4º
Eixo dianteiro direito	Aplicação real	Severo	Weibull 3	Weibull 2	Lognormal	Exponencial
		Misto	Weibull 3	Lognormal	Exponencial	Weibull 2
		Rodoviário	Weibull 3	Weibull 2	Normal	Lognormal
	Simulação		Weibull 3	Weibull 2	Normal	Lognormal
Eixo dianteiro esquerdo	Aplicação real	Severo	Weibull 3	Weibull 2	Exponencial	Normal
		Misto	Weibull 3	Lognormal	Exponencial	Weibull 2
		Rodoviário	Weibull 3	Exponencial	Normal	Lognormal
	Simulação		Weibull 3	Normal	Weibull 2	Lognormal
Eixo traseiro direito	Aplicação real	Severo	Weibull 3	Exponencial	Lognormal	Weibull 2
		Misto	Weibull 3	Lognormal	Exponencial	Weibull 2
		Rodoviário	Weibull 3	Exponencial	Normal	Lognormal
	Simulação		Weibull 3	Weibull 2	Normal	Lognormal
Eixo traseiro esquerdo	Aplicação real	Severo	Weibull 3	Exponencial	Lognormal	Weibull 2
		Misto	Weibull 3	Lognormal	Exponencial	Weibull 2
		Rodoviário	Weibull 3	Weibull 2	Normal	Lognormal
	Simulação		Weibull 3	Weibull 2	Lognormal	Exponencial

Tabela 7.9 - Ranking das distribuições para os testes na aplicação real e testes por simulação

Definindo-se uma distribuição de probabilidade associada ao fenômeno, pode-se verificar a aderência dos dados à distribuição graficamente, através dos respectivos gráficos de probabilidade. Os gráficos de probabilidade - Weibull são apresentados nas figuras 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5, e na tabela 7.10 seguem os valores dos parâmetros.

			Parâmetros		
			Beta	Gamma	Eta (corrigido)
Eixo dianteiro direito	Aplicação real	Severo	1,41	63500	255150
		Misto	1,3198	88360	359470
		Rodoviário	3,446	133900	770220
	Simulação		3,2538	50160	151230
Eixo dianteiro esquerdo	Aplicação real	Severo	1,4778	61900	273900
		Misto	1,193	93960	350550
		Rodoviário	2,5849	400710	747580
	Simulação		3,9016	39356	155316
Eixo traseiro direito	Aplicação real	Severo	1,22	89528	204448
		Misto	1,1824	146190	346380
		Rodoviário	1,536	278760	602300
	Simulação		2,2722	81129	215129
Eixo traseiro esquerdo	Aplicação real	Severo	0,7575	98498	176071
		Misto	1,0547	158250	326930
		Rodoviário	2,742	236940	673300
	Simulação		3,5052	51292	206782

Tabela 7.10 – Parâmetros para os testes na aplicação real e testes por simulação

Com utilização da distribuição Weibull triparamétrica (γ , η , β) foi possível obter, conforme tabela 7.10, o parâmetro gamma (γ), considerando que, até este valor, a probabilidade de falha é nula. Pode-se afirmar que a primeira troca de pastilhas no teste de aplicação real ocorre após o teste por simulação, sendo este mais um fator que demonstra a representatividade do teste por simulação.

Os valores do parâmetro eta (η) apresentados na tabela 7.10 estão corrigidos, ou seja, quando utiliza-se a Weibull triparamétrica, ocorre o deslocamento da curva no eixo X, influenciado pelo parâmetro gamma (γ) > 0. Para corrigir os valores de eta (η) e obter a probabilidade de falhas até 63%, é necessário somar o valor de gamma (γ). Considerando os valores de eta (η) corrigidos, o teste por simulação possui o menor desvio entre gamma (γ) > 0 e

eta (η). Tal fato se deve ao planejamento do teste apresentado no capítulo 6.2.1, onde foram criadas ações para alguns fatores que poderiam influenciar no teste. Conforme já citado, o teste na aplicação, para o caso severo nas rodas traseiras, sofreram influencias externas e não foram, portanto, considerados para esta análise.

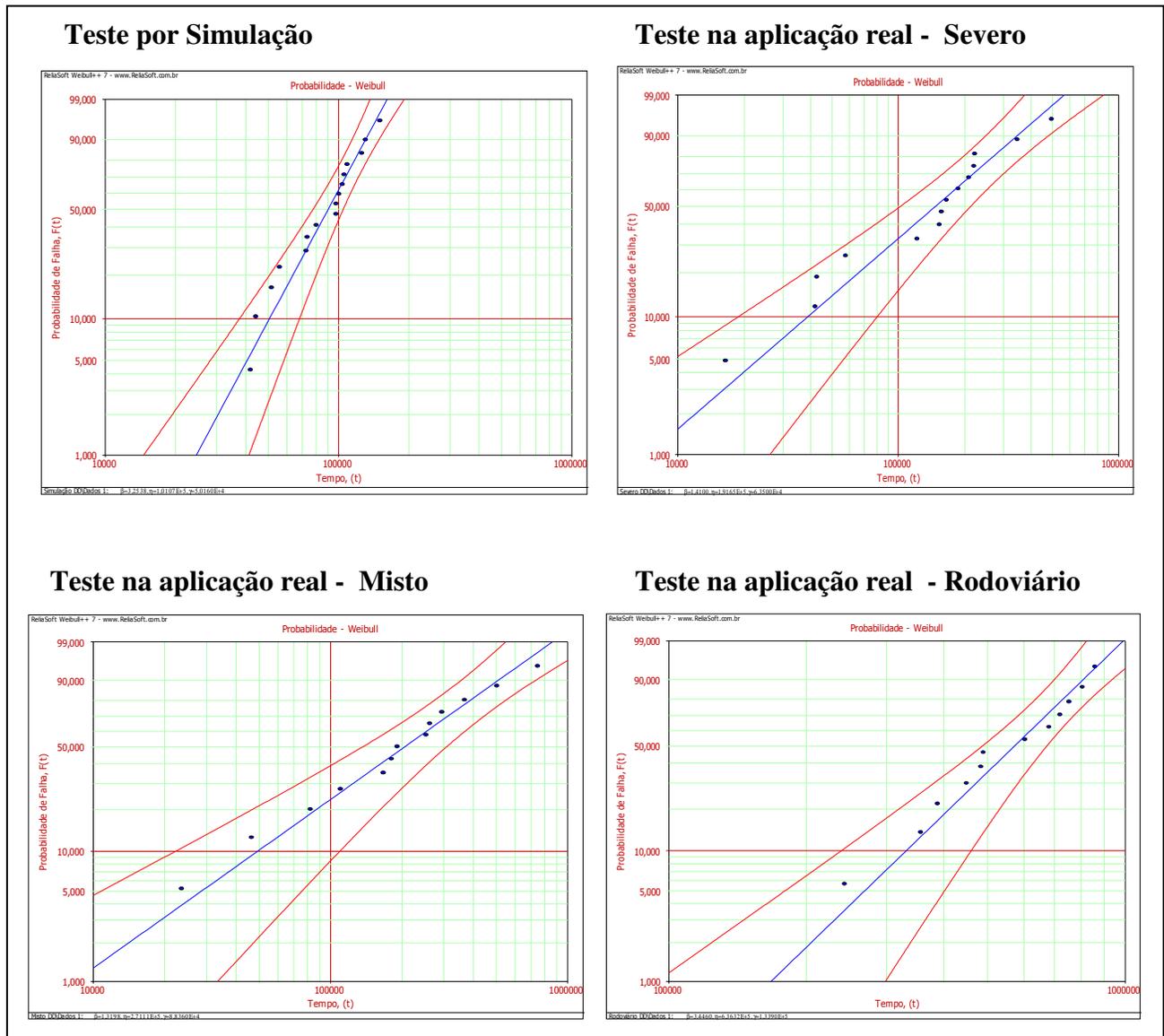
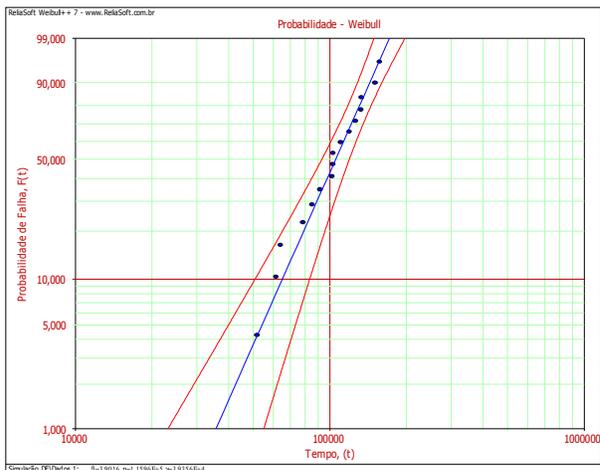
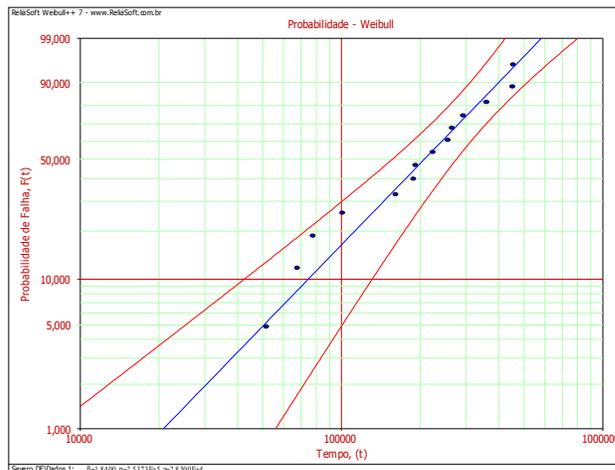


