



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia Automotiva**

**CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DO TESTE DE  
DURABILIDADE DE UM CAMINHÃO LEVE EM UMA  
MONTADORA DE VEÍCULOS**

**Autor: Leandro Fernandes Lins de Vasconcelos  
Orientador: Saleh Barbosa Khalil  
Co-Orientador: Henrique Gomes de Moura**

**Brasília, DF  
2017**



**LEANDRO FERNANDES LINS DE VASCONCELOS**

**TÍTULO: CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DO TESTE DE DURABILIDADE DE UM CAMINHÃO LEVE EM UMA MONTADORA DE VEÍCULOS**

Monografia submetida ao curso de graduação em engenharia automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: (MSc, Saleh Barbosa Khalil)

Co-Orientador: (DSc, Henrique Gomes de Moura)

**Brasília, DF  
2017**

## **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Fernandes Lins de Vasconcelos, Leandro.

Caracterização e análise do teste de durabilidade de um caminhão leve em uma montadora de veículos: Teste de durabilidade / Leandro Fernandes Lins de Vasconcelos. Brasília: UnB, 2017. 46 p.: il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2016. Orientação: Saleh Barbosa Khalil.

1. Teste de durabilidade. 2. Teste de degradação. 3. MCC. I. Khalil, Saleh. II. Caracterização e análise do teste de durabilidade de um caminhão leve em uma montadora de veículos.

CDU Classificação



**Caracterização e análise do teste de durabilidade de um caminhão leve em uma montadora de veículos**

**Leandro Fernandes Lins de Vasconcelos**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 2017 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. MSc. Saleh Barbosa Khalil, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof. DSc. Henrique Gomes de Moura, UnB/ FGA**  
Co-Orientador

---

**Prof. DSc. Suzana Ávila, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

---

**Prof. DSc. Evandro Leonardo Silva Teixeira, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2017

Dedico este trabalho à Deus, que nos criou.  
Aos meus professores pela paciência na  
orientação. A minha família e à minha noiva.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus por me abençoar com a possibilidade de fazer este TCC. Agradeço também à minha família pelo suporte dado a mim, principalmente à minha mãe por acreditar e me apoiar sempre. À minha noiva Larissa, pela dedicação e incentivo. Aos meus orientadores Prof. Saleh e Prof. Henrique, por me repassar seus conhecimentos, tão necessários para realização desse trabalho. Sou grato também ao gerente da empresa onde desempenhei estágio, Henrique Steckelberg, por abrir as portas do Depto. de Engenharia e por me ter dado toda a liberdade para o desenvolvimento do trabalho. E por fim, agradeço aos meus colegas de trabalho por me ajudarem nesta jornada.

“O pessimista reclama do vento. O otimista espera que ele mude. O sábio ajusta as velas” - John Calvin Maxwell.

## RESUMO

Este trabalho aborda um tópico bastante relevante na indústria automobilística: testes de durabilidade. Os testes são realizados por montadoras que buscam atender aos parâmetros normativos específicos de emissões de poluentes e de segurança, além de buscarem maior aceitação no mercado, o que torna o veículo mais competitivo. Com a aquisição dos dados dos veículos testados e utilizando-se de ferramentas estatísticas e análises de desgastes, é possível determinar de maneira mais precisa os componentes mecânicos que irão compor o veículo. Outro fator que os testes permitem é o de prever o período para execução de manutenções preventivas. Foram feitos testes de durabilidade nos pneus de caminhões-protótipo da montadora. Possibilitando através destes, analisar o desgaste ocasionado pelo percurso, entre outras condições de uso. Os testes são importantes principalmente para determinar a periodicidade de substituição/manutenção dos pneus. Estes últimos foram analisados através de estimativas de falha pelo teste de degradação, sendo possível encontrar com um intervalo de confiança, o tempo necessário para o item falhar e desta forma projetar sua vida útil.

**Palavras-chave:** teste de durabilidade, teste de degradação, confiabilidade.



## ABSTRACT

This paper aims to analyze a very important topic in the automotive industry: durability tests. The tests are performed by automakers that are seeking to obey specific laws about pollutant emissions and automobile safety. Besides that, the automakers seek for greater market acceptance. Through data acquisition and using statistical tools and degradation testing methods, it is possible to determine accurately the mechanical components of the vehicle. The tests also allow to predict the time interval needed to perform preventive maintenances. Durability tests were performed on the prototype trucks tires. Because of the tests it was possible to analyze the wear occasioned by the route, and other conditions of use. The tests are especially important because they help to determine the periodicity of tire replacement / maintenance. These components were analyzed through failure estimating by degradation test methods, being able to find with a confident interval, the time necessary for the item to fail and that way design the component's lifetime.

**Keywords:** durability tests, degradation testing, reliability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Curva Banheira.....	21
Figura 2: Função de probabilidade acumulada .....	23
Figura 3: Função confiabilidade $R(t)$ .....	24
Figura 4: Variação do parâmetro de forma.....	26
Figura 5: Variação do parâmetro de escala .....	27
Figura 6: Gráfico de <i>Hazard Plotting</i> .....	35
Figura 7: Tipos de estrutura de pneus .....	40
Figura 8: Componentes do pneu radial .....	40
Figura 9: Frenagem de 100 km/h para 60 km/h .....	41
Figura 10: Alinhamento divergente e convergente.....	43
Figura 11: Desgaste da banda de rodagem devido ao desalinhamento das rodas.....	44
Figura 12: Ângulo de impulso .....	44
Figura 13: Ângulo entre as rodas .....	44
Figura 14: Ângulo de deriva .....	45
Figura 15: Ângulo de câmbor e forças atuantes .....	45
Figura 16: Ângulo de câster .....	46
Figura 17: Coeficiente de atrito em diferentes velocidades.....	47
Figura 18: Coeficiente de atrito.....	47
Figura 19: Atrito das borrachas .....	48
Figura 20: Zonas de contato e escorregamento e região de atrito.....	48
Figura 21: A) Cargas compostas por galões de água e B) Carga de sucata de aço prensado.....	50
Figura 22: A) Catraca e cinta. B) Lona.....	50
Figura 23: Pneus dos fabricantes Continental® e Pirelli® respectivamente.....	52
Figura 24: A) Procedimento de medição e B) DOT do pneu .....	53
Figura 25: Fluxograma da análise.....	55
Figura 26: Reta obtida por aproximação com equação de 1° grau.....	63
Figura 27: Curva obtida por aproximação com equação de 2° grau. ....	63
Figura 28: Curva obtida por aproximação com equação de 3° Grau.....	64
Figura 29: Programa elaborado para aproximação pelo "caminho inverso": substituição dos coeficientes e análise dos valores de Y. ....	64
Figura 30: Probabilidade da durabilidade dos pneus Pirelli® .....	73
Figura 31: Probabilidade da durabilidade dos pneus Continental® .....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplo de <i>Hazard Plotting</i> .....	34
Tabela 2: Esquemático das rotas percorridas pelos caminhões .....	51
Tabela 3: Valores do tempo de falha dos testes de desgastes do pneu .....	57
Tabela 4: Medição dos sulcos dos pneus Pirelli® .....	58
Tabela 5: Medição dos sulcos dos pneus Continental® .....	58
Tabela 6: Valores dos coeficientes das equações de aproximação.....	62
Tabela 7: Quilometragem da falha .....	65
Tabela 8: Tempo para falha de acordo com o teste de degradação.....	65
Tabela 9: Tratamento dos dados por <i>Hazard Plotting</i> para teste de desgaste de pneus .....	66
Tabela 10: Valores dos parâmetros da distribuição <i>Weibull</i> para os testes de desgaste de pneus Pirelli®.....	66
Tabela 11: Valores dos coeficientes das equações de aproximação para pneus Continental® .....	67
Tabela 12: Quilometragem da falha para pneus Continental® .....	67
Tabela 13: Tempo para falha de acordo com o teste de degradação para pneus Continental® .....	68
Tabela 14: Tratamento dos dados por <i>Hazard Plotting</i> para teste de desgaste de pneus Continental®.....	68
Tabela 15: Valores dos parâmetros da distribuição <i>Weibull</i> para os testes de desgaste de pneus Continental® .....	69
Tabela 16: Valor Crítico .....	74

## LISTA DE SIGLAS

ISO: *International Organization for Standardization*

NBR: Normas Brasileiras

ABNT: Associação Brasileiras de Normas Técnicas

f.d.p.: Função Densidade de Probabilidade

TMEF: Tempo Médio Entre Falha

TPF: Tempo para Falha

DENATRAN: Departamento Nacional de Trânsito

RENAVAM: Registro Nacional de Veículo Automotores

CONTRAN: Conselho Nacional de Trânsito

DOT: *Department of Transportation* (Departamento de Transportes - EUA)

TWI: *Tread Wear Indicator* (Indicador de Desgaste da Banda de Rodagem)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 Considerações gerais e contextualização .....	14
1.2 Objetivos do trabalho.....	16
1.3 Metodologia .....	16
1.4 Justificativa .....	16
1.5 Estrutura do trabalho .....	18
<b>2 Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>19</b>
2.1 Conceitos de testes .....	19
2.2 Teste de durabilidade .....	19
2.3 Vida útil.....	20
2.4 Falhas de componentes .....	21
2.5 Confiabilidade.....	22
2.6 Tempo para falha .....	24
2.7 Distribuição <i>Weibull</i> .....	25
2.8 Métodos do mínimos quadrados .....	28
2.9 Teste de degradação.....	30
2.10 Estimativa de parâmetros .....	32
2.10.1 Estimativa de Máxima Verossimilhança .....	33
2.10.2 <i>Hazard Plotting</i> .....	33
2.11 Definições e normas.....	35
2.11.1 Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT - NBR) .....	36
2.11.1 Resolução N°558/80 do CONTRAN.....	36
<b>3 Pneus.....</b>	<b>39</b>
3.1 Importância.....	39
3.2 Composição dos pneus .....	39
3.3 Profundidade do sulco do pneu .....	41
3.4 Desgaste do pneu .....	41
3.5 Influência da textura dos pavimentos no desgaste dos pneus .....	41
3.6 Influência da pressão e da carga no desgaste dos pneus.....	42
3.7 Influência da velocidade do veículo no desgaste dos pneus .....	42
3.8 Comportamento dinâmico.....	43
3.8.1 Alinhamento das rodas .....	43
3.8.2 Ângulo de impulso.....	44
3.8.3 Ângulo de Set-Back .....	44
3.8.4 Ângulo de deriva .....	45
3.8.5 Ângulo de câmbor .....	45
3.8.6 Ângulo de câster .....	46
3.9 Atrito .....	46
<b>4 Estudo de caso.....</b>	<b>49</b>
4.1 Protótipo .....	49
4.2 Cargas .....	49
4.3 Rotas de testes.....	50
4.3.1 Rota <i>Highway</i> .....	51
4.3.2 Rota <i>Extra Urban</i> .....	51
4.3.3 Rota <i>Heavy Urban</i> .....	52
4.3.4 Rota <i>Door to Door</i> .....	52

4.4 Dados Coletados nos Testes.....	52
<b>5 Análise de falha.....</b>	<b>55</b>
5.1 Exposição de dados .....	57
5.2 Tratamentos dos dados .....	58
5.2.1 Fabricante Pirelli®.....	61
5.2.2 Fabricante Continental® .....	67
<b>6 Resultados e Discussões .....</b>	<b>71</b>
<b>7 Considerações Finais e Trabalhos Futuros .....</b>	<b>77</b>
<b>Referência Bibliográfica .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>81</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Considerações gerais e contextualização**

No setor automobilístico mundial, a concorrência está cada vez mais acirrada e um dos fatores para sucesso é a rapidez em desenvolver novos veículos, que atendam a necessidade específica do mercado onde o mesmo será comercializado. Na indústria automobilística nacional não é diferente, a situação indica que o setor brasileiro está muito competitivo e continua atraindo novos concorrentes (Souza, 2013).

O mercado automobilístico brasileiro posiciona-se entre os maiores do mundo: o Brasil representa o 4º maior mercado e 6º maior fabricante de veículos do mundo (Anuário da Indústria Automobilística Brasileira, 2010). A indústria automobilística gera grandes quantidades de empregos, geralmente demandando alta qualificação dos profissionais e dessa forma as remunerações serão compatíveis ao nível exigido. Segundo o Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (2010) aponta que somente as montadoras empregam aproximadamente 145 mil trabalhadores diretos em todo o território nacional.

Com a crescente preocupação com o meio ambiente, assim como a segurança dos ocupantes, as empresas devem oferecer produtos que atendam e superem as expectativas dos consumidores e devem se adequar as regulamentações impostas pelo governo (Neto, 2010).

Os processos de desenvolvimento de novos produtos ou de melhoria dos já existentes. Neto (2010) destaca que a validação do processo de desenvolvimento de um veículo consiste em realizar diversos testes, seja em laboratório ou em pista de rodagem, para estabelecer se as peças que compõem o veículo atendem aos requisitos de projeto e especificações de engenharia e do governo.

“A fase de validação demanda a produção de peças protótipo e dispositivos consumindo tempo considerável e exigindo um alto investimento. Para a validação de um sistema, subsistema, ou peça é muitas vezes necessário até a construção de veículos completos, principalmente quando se trata de partes do chassi. É necessária também a utilização de equipamentos complexos, instrumentações

específicas e outros recursos que permitam simular, observar e mensurar as condições reais de uso do veículo, verificando-se o desempenho, durabilidade e confiabilidade de cada um de seus componentes. ” (Neto, 2010: p.18).

Partindo da concepção de Neto (2010), da importância da realização de testes para validação de novos produtos no mercado, este trabalho tem por objetivo analisar de forma estatística a durabilidade dos pneus testado por uma montadora. E com a metodologia mostrada por esse trabalho, será possível auxiliar a empresa na tomada de decisão e reduzir custos e o tempo de desenvolvimento do veículo.