Figura 7.2 - Gráficos de probabilidade – weibul para as pastilhas do eixo dianteiro roda lado direito

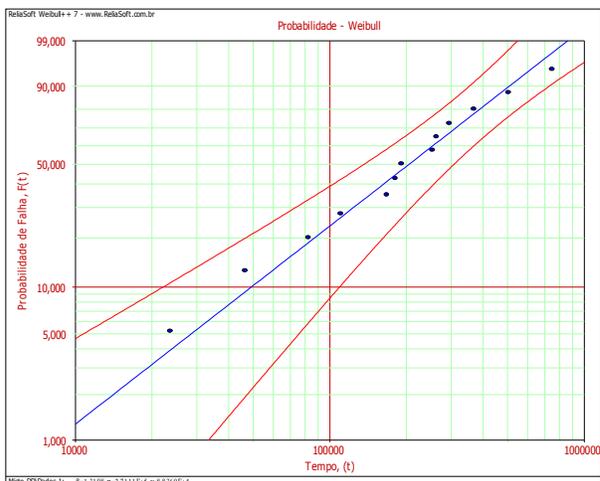
Teste por Simulação



Teste na aplicação real - Severo



Teste na aplicação real - Misto



Teste na aplicação real - Rodoviário

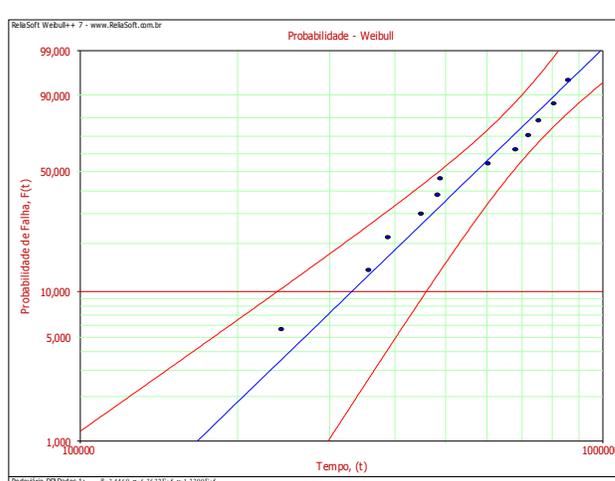
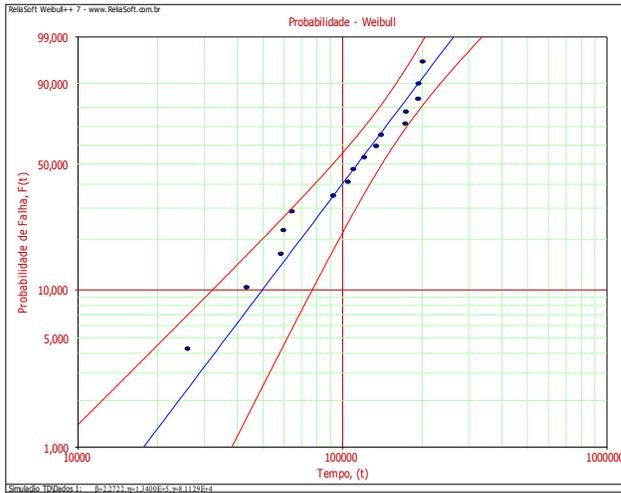
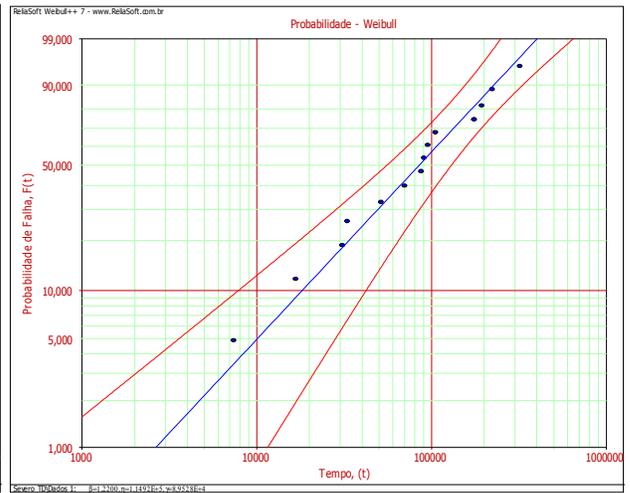


Figura 7.3 - Gráficos de probabilidade – weibull para as pastilhas do eixo dianteiro roda lado esquerdo

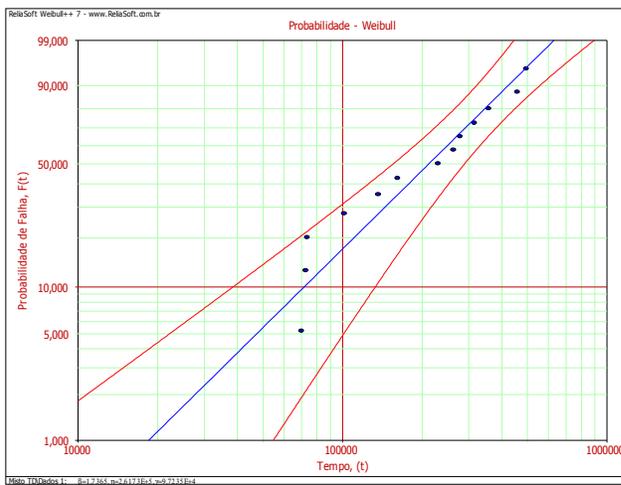
Teste por Simulação



Teste na aplicação real - Severo



Teste na aplicação real - Misto



Teste na aplicação real - Rodoviário

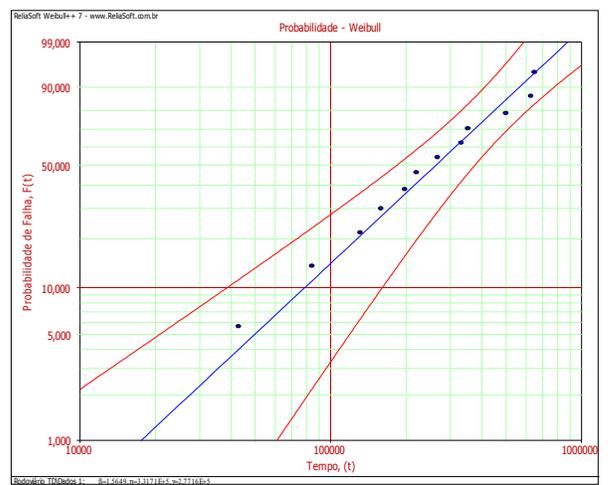
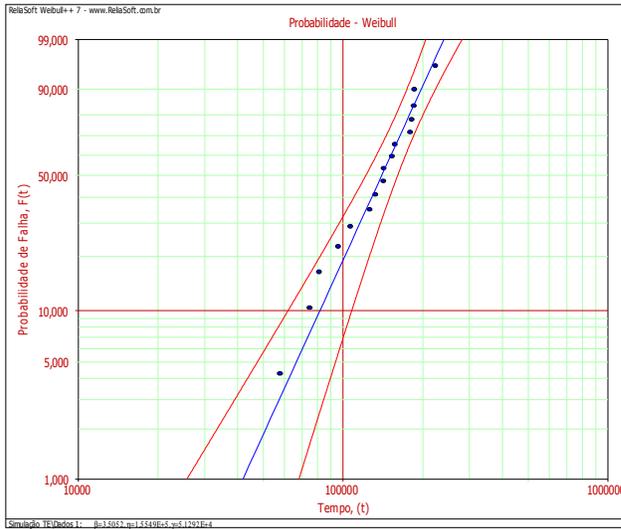
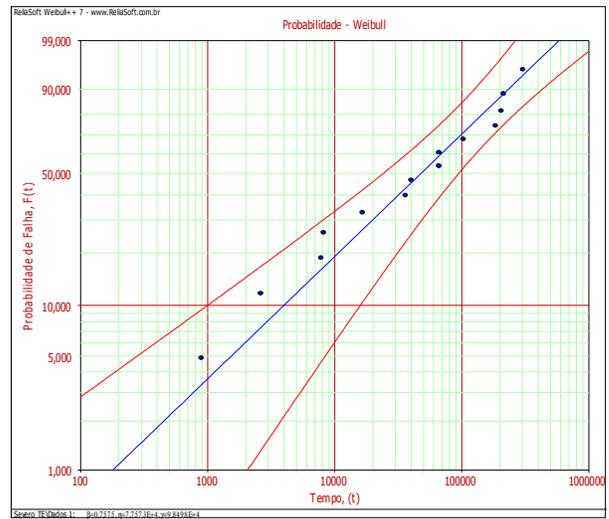


Figura 7.4 - Gráficos de probabilidade – weibull para as pastilhas do eixo traseiro roda lado direito

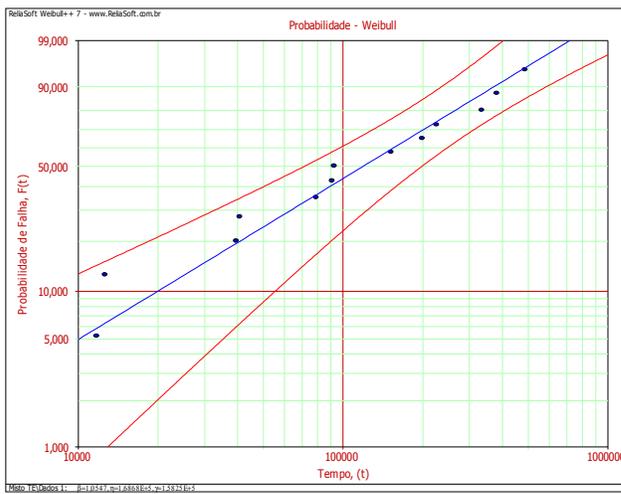
Teste por Simulação



Teste na aplicação real - Severo



Teste na aplicação real - Misto



Teste na aplicação real - Rodoviário

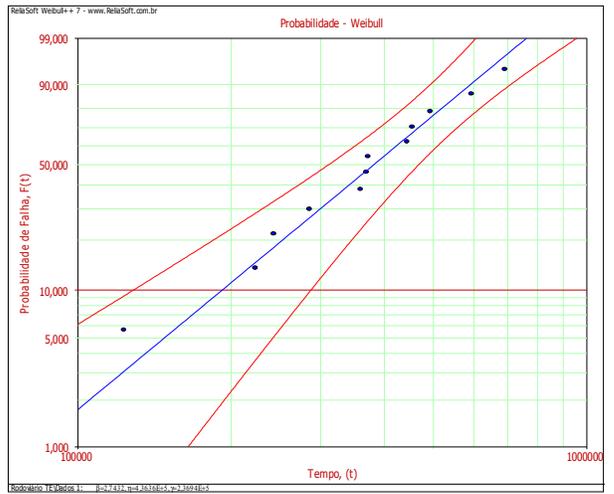


Figura 7.5 - Gráficos de probabilidade – weibull para as pastilhas do eixo traseiro roda lado esquerdo

7.3. Comparação da probabilidade de falha para as pastilhas

Com objetivo de comparar os testes na aplicação real com os testes por simulação, a tabela 7.11 e os gráficos das figuras 7.6, 7.7, 7.8 e 7.9 apresentam a probabilidade de troca das pastilhas considerando períodos de 100.000km, 125.000km e 150.000km.

Probabilidade de troca das pastilhas até 100.000 km					
Eixo	Lado	Aplicação real			Simulação
		Severo	Misto	Rodoviário	
Dianteiro	Direito	9,2	1,56	0	9,554
	Esquerdo	7,61	1,14	0	7,56
Traseiro	Direito	5,24	0,04	0	1,16
	Esquerdo	4,92	0	0	1,7
Probabilidade de troca das pastilhas até 125.000 km					
Eixo	Lado	Aplicação real			Simulação
		Severo	Misto	Rodoviário	
Dianteiro	Direito	18,24	6,88	0	31,35
	Esquerdo	15,59	7,33	0	26,40
Traseiro	Direito	21,21	2,01	0	7,6
	Esquerdo	21,23	0	0	7,04
Probabilidade de troca das pastilhas até 150.000 km					
Eixo	Lado	Aplicação real			Simulação
		Severo	Misto	Rodoviário	
Dianteiro	Direito	27,8	13,2	0,000314	61,75
	Esquerdo	22,8	15,03	0	56,51
Traseiro	Direito	36,68	6,01	0	19,78
	Esquerdo	51,97	0	0	18,4

Tabela 7.11 – Probabilidade de falha

Considerando que as pastilhas de freio dos testes na aplicação real para as condições Misto e Rodoviário, e ainda Severo para pastilhas do eixo dianteiro, possuem a probabilidade de serem substituídas com quilometragem superiores ou similares ao teste por simulação, pode-se afirmar que para estas condições o teste por simulação é representativo.

Para o teste na aplicação real na condição Severo, para pastilhas do eixo traseiro existe a probabilidade das trocas das pastilhas ocorrerem antes das trocas das pastilhas do teste por simulação, mas estes resultados podem ser, a princípio, desconsiderados, pois em alguns veículos

da aplicação real no caso severo, foi utilizada carga granulada (areia), e durante o carregamento e o trajeto, o produto transportado entra em contato com o sistema de freio do eixo traseiro (pastilhas e discos), resultando no desgaste prematuro das pastilhas. Tal fenômeno não é observado no eixo dianteiro, pois a carreta do caminhão é apoiada na região traseira do chassi.

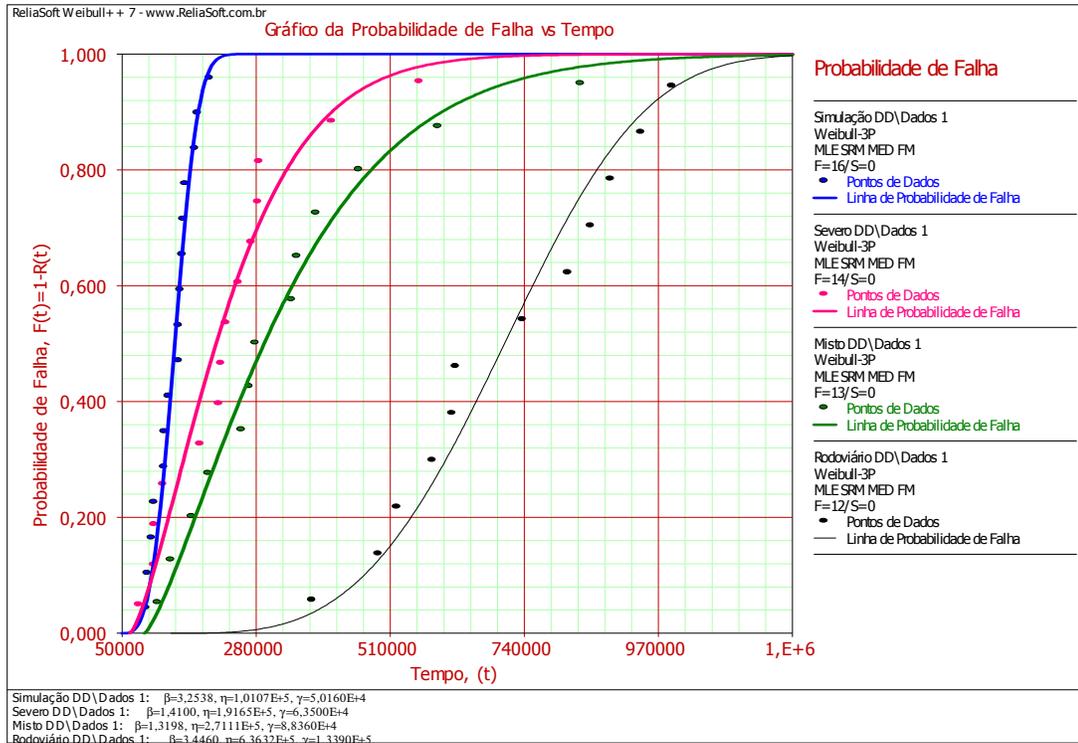


Figura 7.6 - Probabilidade de falhas vs quilometragem eixo dianteiro roda lado direito