O teste de durabilidade é uma ferramenta muito utilizada na indústria automobilística, segundo Magalhães (2010) os testes de durabilidade tornaram-se prioridade para as indústrias. E por se tratar da indústria automobilística e sua importância para o país, os testes se tornam essenciais. Esses testes são utilizados também para simular o tempo de garantia que o fabricante assegurará aos clientes, informando quando deve ser realizadas as manutenções preventivas ou trocas de certos componentes.

Os pneus possuem um papel importante como item de segurança e conforto, essenciais na condução de veículos. Ao longo de sua utilização o pneu sofre desgaste, principalmente na sua banda de rodagem. Portanto, é essencial que os pneus passem por testes de durabilidade em diferentes rotas e velocidades, para verificar o nível de desgaste dos pneus antes do veículo ir para o mercado consumidor, pois obtendo o nível de desgaste a empresa pode programar as manutenções preventivas durante o período de garantia que a empresa se responsabiliza pelo veículo.

“É usual utilizar testes que consistem em veículos equipados com pneus do composto em estudo que percorrem um trajeto determinado...” (Cardoso, 2010: p.1). Nesse trabalho foi utilizada essa mesma perspectiva, para a realização dos testes de durabilidade foram colocados seis pneus do fabricante Pirelli® em um caminhão e seis pneus do fabricante Continental® em outro caminhão e realizados diferentes percursos para que os pneus sofressem desgastes de forma mais fiel à utilização do futuro proprietário.

Com os dados obtidos nos testes de durabilidade, este trabalho vem propor uma ferramenta estatística de análise dos desgastes dos pneus. Obtendo uma estimativa de confiabilidade dos componentes testados.



## **1.2. Objetivos do trabalho**

Demonstrar uma metodologia de análise para os testes de durabilidade realizados na montadora. Utilizando para isso, ferramentas estatísticas que constituem um método que auxilia na seleção do melhor componente para o projeto do veículo e como permite prever resultados, possibilita reduzir o tempo de teste.

- Levantamento de dados dos testes realizados pela empresa parceira;
- Estimar a vida útil dos pneus testados nos testes de durabilidade;
- Demonstrar a confiabilidade dos pneus;
- Propor melhoria nos testes de durabilidade realizados pela montadora.

## **1.3. Metodologia**

A metodologia utilizada envolveu o acompanhamento dos testes de durabilidade em uma montadora de veículos, coleta de dados e desenvolvimento de análise teórica dos dados coletados. Para isso utilizou-se a ferramenta Teste de Degradação, a fim de analisar a degradações dos pneus e analisar o tempo médio de vida dos componentes testados nos caminhões.

## **1.4. Justificativa**

A realização deste trabalho foi motivada pela participação nos testes realizados pela montadora e por não ser observado no período em que ocorreram os testes, um critério de avaliação matemático que pudesse auxiliar na análise dos componentes. Para a realização dos testes de durabilidade foram utilizados dois caminhões, o primeiro equipado com seis pneus do fabricante Pirelli® e o segundo seis pneus do fabricante Continental®.

Com a necessidade das montadoras de veículos de testarem os seus produtos internamente e de forma controlada simulando as possíveis utilizações dos clientes, surgem os Testes de Durabilidade como uma ferramenta capaz de demonstrar a confiabilidade dos produtos de forma experimental. Atualmente é possível realizar análises em software CAD o que torna essa análise mais barata.

“Por mais que possa se simular em computadores e hoje há programas e equipamentos poderosíssimos para isso, não

há como substituir a emoção e a sensibilidade de se dirigir um veículo ou sentir suas vibrações através de nosso próprio corpo e é isso o que o cliente vai sentir! Muito já se fez para se aproximar disto e muito tempo tem sido economizado através de simulações, mas a fase experimental ainda é fundamental e necessária. ” (Leite, 2007: p.197).

Por mais que se possa reduzir custos com as simulações, os testes experimentais são primordiais e esses testes são de suma importância para o desenvolvimento do projeto e para a empresa que necessita obter resultados reais e com um protótipo que possa simular a utilização do veículo em diversas situações de serviço (Souza, 2013).

Os testes com protótipos são essenciais para a montadora no desenvolvimento dos veículos, mas também são projetos que estão associados a um alto custo de realização. Então, uma boa ferramenta para analisar esses testes se torna de grande importância para o fabricante (Souza, 2013).

Neto (2010) em seu trabalho aborda o projeto de rodas, desde a fase conceitual até a execução de testes de durabilidade, cita os procedimentos utilizados.

1. Estabelecimento dos dados preliminares e condições de contorno;
2. Projeto da roda realizado pelo fornecedor;
3. Determinação do material;
4. Construção de protótipos pelos fornecedores;
5. Aprovação das rodas com base nos testes em laboratório;
6. Teste dinâmicos de durabilidade realizados durante o teste de durabilidade.

Pode-se notar, portanto, a importância da utilização de Testes de Durabilidade, na validação de projetos. No caso deste trabalho, os projetos desenvolvidos pelos fornecedores de pneu para os caminhões da montadora de veículos. Assim, o tema foi motivado a partir das seguintes constatações:

- A importância da indústria automotiva no Brasil;
- A crescente concorrência entre fabricantes;
- Desenvolvimento e análise de novos produtos;

- Nacionalização dos componentes.

Desta forma, este trabalho propõe um método para a análise e definição dos componentes desejados pela montadora. Com a utilização de ferramentas estatísticas é possível reduzir o tempo de duração dos futuros testes.

### 1.5. Estrutura do trabalho

O texto deste trabalho foi organizado em seis capítulos. Nos itens a seguir é apresentada uma breve descrição de cada capítulo, no intuito de fornecer ao leitor uma breve ideia dos capítulos.

O **Capítulo 1** traz a introdução com uma breve contextualização sobre o estado da arte do tema escolhido. Além da justificativa para a elaboração do trabalho, os objetivos, metodologia.

No **Capítulo 2**, está a revisão bibliográfica e também são apresentadas as definições e normas que regem os testes de durabilidade.

O **Capítulo 3**, está o estudo sobre pneus, onde é apresentado as suas características e como é o processo de desgaste dos pneus.

Já o **Capítulo 4**, traz o estudo de caso desenvolvido na montadora de veículos, em que foram coletados os dados dos testes em questão.

No **Capítulo 5**, estão dispostas as análises sobre os testes realizados.

O **Capítulo 6** contém os resultados e discussões das análises dos testes de durabilidade.

O **Capítulo 7** é composto pelas considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

E finalmente as referências bibliográficas utilizadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão descritos os conceitos teóricos relacionados aos itens previamente comentados no capítulo 1. Serão abordados os tópicos necessários para análise dos componentes em estudo.

### 2.1. Conceito de teste

Mialhe (1996) define que testes na engenharia são a simples verificação expedida referente a respostas à comandos, inspeções, entre outros. Já para França (2007), a resolução de problemas de engenharia envolve dois métodos distintos, sendo eles o método teórico e o método experimental. O método experimental requer o uso de instrumentos e o conhecimento da forma mais adequada de sua aplicação e seus aparatos experimentais.