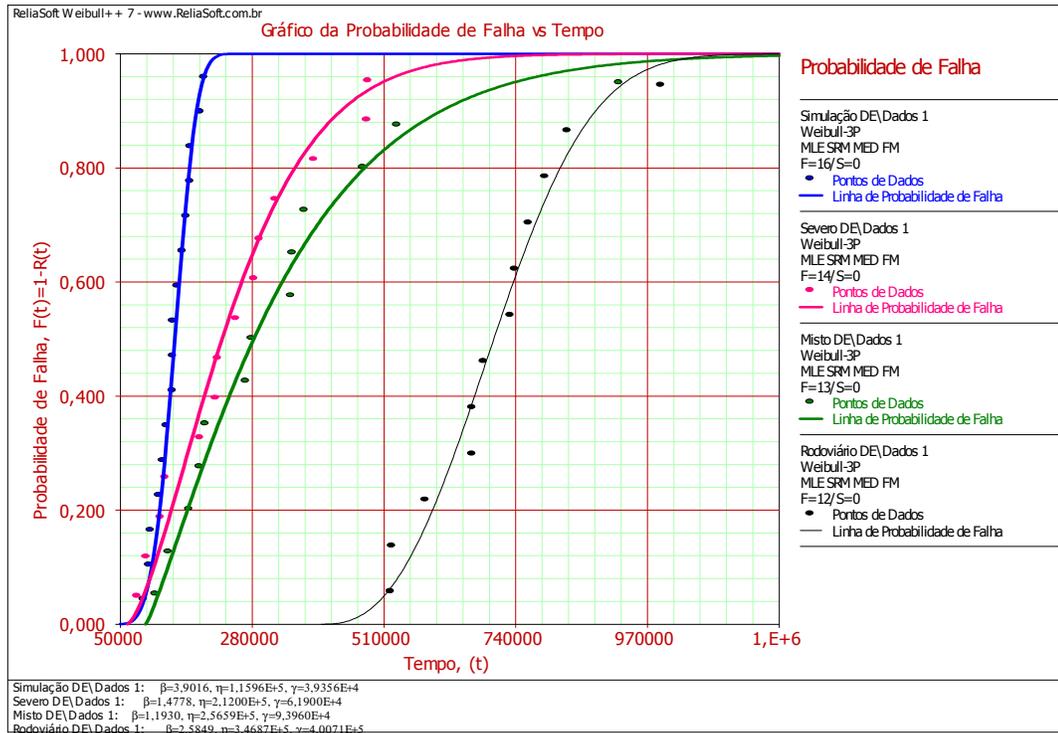


Figura 7.7 - Probabilidade de falhas vs quilometragem eixo dianteiro roda lado esquerdo

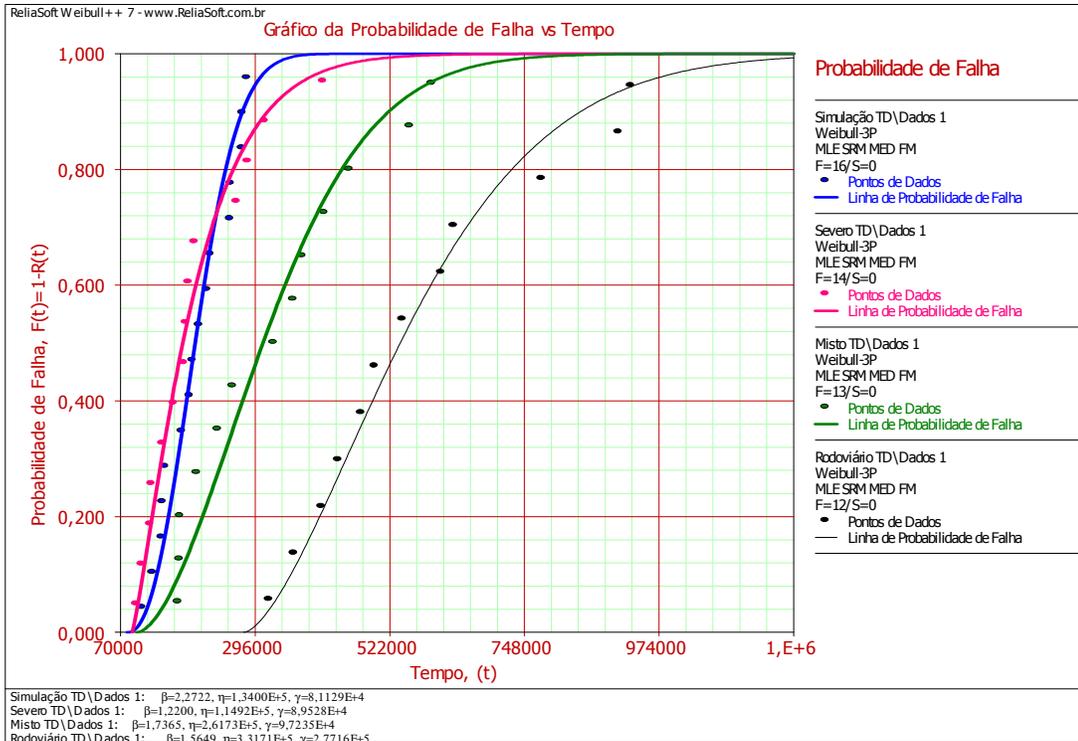


Figura 7.8 - Probabilidade de falhas vs quilometragem eixo traseiro roda lado direito

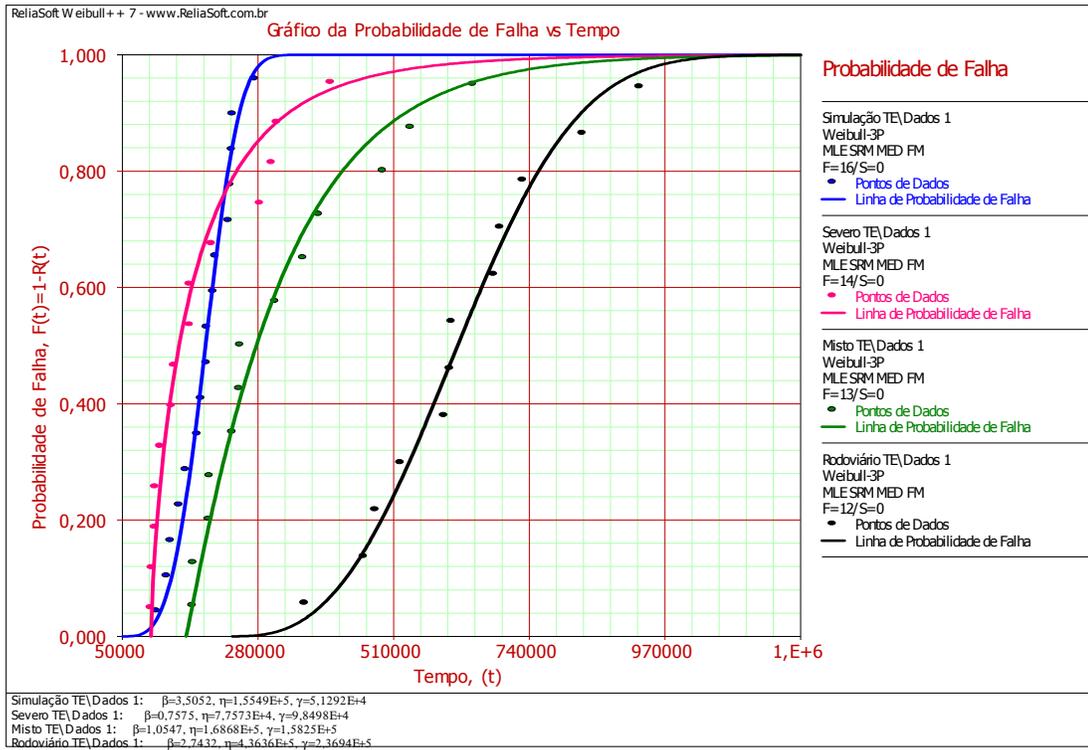


Figura 7.9 - Probabilidade de falhas vs quilometragem eixo traseiro roda lado esquerdo

8 CONCLUSÕES

Conforme introduzido no início desta dissertação, o objetivo principal foi o desenvolvimento de uma metodologia baseada em modelos de degradação e testes estatísticos, para comparar duas situações de testes veiculares, e propor às indústrias de componentes automotivos uma forma de validar os testes de confiabilidade realizados durante a fase de desenvolvimento para itens de desgaste. Foram realizados testes em aplicações reais dos veículos em conjunto com o próprio cliente e testes por simulação durante o desenvolvimento do produto.

A metodologia desenvolvida possibilitou comparar os resultados para pastilhas de freio dos testes na aplicação real e por simulação, e verificar que o teste utilizado está bem dimensionado, sendo representativo para as condições reais de operação dos veículos em clientes.