De acordo com Mialhe (1996), são várias as fontes supridoras de dados para a tomada de decisão, dentre elas: ensaios, levantamentos e registros. Lida (2005) afirma que os experimentos de campo são efetuados a fim de verificar o comportamento do projeto em condições reais de uso.

### 2.2. Teste de durabilidade

Um dos principais problemas enfrentados pelas montadoras e que requer muito esforço e gastos extras são os *recalls*. Em fevereiro de 2000, a rede de televisão Khou, de Houston, fez uma reportagem sobre uma série de processos legais pouco conhecidos relacionados à segurança veicular. Os processos sugeriam que os pneus Firestone que explodiam nos utilitários Ford Explorer tinham causado cerca de 30 mortes devido a capotagens. Em agosto, um mês antes do início das audiências no senado americano sobre a segurança dos pneus, a Firestone reconheceu o problema e deu início a um *recall* de 6,5 milhões de pneus, o maior *recall* de segurança veicular da história (Slywotzky & Weber, 2007).

A durabilidade, segundo a norma ISO 13823 (2008) “é a capacidade de uma estrutura ou de seus componentes de satisfazer, com dada manutenção planejada, os requisitos de desempenho do projeto, por um período específico de tempo”.

Magalhães (2011) comenta que a realização dos testes de durabilidade tornou-se prioridade para as indústrias automotivas no sentido de oferecer maior segurança aos seus clientes.

A indústria automobilística utiliza o teste de durabilidade para avaliar muitos componentes, como por exemplo, conjuntos de embreagens (Brazolin, 2010).

Nas montadoras, os testes de durabilidade são utilizados ainda para simular o período em que a empresa se responsabiliza pelo seu produto (garantia). Com esse propósito, a empresa pode se defender em casos que o proprietário não seguiu corretamente os procedimentos de manutenção preventiva e favoreceu o desgaste precoce de componentes gerando danos e até mesmo perda total do próprio veículo.

Para determinar um período de manutenção ou garantia, deve-se obter a vida útil dos componentes. Nesse aspecto a durabilidade pode ser observada quanto às condições de utilização impostas durante a vida útil, que é o caso que será analisado por esse trabalho, mais especificamente avaliar a vida útil dos componentes a partir dos seus desgastes.

### **2.3. Vida Útil**

De maneira geral, vida útil consiste em mensurar a expectativa de duração de uma estrutura ou suas partes, dentro de limites de projeto admissíveis, durante seu ciclo de vida, sendo definida pela ISO 13823 (2008) como “o período efetivo de tempo durante o qual uma estrutura ou qualquer de seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo”. De forma mais simples a NBR 15575 (2013) define vida útil como “uma medida temporal da durabilidade de um edifício ou de suas partes”.

O conceito de durabilidade associa-se diretamente à vida útil. Refere-se às características dos materiais e/ou componentes, às condições de exposição e às condições de utilização impostas durante a vida útil. Para Mehta e Monteiro (2008) “uma vida útil longa é considerada sinônimo de durabilidade”. Enfim, a vida útil é o período de tempo compreendido entre o início de operação e uso de um componente até o momento em que o seu desempenho deixa de atender às exigências do usuário, sendo diretamente influenciada pelas atividades de manutenção e uso (Torell & Avelar, 2004).

## 2.4. Falha de componentes

A crescente demanda por desempenho e qualidade associada a uma maior eficiência econômica e ambiental têm tornado os sistemas de detecção, diagnóstico e correção de falhas cada vez mais importante para os processos industriais (Sartori et. all, 2012).

Existem várias definições para falha, dentre elas a diferença entre *fault* e *failure*. Para Himmelblau (1978) *failure* é considerada como uma completa inoperabilidade do equipamento ou processo e *fault* é uma degradação do desempenho, mas não será necessariamente uma *failure*.

Gertler (1988) utiliza *fault* e *failure* como sinônimos, se referindo a situações, condições e eventos onde “algo está errado no sistema”, embora o primeiro é um problema tolerável, enquanto o segundo sugere uma parada completa.

Em 1994, a ABNT reconheceu as diferenças entre as traduções de *fault* e *failure*. A primeira foi definida como “pane” e a segunda como “falha”.

Dadas as definições de *fault* e *failure*, é possível observar que neste trabalho as falhas observadas trataram-se de *faults*, pois mesmo após constatadas as “panes” nos pneus, os mesmos continuaram a operar sem que houvesse término de sua capacidade de desempenhar a função. E para analisar essas falhas é necessário utilizar ferramentas estatísticas da confiabilidade.

A taxa de falha é um indicador das causas de falha. A curva banheira (“*bathtub curve*”), mostrada na Figura 1, representa a relação de falha para componentes.

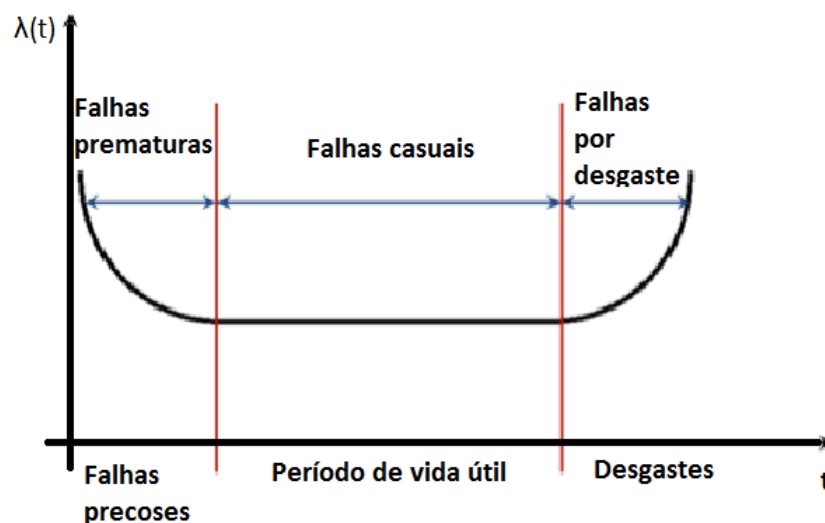


Figura 1: Curva banheira. (Lafraia, 2001).

Segundo Souza (2003) a taxa de falha  $\lambda(t)$  pode ser definida em termos da própria confiabilidade.

## 2.5. Confiabilidade

Lewis (1996) comenta que por motivos como o aumento da complexidade e sofisticação dos sistemas, conscientização dos consumidores e exigências de qualidade do produto, surgimento de leis regulamentadoras responsabilizando os fabricantes com relação aos seus produtos, a confiabilidade se tornou uma importante ferramenta para auxiliar a cumprir tais exigências.

Segundo Lafraia (2001, p.6) os primeiros estudos de análise de confiabilidade, começaram na Primeira Guerra Mundial, com Henley e Kumamoto. Já no Brasil, nos anos 70, a Universidade Federal de Santa Catarina, já tinha no curso de pós-graduação em engenharia elétrica a disciplina “Confiabilidade aplicada a sistemas de potência”.

Para Borges et. al. (1996, p.2) “confiabilidade de um produto é a probabilidade de bom funcionamento do mesmo durante período de tempo e condições de uso especificado”.