Por mais que se procure simular a vida útil do componente em estudo nas condições mais agressivas possíveis, dentro dos limites técnicos, não há uma garantia de que os ensaios controlados contemplem 100% dos resultados de campo nas aplicações reais. As divergências observadas estão ligadas a fatores que alteram as características técnicas do veículo, sendo que o aspecto humano (má utilização na operação do veículo) pode representar o fator de maior impacto nas diferenças observadas. Foi possível verificar estas situações no teste para as pastilhas do eixo traseiro da aplicação real (severo) que apresentaram desgaste superior ao teste por simulação, influenciados pela contaminação das pastilhas e discos de freio.

A análise de dados de degradação apresenta-se como uma alternativa econômica e eficaz aos usuais testes de confiabilidade. A possibilidade de se obter estimativas de confiabilidade de um produto sem a necessidade de conduzi-lo até a falha representa um avanço considerável nos dias atuais em que os prazos de desenvolvimento de produtos são cada vez menores.

Foi possível verificar as diferenças existentes entre as aplicações nos casos severo, misto e rodoviário, para as pastilhas de freio, possibilitando criar ações diferenciadas quanto a cobertura da garantia dos veículos e treinamento de clientes.

O controle dos aspectos operacionais antes e durante o teste por simulação (ensaio controlado) apresentados no capítulo 6.2.1 mostrou-se eficiente, pois a dispersão dos resultados obtidos foi reduzida, quando comparada com o teste na aplicação real.

Foi possível comprovar que o modelo de degradação linear utilizado, para a extrapolação dos dados de desgaste das pastilhas, neste caso, é o modelo matemático mais adequado para este componente. Isto foi validado com a verificação da aderência dos dados de desgaste em veículos na aplicação real.

8.1. Trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho de dissertação, surgiram idéias de oportunidades para vários assuntos, que poderiam ser temas ou integrarem futuros trabalhos. Seguem algumas das idéias levantadas.

Uma primeira sugestão para a continuidade deste trabalho é ampliar a utilização dessa metodologia para outros sistemas do veículo, permitindo verificar se outros testes realizados há muitos anos pelas empresas representam a realidade. Sendo possível a obtenção de um modelo para gerenciamento das ações de garantia e históricos para as áreas de desenvolvimento e produção.

Os dados obtidos em históricos de garantia nem sempre refletem corretamente as informações que são enviadas através das empresas concessionárias e áreas de pós-vendas. Para uma análise mais precisa, muitas empresas utilizam métodos paralelos. O desenvolvimento de uma ferramenta sistemática, ao invés da utilização de banco de dados convencional, melhoraria a qualidade da informação proveniente de campo, afetando de forma direta no tempo para solução de uma falha, assim como em todo processo de desenvolvimento. A informação sobre falhas, obtida de forma mais precisa, auxilia de forma direta no desenvolvimento de novos projetos.

Durante o trabalho, percebeu-se que existe uma grande diferença na forma de conduzir os caminhões. Sendo assim, recomenda-se fazer um estudo de confiabilidade possibilitando comparar os resultados de confiabilidade de um caminhão conduzido por motoristas sem treinamento, e outro teste com motoristas treinados.

Outra sugestão se refere ao fato de que, em alguns casos, não é possível esperar um acúmulo de dados de falha, resultantes de modificações de campo. Tais componentes, devido ao pleno desempenho, apresentam tempos de vida útil extremamente longos, de modo que o tempo necessário à coleta de dados seria suficiente para que o componente se tornasse obsoleto. Para obtenção dos resultados, devem ser desenvolvidos bancos de provas para acelerar o processo de falha, submetendo o componente a condições de teste, por exemplo, tensão, ciclos e temperatura, que são muito mais rigorosos que as normais. Muitas vezes, estes testes são desenvolvidos com base em análise de sinais (espectros) de uma determinada pista ou condição, não sendo porém correlacionados aos resultados de campo. Sendo assim, sugere-se adaptar a metodologia apresentada para comparar estes ensaios acelerados com testes na aplicação real.

Referências

ANJOS, Joel Soares dos Comparativo de confiabilidade de uma plataforma sub-compacta no mercado latino americano e africano / J.S. dos Anjos. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007. 186 p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

BARROS FILHO, Adail. Utilização de Ferramentas de Confiabilidade em um Ambiente de Manufatura de Classe Mundial. 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

BAXTER, M. Projeto de Produto. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1998.

BERKE, T. e **ZAIRO**, A. N. Warranties: What are they? What do they really cost?. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium. pp. 326-329, 1991.

BLASHE, M. K. ; Shirivastava, B. A. Defining Failure of Manufacturing & Equipment. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium. p. 69-75, 1994.

BRANCO, A.F.B., Definindo Qualidade. Guaratinguetá: FEG/UNESP, 1999.

CANALE, A.C., Dinâmica Veicular, Apostila 2007. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

CASTRO, Daniel E e **PINHEIRO**, Marlon A. Sistema de gestão de confiabilidade e risco veicular. Revista Educ. Tecnol., Belo Horizonte, v.10, n.2, p.16-21, jul./dez. 2005 – Departamento de Engenharia Mecânica – CEFET-MG.

CAVALCA, K.L. Apostila de Confiabilidade de Sistemas – IM 461, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. 2006.

CONTADOR, J.C., A Construção da Empresa de Sucesso. Guaratinguetá: FEG/UNESP, 2000.

CONTADOR, J.C., Modelo para Aumentar a Produtividade Industrial. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1996.

COPPEAD, Centro de Estudos em Logística – Indicadores de Transportes Rodoviários - 2001.

CNT – Confederação Nacional dos Transportes. Relatório Analítico – Pesquisa Empresa de Cargas CNT – 2002

CARVALHO, C.L., Análise de Disponibilidade Utilizando Abordagem Nebulosa - Tese de Doutorado - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - 2008
Elétrica

DOTY, L.A., Reliability for the Technologies. New York: Industrial, 1989, 307p.

EBELING, C.E. An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering. MCGraw-Hill, 1997, 486p.

ECOVIAS – Concessionária do Sistema de Rodovias Anchieta / Imigrantes – Seminário - 2002

FERNANDES, D.L.G. Análise de veículos rodoviários articulados pesados na freagem através da técnica dos mapas de desempenho. São Carlos, 2000. 214p. Dissertação de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

GUNTER, B. Reliability data analysis – Part 1 – Statistical issues in analyzing censored data. American society for quality, Quality Progress, 1994, p. 101-104.

GUIDA, M., PULCINI, G. Automotive reliability inference based on past data and technical knowledge, Reliability Engineering and System Safety 76 (2002) 129-137.

HAVIARAS, G.J., Metodologia para análise de confiabilidade de pneus radiais. São Paulo, 2005. 113p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

HORITA, F., Trabalho de FMEA, [On Line] Disponível na Internet via www.fge.if.usp.br/~fhorita/FMEA.htm. Acesso em Outubro de 2002.

IRESON,, W. GRANT e COOMBS, Jr. CLYDE F. – Handbook of Reliability Engineering and Mangement. USA: McGraw-Hill Book Company, 1988.

KAMINSKI, P. C. Desenvolvendo Produtos com Planejamento, Criatividade e Qualidade. São Paulo: Editora LTC, 2000.

LEWIS, E. E. Introduction to Reliability Engineering. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996, 435p.

LIMA, M. P. Custos logísticos na economia brasileira. Revista Tecnológica Ano XI, n 122. Publicare Editora, São Paulo, 2006a.

LIMA, R.F.C Benchmarking de Tarifas e Práticas do Transporte Rodoviário. CEL-COPPEAD, Rio de Janeiro, 2006b. Disponível em: http://www.centrologistica.com.br/new/art_rachel. Acesso em: 3 nov. 2007.

LIMPERT, R. Brake Design and Safety. 2ª ed. Warrendalle: Society of Automotive Engineers, Inc., 199. 525p. - 1999

LOPES, D. F. L. Análise de Componentes Principais Aplicada à Confiabilidade e Sistemas Complexos. 121p. Tese (doutorado). Faculdade de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis: 2001

MARQUES, D. Metodologia para ajuste e comparação de modelos em confiabilidade. 2004. 126p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

MEEKER, W. Q. e HAMADA, M. “Statistical tools for the Rapid Development & Evaluation of High-Reliability Products”. IEEE Transactions on Reliability, 44, n° 2, 1994 June, pp. 187-198.

MARTINEZ-ESPINOSA, M.; LOUSADA-NETO, F.; CALIL JÚNIOR, C. Estatística geral com aplicações à engenharia. São Paulo: Editora Atlas. 2004. 165p.

MORELLO, M. G. Redução da árvore de falhas baseadas no grau de criticidade: aplicação em transmissão de veículo comercial. 2005. 113p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

NELSON, W. “Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses”. John Wiley & Sons, 1990.

O’CONNOR, P. D. T. Practical reliability engineering, John Wiley & Sons, 1991, 409 p.

O’CONNOR, P. D. T. Practical reliability engineering, New York: John Wiley & Sons, 1988.