Segundo a norma NBR-5462 ABNT (1994), confiabilidade significa “a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”.

A confiabilidade é um fator-chave em muitas decisões de compra, e vários dos requisitos para obtenção da qualidade do produto ou serviço são também aplicáveis à confiabilidade, afirmou Oakland (1994, p.16).

Confiabilidade ou função confiabilidade caracteriza-se por uma variável contínua ( $X$ ). A função densidade de probabilidade ( $f_{dp}$ ) de  $X$  é uma  $f(x)$ , tal que para dois números reais  $a$  e  $b$ , com  $a \leq b$ , tem-se o descrito pela Equação 1, como definido na obra *Accelerated Testing* de Dodson & Schwab (1962):

$$P(a < x \leq b) = \int_a^b f(x).dx \quad (1)$$

De acordo com Lopes (2001), a melhoria da confiabilidade é sem dúvida um dos aspectos mais importantes de um programa de melhoria de qualidade. A empresa deverá realizar diversas tarefas destinada à avaliação do desempenho do produto, o que se costuma chamar de análise de confiabilidade.

O tempo até que ocorra a falha será a variável aleatória  $t$ , correspondente a função densidade de probabilidade ( $fdp$ ) de ocorrência de falha  $f(t)$ , tem-se que a probabilidade de falha, em um intervalo de tempo específico, pode ser definida pela relação:

$$f(t)\Delta t = P\{t < \mathbf{t} < t + \Delta t\} \quad (2)$$

Sendo  $F(t)$  a função de distribuição acumulada, vem:

$$F(t) = P\{\mathbf{t} < t\} \quad (3)$$

Ou seja,  $F(t)$  expressa a probabilidade de ocorrer falha até um tempo  $t$ .

$F(t)$  será uma função crescente com o tempo, que atinge o valor unitário quando  $t$  tende a infinito, conforme a Figura 2.

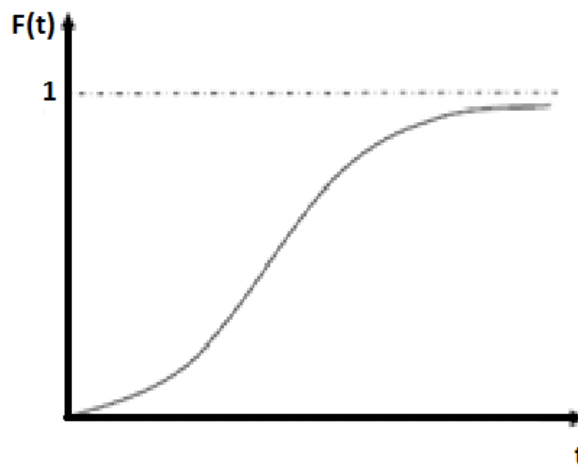


Figura 2: Função de probabilidade acumulada  $F(t)$ . (Leitch, 1995).

A função confiabilidade  $R(t)$ , pode ser expressa pela relação:

$$R(t) = P\{\mathbf{t} > t\} \quad (4)$$

Ou seja,

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (5)$$



Que é apresentada na Figura 3.

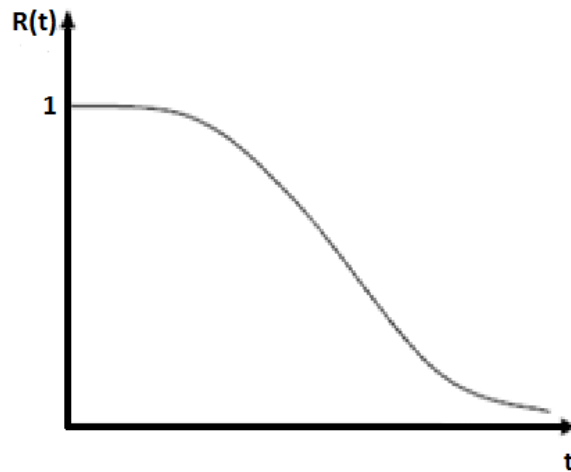


Figura 3: Função confiabilidade  $R(t)$ . (Leitch, 1995).

Pode ser observado que a confiabilidade de um produto decai ao longo do tempo, ou seja, quanto maior o tempo maior será a probabilidade que o item apresente falha.

## 2.6. Tempo para falha

A análise de tempo de falha é a análise de dados de durabilidade provenientes de campo e de testes de vida acelerados, para se obter parâmetros de interesse, tais como o tempo médio até a falha, a fração esperada de falhas no período de garantia, entre outros (Freitas e Colosimo 1997, p. 65).

Segundo Billinton e Allan (1987), todos os componentes falharão em diferentes tempos no futuro, pois esses tempos de falha obedecem a distribuição de probabilidade que podem ou não ser conhecidas, e que descrevem a probabilidade de um item falhar ou a sobrevivência em um determinado intervalo de tempo.

O TMEF ou Tempo Médio Entre Falhas é uma medida básica da confiabilidade de um sistema, geralmente medido em horas (Torell & Avelar, 2004, p.5). Quanto mais alto o valor do TMEF, mais confiável será o produto (Torell & Avelar, 2004, p.5).

Para realizar a análise dos dados coletados foi utilizado o TPF (Tempo Para Falha), pois os componentes avaliados no trabalho, não foram substituídos após a falha. O Tempo Médio Entre Falha (TMEF) significa que, em média, uma falha ocorre a cada “X” horas.

## 2.7. Distribuição *Weibull*

Para Freitas e Colosimo (1997), os modelos probabilísticos são caracterizados por valores, parâmetros, tais como de forma, escala e posicionamento no caso da distribuição *Weibull*, que conferem a identidade do comportamento da distribuição dos dados em análise, sendo então possível responder às perguntas de interesse.

A distribuição *Weibull*, é uma expressão semi-empírica desenvolvida por Ernest Hjalma Wallodi Weibull, que pode representar falhas típicas de partidas, falhas aleatórias e falhas devido aos desgastes. A partir desta distribuição, é possível obter parâmetros significativos da configuração das falhas (Benck et. al, 2008).

A distribuição *Weibull* pode ser usada também para determinar o modelo de tempo de falha, tempo de reparo e resistência do material (Dodson & Schwab, 1962).

Uma distribuição é definida matematicamente por sua equação de *f.d.p.* Existem outras formas de parametrizar a distribuição *Weibull*, mas a expressão mais geral da *f.d.p.* é a da distribuição *Weibull* de três parâmetros, conforme a Equação 13 (Dodson & Schwab, 1962).

$$f(x) = \frac{\beta}{\theta} \left( \frac{x-\delta}{\theta} \right)^{(\beta-1)} e^{-\left[ \left( \frac{x-\delta}{\theta} \right) \right]^\beta}, \quad x \geq \delta \quad (13)$$

Em que  $\beta$  é um parâmetro de forma conhecido como inclinação da distribuição,  $\theta$  é o parâmetro de escala e  $\delta$  o parâmetro de posição (Dodson & Schwab, 1962).

O parâmetro de forma ( $\beta$ ) torna a distribuição *Weibull* flexível, pois para cada valor a distribuição toma outras formas. Para  $\beta=1$  a distribuição *Weibull* será idêntica a distribuição exponencial, se  $\beta=2$  a curva se torna a distribuição *Rayleigh* e quando  $\beta$  estiver entre 3 e 4, a distribuição *Weibull* se comporta como a distribuição normal, conforme a Figura 4.

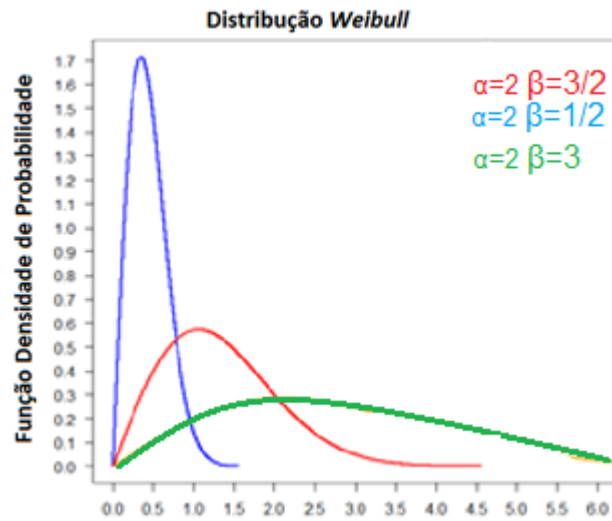


Figura 4. Variação do parâmetro de forma. Fonte: Internet – *Portal Action*.

O parâmetro de forma na distribuição *Weibull* indica se a taxa de falha aumenta ou diminui com o tempo, se  $\beta < 1$  a taxa de falha diminui com o tempo, se  $\beta$  está próximo ou igual a 1, a distribuição tem uma taxa de falha razoavelmente constante, indicando o tempo de vida útil do componente ou de falhas aleatórias. Para  $\beta > 1$  a taxa de falhas aumenta com o tempo (Dodson & Schwab, 1962).

Já a variação do parâmetro de escala  $\theta$  tem o efeito de alongar a distribuição *Weibull*, desde que  $\beta$  permaneça constante, conforme apresenta o gráfico da Figura 5. Se  $\theta$  é aumentado, enquanto  $\beta$  e  $\delta$  são mantidos constantes, a distribuição começa a se estender, esticar para direita e sua altura diminui, ao manter sua forma e posição. Porém se o  $\theta$  é diminuído enquanto  $\beta$  e  $\delta$  são mantidos constantes, a distribuição começa se estreitar, para esquerda e aumenta a sua altura (Dodson & Schwab, 1962).

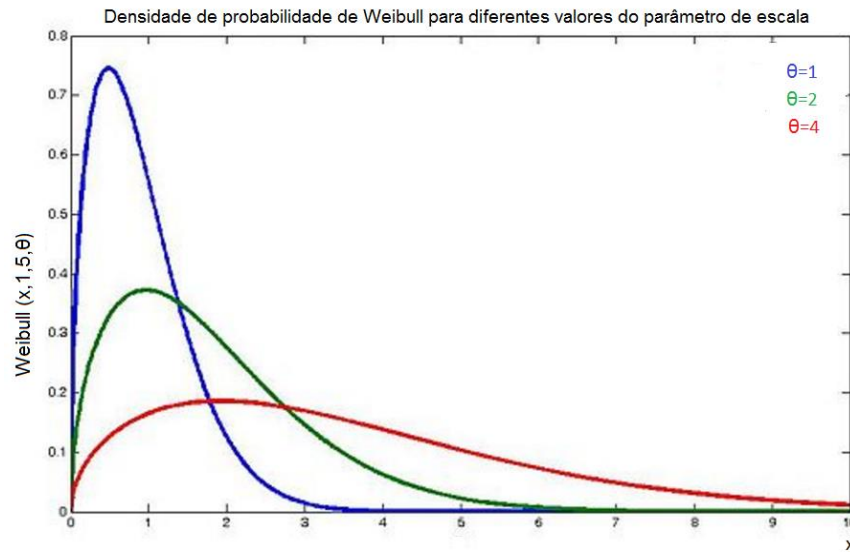


Figura 5. Variação do parâmetro de escala. Fonte: Internet – *Wikipedia*.

A função densidade de probabilidade pode ser utilizada para se chegar a cálculos comumente usados em confiabilidade, como a função de confiabilidade, taxa de falhas, mediana e número médio de falhas. A função de probabilidade da distribuição *Weibull* é dada pela Equação 14 (Dodson & Schwab, 1962).

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x-\delta}{\theta}\right)^{\beta}} \quad (14)$$

A função taxa de falhas da distribuição *Weibull* é dada pela Equação 15.

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{x-\delta}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad (15)$$

O tempo médio de vida, é dado pela Equação 16.

$$T = \delta + \theta * \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (16)$$

Onde  $\Gamma(*)$  é a função *gamma*, que é definida pela Equação 17.

$$\Gamma(\theta) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\theta-1} dx \quad (17)$$

E a Equação 18 descreve a vida mediana, ou vida  $B_{50}$ , da distribuição *Weibull*.

$$\check{T} = \delta + \theta (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (18)$$

## 2.8. Método dos Mínimos Quadrados

O método dos mínimos quadrados é utilizado quando se tem uma distribuição de pontos e se quer ajustar a melhor curva a este conjunto de dados (Helene, 2014). Esse método ajusta a curva aos pontos e para isso pode ser verificado utilizando funções lineares, quadráticas, cúbicas que serão utilizadas nesse trabalho de conclusão de curso.

$$Y = a * X + b + \eta \quad (19)$$

Na equação 20 o “ $\eta$ ” é o erro associado e “A” é a matriz que representa os coeficientes da equação de primeiro grau.

$$Y = A * X + \eta \quad (20)$$

A equação 20 na forma matricial é apresentada na equação 21.

$$[Y] = \begin{bmatrix} a & b \\ a & b \end{bmatrix} * [X] + [\eta] \quad (21)$$

Isolando o erro associado, pode ser observada na equação 22.

$$\eta = B - \hat{A} * X \quad (22)$$

O objetivo é minimizar o “ $\eta$ ”, utilizando o método dos mínimos quadrados. Na equação 23 mostra a função dos mínimos quadrados.

$$J_{MMQ} = \xi^T * \xi \quad (23)$$

$$Y = X * \eta + \xi \quad (24)$$

$$\xi = Y - X * \eta \quad (25)$$

Substituindo a expressão encontrada para  $\xi$  na equação 23, temos a seguinte equação.

$$J_{MMQ} = (Y - X * \eta)^T * (Y - X * \eta) \quad (26)$$

Resolvendo a distributiva temos:

$$J_{MMQ} = Y^T * Y - Y^T * X * \eta - [X * \eta]^T * Y + [X * \eta]^T * X * \eta \quad (27)$$

$$J_{MMQ} = Y^T * Y - Y^T * X * \eta^T * X^T * Y + \eta^T * X^T * X * \eta \quad (28)$$

Com o encontrado na equação 28, pode-se deriva-la em função de  $Y$ . Está representado na equação 29.