PALLEROSI, C.A. . Confiabilidade Conceitos Básicos e métodos de cálculo, São Paulo, 2006, 280p.

PETENATE, A. Fundamentos de Técnicas Estatísticas, Instituto de Estatística da Universidade de Campinas, 2003.

POHL, Liliana e RIBEIRO, J.L.D., Modelo de degradação aplicados a melhoria da confiabilidade de produtos (1998)

PORTER, M. Competitive Strategy. New York: Free Press, 1980.

POSSAMAI, O. e SOUZA, R.A. . Confiabilidade e Falhas de Campo: Uma Metodologia para Suporte ao Projeto, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

RAMAKUMAR, R. Engineering Reliability: Fundamentals and Applications, Oklahoma: Prentice- Hall International, 482p. 1993.

RAI, B., SINGH, N., Hazard rate estimation from incomplete and unclean warranty data. Reliability Engineering and System Safety. (2003) p. 79-92.

RANGANATHAN, R, YANG, YS., Impact of liquid load shift on the braking characteristics of partially filled tank vehicles. Vehicle Systems Dynamics, v 26, n3, p. 223-240, Sept. 1996.

RELIASOFT, Engenharia da Confiabilidade: Análise de dados de vida. São Paulo, 2002.

RIBEIRO, J. L. Confiabilidade, PPGEP, Notas de Aula. Porto Alegre. 1998.

RICHTER, P.E. (UFSM) e LOPES, L.F.D. Confiabilidade relacionada ao desenvolvimento de produtos e à gestão da qualidade total. XXIV Encontro Nac. de Eng. de Produção Florianópolis, SC, Brasil, nov (2004).

SCAPIN, Carlos Alberto. Análise sistêmica de Falhas. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.

SHIGERU, M. F. Curso de Pós-Graduação em "Mecânica Automobilística" Freios. São Bernardo do Campo: Centro Universitário da FEI, 2005. Apostila.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JONHSTON, R. Administração da Produção. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

SOUZA, G. F. M. Confiabilidade de produtos e sistemas, In: Notas de aula, 2002.

STAMATIS, D. H., Failure Mode and Effect Analysis, FMEA from Theory to Execution, ASQC Quality Press, Wisconsin, USA, First Edition. 1995.

TEIXEIRA, C.A.R. A confiabilidade como fator de valor na melhoria de produtos. Estudo de caso: Sistema de embreagem automotiva 2004. 110p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

YIN R. Estudo de caso: planejamento e métodos. 2a ed. Porto Alegre: Bookman; 2001.

ANEXO A.1 – Formulário e procedimento padrão para coleta de dados das pastilhas de freio

Instruções para realização das medições:

1° - Anotar na ficha de controle o tipo de veículo, número finas (se houver), quilometragem e a data da medição;

2° - Observar o lado do eixo onde deverá ser sacada a pastilha;

3° - Observar no calíper qual pastilha é interna e qual a externa, sendo que a interna sempre será a do lado do cilindro;

4° - Observar visualmente o estado da pastilha quanto a trincas, empenamento da plaqueta e carga da mola;

5° - Conforme indicado pelos desenhos das pastilhas acima, verificar qual será a forma correta de medição;

6° - Utilizar o equipamento apalpador, bem como as placas mestres para a coleta das medições, estas placas deverão ser utilizadas conforme o veículo a ser medido;

7° - Antes de sacar as pastilhas, com o Cálibre de lâmina, verificar as folgas entre os êmbolos do calíper e a pastilha e anotar na ficha;

8° - Sacar a pastilha externa primeiramente e iniciar a medição conforme indicado pelo desenho acima;

9° - Sacar a pastilha interna a seguir e iniciar a medição conforme indicado pelo desenho acima, esta pastilha contém a marca dos êmbolos na região da placa de fixação do material de atrito;

10° - Anotar na ficha de controle as medições, conforme está indicado.

Obs. Para pastilha interna do LTC 9 ton., sempre medir a espessura pela parte alta da plaqueta.

CONTROLE DESGASTE DE PASTILHAS DE FREIO												
VEICULO	0			FINAS	0			Km	DATA			
MEDIÇÃO DE FOLGAS ENTRE AS PASTILHAS E O ÊMBOLO												
PASTILHAS												
CONTROLE DE DESGASTE DE PASTILHAS DE FREIO												
TPS 4	EIXO DIANTEIRO				EIXO TRASEIRO				EIXO AUXILIAR			
	DIREITO		ESQUERDO		DIREITO		ESQUERDO		DIREITO		ESQUERDO	
	INTERNA	EXTERNA	INTERNA	EXTERNA	INTERNA	EXTERNA	INTERNA	EXTERNA	INTERNA	EXTERNA	INTERNA	EXTERNA
PASTILHAS	1											
	2											
	3											
	4											
	5											
	6											
	7											
	8											
Observações: _____												
Medição realizada por: _____						Apalpador n°: _____						

ANEXO A.2 – Modelo do banco de dados utilizados para armazenar as medições coletadas

Desgaste Pastilhas		Medição Nº.	1	2	3	4
Data Medição			6/12/2006	1/3/2007	16/5/2007	14/6/2007
Km Total			15.000	70.000	100.000	130.000
Eixo Dianteiro	Jogo		1	1	1	1
	Direito	Interna	30,00	23,40	17,90	14,60
		Externa	30,00	23,50	16,70	10,00
	Esquerdo	Interna	30,00	24,00	19,45	17,10
		Externa	30,00	24,60	19,00	16,25
Eixo Traseiro	Jogo		1	1	1	1
	Direito	Interna	30,00	23,90	19,10	16,75
		Externa	30,00	24,20	18,70	16,40
	Esquerdo	Interna	30,00	23,30	19,00	16,75
		Externa	30,00	24,00	18,60	17,30

ANEXO A.3 – Dados do teste simulação eixo dianteiro lado direito.

Eixo dianteiro lado direito (Teste por simulação)						
km	Desgaste	Amostras		km	Desgaste	Amostras
0	30	100 A1		0	30	95 A1
44644	22,4	100 A1		46783	19,2	95 A1
62648	18,6	100 A1		92160	11,5	95 A1
0	30	100 A2		0	30	95 A3
11510	25,8	100 A2		52746	25,4	95 A3
41072	23,5	100 A2		87523	21,4	95 A3
61819	21,8	100 A2		116293	16,9	95 A3
83489	19,4	100 A2		0	30	96 A1
102836	16,8	100 A2		37157	24,5	96 A1
0	30	100 A3		90000	18,6	96 A1
36892	26,1	100 A3		101000	17,5	96 A1
76349	21,9	100 A3		137489	12	96 A1
90146	20,6	100 A3		0	30	96 A2
0	30	101 A2		42072	23,5	96 A2
38882	23,6	101 A2		0	30	96 A3
50517	22,9	101 A2		45916	23	96 A3
106618	17,6	101 A2		94413	18,8	96 A3
0	30	101 A3		120439	14	96 A3
42804	22,4	101 A3		0	30	97 A1
66427	16,65	101 A3		31012	25,8	97 A1
89672	11,7	101 A3		87582	17,8	97 A1
0	30	94 A1		132596	10,4	97 A1
48592	22,4	94 A1		0	30	97 A2
92052	18,8	94 A1		47690	19,8	97 A2
0	30	94 A2		70004	16,4	97 A2
72355	21,2	94 A2		95151	13	97 A2
0	30	94 A3		0	30	98 A1
17603	25,6	94 A3		94216	21,1	98 A1
63376	20,6	94 A3				
105631	13,5	94 A3				

ANEXO A.4 – Dados do teste simulação eixo dianteiro lado esquerdo..

Eixo dianteiro lado esquerdo (Teste por simulação)					
km	Desgaste	Amostras	km	Desgaste	Amostras
0	30	100 A1	0	30	95 A1
44644	22,8	100 A1	46783	19,1	95 A1
62648	18	100 A1	92160	11,3	95 A1
0	30	100 A2	0	30	95 A3
11510	25,4	100 A2	52746	25,15	95 A3
41072	23,7	100 A2	87523	21,8	95 A3
61819	22,2	100 A2	116293	18,1	95 A3
83489	20,3	100 A2	0	30	96 A1
102836	18	100 A2	37157	24,7	96 A1
0	30	100 A3	90000	18,4	96 A1
36892	25,9	100 A3	101000	18	96 A1
76349	17,4	100 A3	137489	12,2	96 A1
90146	15,6	100 A3	0	30	96 A2
0	30	101 A2	42072	23,6	96 A2
38882	23,7	101 A2	0	30	96 A3
50517	23,1	101 A2	45916	23	96 A3
106618	18,6	101 A2	94413	19,4	96 A3
0	30	101 A3	120439	12,7	96 A3
42804	22,7	101 A3	0	30	97 A1
66427	18,25	101 A3	31012	26	97 A1
89672	12,5	101 A3	87582	16,4	97 A1
0	30	94 A1	132596	13,4	97 A1
48592	23	94 A1	0	30	97 A2
92052	19,8	94 A1	47690	21,9	97 A2
0	30	94 A2	70004	19,4	97 A2
72355	20,3	94 A2	95151	16,7	97 A2
0	30	94 A3	0	30	98 A1
17603	25,6	94 A3	94216	20,9	98 A1
63376	22,3	94 A3			
105631	17	94 A3			

ANEXO A.5 – Dados do teste simulação eixo traseiro lado direito.