$$\frac{\partial}{\partial Y} J_{MMQ} = \frac{\partial J}{\partial Y} * \frac{\partial Y}{\partial \theta} = (Y^T - \eta^T * X^T) * (X) = Y^T * X - \eta^T * X^T * X = 0 \quad (29)$$

A equação 30 demonstra que utilizando o método de mínimos quadrados o erro está contemplado na equação.

$$\eta = (X^T * X)^{-1} * X^T * Y \quad (30)$$

O erro associado é minimizado nesse tipo de análise. Como o erro já está associado não é necessário utilizar as equações 31 a 33 com o erro ( $Y = a * X + b + e$ ). Portanto para o cálculo utiliza-se as seguintes equações. Para primeiro grau está mostrada na equação 31.

$$Y = a * X + b \quad (31)$$

Para o cálculo com a equação de segundo grau pode-se empregar o mostrado na equação 32.

$$Y = a * X^2 + b * X + c \quad (32)$$

E para o grau três deve-se aplicar a equação 33.

$$Y = a * X^3 + b * X^2 + c * X + d \quad (33)$$

O método consiste em utilizar os dados coletados e aproximar uma curva onde será dado como resposta os coeficientes das equações  $(a,b,c,d)$ , para cada tipo de equação escolhida para a aproximação (Helene, 2013).

Para uma equação de 1º grau tem-se:

$$y = a * x + b \quad (34)$$

Em que  $a$  e  $b$  são os coeficientes que se deseja e  $Y$  e  $X$  são os valores coletados, pontos do gráfico. Para realização dos cálculos os valores serão transformados em matrizes. Os valores de  $x$  se tornaram matriz  $A$  e os valores de  $y$  se tornaram a matriz  $Y$  (Helene, 2013).

$$A * X = Y \quad (35)$$

Em que o  $X$  será o coeficiente da equação.

Porém como as matrizes não são quadradas é necessário fazer as seguintes operações:

$$A^T * A * X = A^T * Y \quad (36)$$

$$X = (A^T * A)^{-1} * A^T * Y \quad (37)$$

Em que o  $A^T$  é a matriz transposta de  $A$  e  $(A^T * A)^{-1}$  é a matriz inversa.

Para equações de segundo e terceiro grau repete-se os mesmos procedimentos de cálculo com apenas uma diferença, na matriz  $A$  matriz para segundo grau será da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \{Y\}$$

## 2.9. Teste de Degradação

O modelo de desempenho da degradação pode reduzir drasticamente a duração dos testes e o tamanho das amostras. Duas características do teste de degradação

permitem eficiência na duração dos testes e no tamanho da amostra. A primeira característica é que o tempo de falha é previsto com um modelo de degradação ao longo do tempo (Dodson & Schwab, 1962).

Já a segunda característica é que os métodos estatísticos usam dados contínuos a partir dos parâmetros de desempenho que degradam, ao invés de binomial e estatísticas do tipo *pass-fail*. A habilidade de prever o desempenho permite que um teste seja abortado anteriormente, caso o modelo preveja que os requisitos de confiabilidade não serão alcançados, economizando recursos (Dodson & Schwab, 1962).

O teste também pode ser interrompido precocemente caso o modelo preveja um resultado satisfatório, mas extrapolar a partir de um resultado satisfatório é mais arriscado do que extrapolar a partir de uma previsão de falha (Dodson & Schwab, 1962).

O teste de degradação é geralmente usado para deformações metálicas, iniciação de trincas, propagação de trincas, resistência à tração, resistência à tensão, corrosão, ferrugem, alongamento, queda de tensão, resistência, entre outros. A desvantagem do teste de degradação é que um modelo é exigido para a análise (Dodson & Schwab, 1962).

Pode-se exemplificar o método da seguinte forma:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1872 \\ 1 & 1890 \\ 1 & 1900 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} 9,9 \\ 14,3 \\ 17,4 \end{bmatrix}$$

Para encontrar os valores de  $a$  e  $b$  calcula-se:

$$X = (A^T * A)^{-1} * A^T * Y \quad (38)$$

O que resulta na matriz  $X$ , que são os coeficientes da equação de primeiro grau.

$$X = \begin{bmatrix} 0,2651 \\ -486 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$Y = 0,2651 * X - 486 \quad (40)$$

A Equação 40 mostra a equação completa com os coeficientes calculados.



Para realizar o teste de degradação é utilizada a análise de regressão linear, que pode ser interpolação ou extrapolação. A análise de regressão consiste na realização de uma análise estatística com o objetivo de verificar a existência de uma relação funcional entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes (Bussab e Morettin, 2015).

Shryock e Siegel (1980) definem interpolação como “a arte de inferir valores intermediários a partir de uma série de dados conhecidos, com o uso de fórmulas matemáticas ou procedimento gráficos”. Já a extrapolação é definida como “a arte de inferir valores que estão além de uma série de dados conhecidos, a partir do uso de fórmulas matemáticas ou procedimentos gráficos”. Por exemplo, se for analisado o número 4 que pertence ao intervalo  $[2,10]$ , então é feita uma interpolação, e caso for necessário analisar o valor 1 que não pertence ao intervalo  $[2,10]$ , é feita uma extrapolação.

## **2.10. Estimativa de parâmetros**

Para estimar os parâmetros da distribuição *Weibull* deve-se respeitar algumas propriedades, tal como a ausência de parcialidade. Se o valor esperado do estimador é igual ao valor verdadeiro do parâmetro, é dito que o mesmo é imparcial. O conceito de variância mínima consiste em, quanto menor a variância da estimativa, menor é o tamanho da amostra requerida para obter o nível de acuracidade desejada e mais eficiente é o estimador (Dodson & Schwab, 1962).

O estimador mais eficiente é aquele com a mínima variância. Já a propriedade consistência, define que à medida que a amostra aumenta, o valor do parâmetro estimado torna-se mais próximo ao valor verdadeiro do parâmetro. E na última propriedade, a suficiência, o estimador usa todas as informações do conjunto de dados (Dodson & Schwab, 1962).

Dodson & Schwab, apresentam em sua obra “*Accelerated Testing*” diversos métodos para a estimativa de parâmetros, os mais comumente utilizados são: a máxima estimativa de probabilidade e *Hazard Plotting*, as quais serão apresentadas no decorrer do trabalho. Para estimar os parâmetros desse trabalho foi utilizado o método de Hazard Plotting.

### 2.10.1. Estimativa de Máxima Verossimilhança

A Estimativa de Máxima Verossimilhança ou em inglês *Maximum Likelihood Estimation*, é o estimador para os parâmetros de forma, escala e de vida mínima de uma distribuição de amostragem *Weibull* em uma situação de teste truncado por número de falhas. Pode ser aplicada para a distribuição *Weibull* com dois ou três parâmetros. Quando se utiliza essa técnica na distribuição *Weibull* de três parâmetros, substitui-se o termo  $x - \delta$  por  $x$ . A Equação 41 mostra a Estimativa de Máxima Verossimilhança para a distribuição *Weibull* (Dodson & Schwab, 1962).

$$\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \ln(x_i) = \left[ \sum_{i=1}^n x_i^\beta \ln(x_i) \right] \left[ \sum_{i=1}^n x_i^\beta \right]^{-1} - \frac{1}{\beta} \quad (41)$$

$$\theta = \left[ \frac{1}{r} \sum_{i=1}^n x_i^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (42)$$

Em que  $r$  é a quantidade de falhas e  $n$  é a quantidade de dados.