Eixo traseiro lado direito (Teste por simulação)					
km	Desgaste	Amostras	km	Desgaste	Amostras
0	30	100 A1	0	30	95 A1
44644	23,8	100 A1	46783	22,9	95 A1
62648	22	100 A1	92160	17,8	95 A1
0	30	100 A2	0	30	95 A3
11510	25,4	100 A2	52746	25,8	95 A3
41072	22,7	100 A2	87523	20,7	95 A3
61819	20,2	100 A2	116293	17	95 A3
83489	17	100 A2	0	30	96 A1
102836	14	100 A2	37157	26,6	96 A1
0	30	100 A3	90000	23	96 A1
36892	23,6	100 A3	101000	22,5	96 A1
76349	16,73	100 A3	137489	20,6	96 A1
90146	13,8	100 A3	179561	17,6	96 A1
0	30	101 A2	0	30	96 A2
11635	25,9	101 A2	45916	24,5	96 A2
67736	23	101 A2	94413	20,4	96 A2
0	30	101 A3	120439	20,5	96 A2
42804	23,6	101 A3	0	30	96 A3
66427	21,5	101 A3	179561	17,6	96 A3
89672	18	101 A3	0	30	97 A1
121172	13,28	101 A3	31012	26,6	97 A1
0	30	94 A1	87582	21	97 A1
48592	24,1	94 A1	132596	16,5	97 A1
92052	22,2	94 A1	0	30	97 A2
0	30	94 A2	47690	23,7	97 A2
72355	24,6	94 A2	70004	22,2	97 A2
0	30	94 A3	95151	21,1	97 A2
17603	25,4	94 A3	0	30	98 A1
63376	24,2	94 A3	94216	23	98 A1
105631	21,9	94 A3			
134193	20,4	94 A3			

ANEXO A.6 – Dados do teste simulação eixo traseiro lado esquerdo.

Eixo traseiro lado esquerdo (Teste por simulação)					
km	Desgaste	Amostras	km	Desgaste	Amostras
0	30	100 A1	0	30	94 A3
44644	23,7	100 A1	17603	25,8	94 A3
62648	21	100 A1	63376	23,2	94 A3
0	30	100 A2	105631	20,1	94 A3
11510	25,3	100 A2	134193	17	94 A3
41072	22,1	100 A2	0	30	95 A1
61819	21,2	100 A2	46783	23,7	95 A1
83489	17	100 A2	92160	19,1	95 A1
102836	14	100 A2	0	30	95 A3
0	30	100 A3	52746	25,85	95 A3
36892	24	100 A3	87523	21,1	95 A3
76349	17,1	100 A3	116293	17,2	95 A3
90146	14	100 A3	0	30	96 A1
0	30	101 A2	37157	26,1	96 A1
11635	26	101 A2	90000	23,4	96 A1
67736	23,2	101 A2	101000	22	96 A1
0	30	101 A3	137489	18,8	96 A1
42804	23,8	101 A3	179561	15,4	96 A1
66427	21,8	101 A3	0	30	96 A2
89672	18,9	101 A3	45916	23,2	96 A2
121172	14,02	101 A3	94413	22,8	96 A2
0	30	94 A1	120439	16,8	96 A2
48592	24,5	94 A1	0	30	96 A3
92052	22,7	94 A1	179561	15,4	96 A3
0	30	94 A2	0	30	97 A1
72355	24,2	94 A2	31012	26,6	97 A1
			87582	20	97 A1
			132596	17,7	97 A1
			0	30	97 A2
			47690	23,6	97 A2
			70004	22,4	97 A2
			95151	20,5	97 A2
			0	30	98 A1
			94216	23,5	98 A1

ANEXO A.7 – Dados do teste aplicação real eixo dianteiro direito.

Severo			Misto			Rodoviário		
Eixo dianteiro roda lado direito			Eixo dianteiro roda lado direito			Eixo dianteiro roda lado direito		
km	Desgaste	Amostras	km	Desgaste	Amostras	km	Desgaste	Amostras
0	30	S1	0	30	M1	0	30	R1
80000	11	S1	280000	11	M1	146000	26,6	R1
0	30	S2	0	30	M2	0	30	R2
28136	27,5	S2	269588	11	M2	217000	21,6	R2
57517	21,7	S2	0	30	M3	0	30	R3
69551	16	S2	293605	17,8	M3	157000	27	R3
0	30	S3	0	30	M4	0	30	R4
106346	11	S3	280942	21	M4	105000	26,8	R4
0	30	S4	0	30	M5	0	30	R5
81700	17,2	S4	194000	25,6	M5	55000	28	R5
0	30	S5	0	30	M6	0	30	R6
45037	23,1	S5	134934	11	M6	109000	27,8	R6
78340	20,2	S5	0	30	M7	0	30	R7
145536	15,72	S5	214500	18,4	M7	63000	28,6	R7
0	30	S6	0	30	M8	0	30	R8
64031	24,4	S6	170882	11	M8	127000	23,6	R8
0	30	S7	0	30	M9	0	30	R9
220851	11	S7	112000	11	M9	131000	27,2	R9
0	30	S8	0	30	M10	0	30	R10
28272	26,4	S8	169852	21,6	M10	43000	28,6	R10
61927	24,3	S8	0	30	M11	0	30	R11
104419	21,3	S8	180000	20	M11	101000	27,4	R11
0	30	S9	0	30	M12	0	30	R12
66000	25	S9	199000	11	M12	91000	27,2	R12
0	30	S10	0	30	M13			
106346	22,6	S10	45805	26,6	M13			
0	30	S11						
284294	11	S11						
0	30	S12						
45197	27	S12						
0	30	S13						
86467	26	S13						
0	30	S14						
70906	27,6	S14						

ANEXO A.8 – Dados do teste aplicação real eixo dianteiro lado esquerdo.

Severo			Misto			Rodoviário		
Eixo dianteiro roda lado esquerdo			Eixo dianteiro roda lado esquerdo			Eixo dianteiro roda lado esquerdo		
km	Desgaste	Amostras	km	Desgaste	Amostras	km	Desgaste	Amostras
0	30	S1	0	30	M1	0	30	R1
80000	11	S1	280000	11	M1	146000	26,5	R1
0	30	S2	0	30	M2	0	30	R2
28136	24,6	S2	269588	11	M2	217000	24,6	R2
57517	19	S2	0	30	M3	0	30	R3
69551	16	S2	293605	14	M3	157000	27	R3
0	30	S3	0	30	M4	0	30	R4
106346	11	S3	280942	20	M4	105000	27,6	R4
0	30	S4	0	30	M5	0	30	R5
81700	18	S4	194000	26	M5	55000	28	R5
0	30	S5	0	30	M6	0	30	R6
45037	26	S5	134934	11	M6	109000	27,2	R6
78340	24,44	S5	0	30	M7	0	30	R7
145536	21,46	S5	214500	18,4	M7	63000	28,2	R7
0	30	S6	0	30	M8	0	30	R8
64031	24,4	S6	170882	11	M8	127000	25,4	R8
0	30	S7	0	30	M9	0	30	R9
220851	11	S7	112000	11	M9	131000	26,6	R9
0	30	S8	0	30	M10	0	30	R10
28272	27,3	S8	169852	23,2	M10	43000	28,6	R10
61927	25,5	S8	0	30	M11	0	30	R11
104419	23,2	S8	180000	20,8	M11	101000	27,2	R11
0	30	S9	0	30	M12	0	30	R12
66000	23,4	S9	199000	11	M12	91000	27,4	R12
0	30	S10	0	30	M13			
106346	24,8	S10	45805	25,4	M13			
0	30	S11						
284294	11	S11						
0	30	S12						
45197	26,6	S12						
0	30	S13						
86467	26,6	S13						
0	30	S14						
70906	27,2	S14						

ANEXO A.9 – Dados do teste aplicação real eixo traseiro lado direito.

Severo			Misto			Rodoviário		
Eixo traseiro roda lado direito			Eixo traseiro roda lado direito			Eixo traseiro roda lado direito		
km	Desgaste	Amostras	km	Desgaste	Amostras	km	Desgaste	Amostras
0	30	S1	0	30	M1	0	30	R1
80000	17,6	S1	320886	16,6	M1	146000	25,6	R1
0	30	S2	0	30	M2	0	30	R2
28136	24,2	S2	269588	17,6	M2	217000	18,6	R2
57517	18,7	S2	0	30	M3	0	30	R3
69551	16,4	S2	293605	20,6	M3	157000	24	R3
0	30	S3	0	30	M4	0	30	R4
106346	11	S3	280942	15,2	M4	105000	27,8	R4
0	30	S4	0	30	M5	0	30	R5
81700	21,4	S4	194000	20,2	M5	55000	27,8	R5
0	30	S5	0	30	M6	0	30	R6
45037	27,2	S5	234138	11	M6	109000	26,2	R6
78340	25,9	S5	0	30	M7	0	30	R7
94330	12,4	S5	170000	11	M7	63000	27,8	R7
0	30	S6	0	30	M8	0	30	R8
64031	22,4	S6	170882	11	M8	127000	27,4	R8
0	30	S7	0	30	M9	0	30	R9
220851	16,6	S7	124154	22,8	M9	131000	26,8	R9
0	30	S8	0	30	M10	0	30	R10
28272	26	S8	169852	24,2	M10	43000	28	R10
61927	24	S8	0	30	M11	0	30	R11
104419	19	S8	180000	16,8	M11	101000	25,6	R11
0	30	S9	0	30	M12	0	30	R12
66000	19,6	S9	199000	11	M12	91000	24,6	R12
0	30	S10	0	30	M13			
106346	22,4	S10	45805	24,8	M13			
0	30	S11						
284294	11	S11						
0	30	S12						
45197	25,6	S12						
0	30	S13						
86467	26	S13						
0	30	S14						
70906	22,4	S14						

ANEXO A.10 – Dados do teste aplicação real eixo traseiro lado esquerdo.

Severo			Misto			Rodoviário		
Eixo traseiro roda lado esquerdo			Eixo traseiro roda lado esquerdo			Eixo traseiro roda lado esquerdo		
km	Desgaste	Amostras	km	Desgaste	Amostras	km	Desgaste	Amostras
0	30	S1	0	30	M1	0	30	R1
80000	16,8	S1	320886	18,7	M1	146000	26,2	R1
0	30	S10	0	30	M2	0	30	R2
106346	25	S10	269588	19,6	M2	217000	23,2	R2
0	30	S11	0	30	M3	0	30	R3
284294	11	S11	293605	14,4	M3	157000	25	R3
0	30	S12	0	30	M4	0	30	R4
45197	24,8	S12	280942	12,8	M4	105000	27,6	R4
0	30	S13	0	30	M5	0	30	R5
86467	24,6	S13	194000	20,4	M5	55000	28	R5
0	30	S14	0	30	M6	0	30	R6
70906	20	S14	249300	11	M6	109000	26,6	R6
0	30	S2	0	30	M7	0	30	R7
28136	23,3	S2	170000	11	M7	63000	27,4	R7
57517	19	S2	0	30	M8	0	30	R8
69551	16,75	S2	170882	11	M8	127000	27,4	R8
0	30	S3	0	30	M9	0	30	R9
106346	11	S3	124154	20,6	M9	131000	26,4	R9
0	30	S4	0	30	M10	0	30	R10
81700	20,6	S4	169852	25	M10	43000	28,8	R10
0	30	S5	0	30	M11	0	30	R11
45037	27,2	S5	180000	15,6	M11	101000	26	R11
78340	25,9	S5	0	30	M12	0	30	R12
94330	12	S5	199000	11	M12	91000	25,2	R12
0	30	S6	0	30	M13			
64031	18,6	S6	45805	25,6	M13			
0	30	S7						
220851	16,6	S7						
0	30	S8						
28272	26,4	S8						
61927	24,3	S8						
104419	20	S8						
0	30	S9						
66000	17,6	S9						

ANEXO A.11 - Tempo estimado(quilometragem) até a falha para as pastilhas de freio do eixo dianteiro roda lado direito

Aplicação real						Simulação	
Severo		Misto		Rodoviário			
80.000	S1	280.000	M1	815.882	R1	92.276	95 A1
105.530	S2	269.588	M2	490.833	R2	94.525	101 A3
106.346	S3	457.254	M3	994.333	R3	101.961	97 A2
121.273	S4	593.100	M4	623.438	R4	106.239	100 A1
185.307	S5	837.727	M5	522.500	R5	122.980	96 A2
217.248	S6	134.934	M6	941.364	R6	123.901	94 A3
220.851	S7	351.336	M7	855.000	R7	130.725	97 A1
229.182	S8	170.882	M8	377.031	R8	147.989	96 A3
250.800	S9	112.000	M9	888.929	R9	148.241	96 A1
273.051	S10	384.189	M10	583.571	R10	150.953	94 A1
284.294	S11	342.000	M11	738.077	R11	154.419	100 A2
286.248	S12	199.000	M12	617.500	R12	156.221	94 A2
410.718	S13	255.969	M13			159.495	101 A2
561.339	S14					176.318	95 A3
						181.048	100 A3
						201.135	98 A1

ANEXO A.12 - Tempo estimado(quilometragem) até a falha para as pastilhas de freio do eixo dianteiro roda lado esquerdo

Aplicação real						Simulação	
Severo		Misto		Rodoviário			
80.000	S1	280.000	M1	792.571	R1	91.292	95 A1
96.218	S2	474.586	M10	583.571	R10	101.039	101 A3
106.346	S3	371.739	M11	685.357	R11	103.587	100 A1
129.358	S4	199.000	M12	665.000	R12	118.126	100 A3
190.000	S9	189.195	M13	763.519	R2	124.901	96 A2
217.248	S6	269.588	M2	994.333	R3	131.251	97 A2
220.851	S7	348.656	M3	831.250	R4	141.726	94 A2
252.571	S12	533.790	M4	522.500	R5	142.513	97 A1
284.294	S11	921.500	M5	739.643	R6	142.693	96 A3
293.678	S8	134.934	M6	665.000	R7	150.179	96 A1
321.370	S5	351.336	M7	524.565	R8	159.013	94 A3
388.572	S10	170.882	M8	732.059	R9	165.909	94 A1
481.148	S14	112.000	M9			172.564	100 A2
483.198	S13					173.051	101 A2
						190.747	95 A3
						196.715	98 A1

ANEXO A.13 - Tempo estimado(quilometragem) até a falha para as pastilhas de freio do eixo traseiro roda lado direito

Aplicação real						Simulação	
Severo		Misto		Rodoviário			
122.581	S1	454.988	M1	630.455	R1	107.195	100 A3
265.865	S10	556.412	M10	408.500	R10	124.675	100 A2
284.294	S11	259.091	M11	436.136	R11	139.891	101 A3
195.169	S12	199.000	M12	320.185	R12	141.172	95 A1
410.718	S13	167.364	M13	361.667	R2	145.653	100 A1
177.265	S14	413.078	M2	497.167	R3	173.796	95 A3
96.941	S2	593.457	M3	906.818	R4	186.475	97 A1
106.346	S3	360.669	M4	475.000	R5	191.588	97 A2
180.500	S4	376.122	M5	545.000	R6	202.375	101 A2
141.162	S5	234.138	M6	544.091	R7	215.784	94 A1
160.078	S6	170.000	M7	928.077	R8	221.881	96 A2
313.147	S7	170.882	M8	777.813	R9	254.582	94 A2
185.107	S8	327.629	M9			255.729	98 A1
120.577	S9					275.134	96 A3
						275.795	96 A1
						282.936	94 A3

ANEXO A.14 - Tempo estimado(quilometragem) até a falha para as pastilhas de freio do eixo traseiro roda lado esquerdo

Aplicação real						Simulação	
Severo		Misto		Rodoviário			
84.444	S1	539.543	M1	730.000	R1	126.423	100 A2
99.586	S2	645.438	M10	680.833	R10	132.848	100 A1
101.129	S9	237.500	M11	479.750	R11	147.552	101 A3
106.346	S3	199.000	M12	360.208	R12	109.331	100 A3
106.718	S6	197.794	M13	606.324	R2	158.404	95 A1
134.721	S14	492.517	M2	596.600	R3	177.813	95 A3
165.138	S4	357.596	M3	831.250	R4	184.346	97 A2
165.143	S12	310.343	M4	522.500	R5	193.860	96 A2
202.286	S8	383.958	M5	609.118	R6	194.304	97 A1
284.294	S11	249.300	M6	460.385	R7	204.996	94 A3
304.236	S13	170.000	M7	928.077	R8	208.942	101 A2
313.147	S7	170.882	M8	691.389	R9	212.743	94 A1
404.115	S10	250.950	M9			233.675	96 A3
445.075	S5					237.025	94 A2
						237.792	96 A1
						275.401	98 A1