### 2.10.2. Hazzard Plotting

O *Hazard Plotting* é um método que utiliza métodos gráficos para estimar os parâmetros da distribuição *Weibull*. A função cumulativa *Hazard* é transformada em uma equação linear, utilizando-se de transformação logarítmica. A inclinação e a interceptação do eixo fornecem as estimativas necessárias para os parâmetros da distribuição. A função de *Weibull Hazard* acumulativa é representada pela Equação 43 (Dodson & Schwab, 1962).

$$H(x) = -\ln[1 - F(x)] \quad (43)$$

Substituindo  $F(x)$  e reorganizando tem-se o descrito pela Equação 44.

$$\ln H(x) = \beta \ln x - \beta \ln \theta \quad (44)$$

Para plotar  $\ln [H(x)]$  versus  $\ln (x)$ , o resultado da inclinação fornece a estimativa do  $\beta$ . A interceptação do eixo  $y$  no gráfico é o valor do  $\beta \ln \theta$ . Como ainda não se sabe qual distribuição mais se aproxima aos dados, é feito o cálculo utilizando a distribuição exponencial. Então o  $\theta$  será estimado pela Equação 45.

$$\theta = \exp\left(-\frac{y_0}{\beta}\right) \quad (45)$$

Em que  $y_0$  é o ponto de intersecção com o eixo  $Y$  para o gráfico *Hazard*.

A função *Hazard*  $h(x)$  é estimada a partir do inverso da classificação das falhas ordenadas. A função *Hazard* acumulativa  $H(x)$  é acumulativa para os valores da  $h(x)$ . Quando  $\beta < 1$  a função *Hazard* diminui mais acentuada que o  $\beta$  decresce, já quando  $\beta > 1$  a taxa aumenta conforme a função *Hazard* cresce assim como  $\beta$  cresce. Se  $\beta = 2$  a função *Hazard* cresce linearmente (Dodson & Schwab, 1962).

Para exemplificar o método de *Hazard Plotting* segue os dados coletados por um experimento onde está representado os tempos para falha dos equipamentos testados, observados na Tabela 1, em que o “c” significa que o item foi retirado do teste antes de falhar.

Tabela 1: Exemplo de *Hazard Plotting*.

TPF	Rank (inv)	$h(x)$	$H(x)$	$\ln(H(x))$	$\ln(x)$
104 c	10				
122	9	0,1111	0,1111	-2,1972	4,804
138	8	0,125	0,2361	-1,4435	4,9273
167 c	7				
168	6	1667	0,4028	-0,9094	5,124
180	5	0,2	0,6028	-0,5062	5,193
217 c	4				
229	3	0,3333	0,9361	-0,066	5,4337
309 c	2				
386	1	1	1,9361	0,6607	5,9558

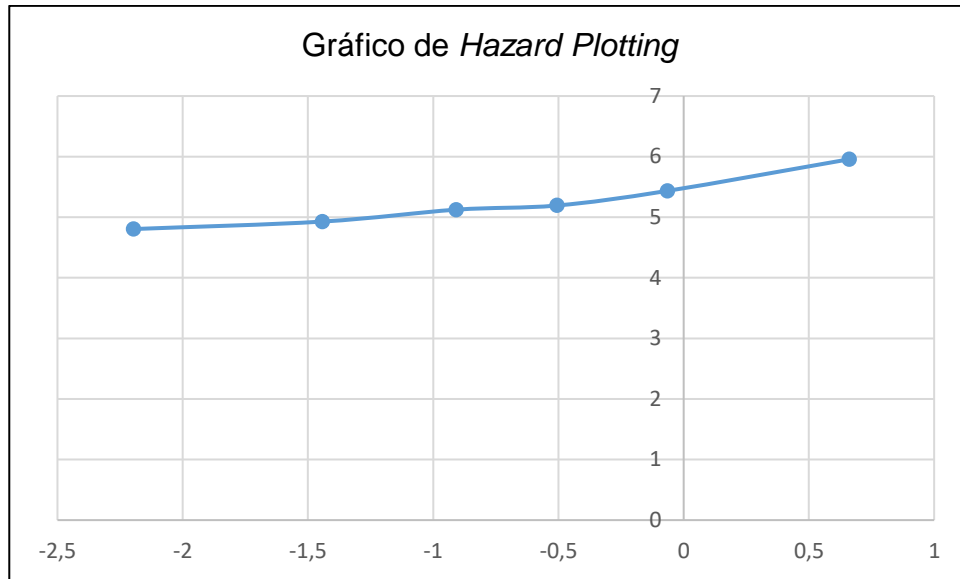


Figura 6: Gráfico de *Hazard Plotting* Fonte: O autor.

A partir dos dados obtidos através do *Hazard Plotting* é possível realizar uma regressão linear e determinar os parâmetros de *Weibull* usando  $\ln H(x) = \beta \ln x - \beta \ln \theta$ .

### 2.11. Definições e Normas

Neste capítulo são apresentadas as normas de referência para o teste de durabilidade. As especificações técnicas que os caminhões em teste devem obedecer, bem como o limite de profundidade dos sulcos dos pneus que devem ser respeitados.

Conforme o Código de Trânsito Brasileiro (CTB), caminhões são “*veículos automotores destinados ao transporte de carga, com PBT (peso bruto total) acima de 3.500 kg, podendo tracionar ou arrastar outros veículos desde que tenham capacidade máxima de tração compatível, que transporte carga superior a 1.500 kg*”. É necessário apresentar os documentos que comprovem o cumprimento da legislação dos seguintes itens: extintor de incêndio, tacógrafo e pneus. O caminhão ainda deve apresentar comprovante de conformidade com a legislação ambiental específica emitida pelo IBAMA.

De acordo com a Portaria nº 190/2009, para a homologação de caminhões é necessário realizar três níveis de controle. No primeiro nível, são avaliados os itens: flamabilidade de materiais, localização/identificação/iluminação dos controles; buzina, triângulo de segurança, trava do capuz, placa de licença e lacre, o VIN (*Vehicle Identification Number* ou Número de Identificação do Veículo) e número de identificação carroceria. No segundo nível, avalia-se os espelhos retrovisores internos e externos,

sistema de freios, vidros de segurança e para-choque traseiro. No terceiro, são avaliados itens relacionados à segurança passiva do veículo, como ancoragem dos cintos de segurança e os próprios cintos de segurança.

Para que qualquer veículo possa circular no território nacional, é necessário se submeter a uma vistoria e cumprir certas exigências para cada tipo de veículo. O órgão responsável por realizar vistorias em veículos é o DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito, utilizando-se da Portaria Nº190/2009 que estabelece os procedimentos para a concessão do código de marca/modelo/versão de veículos no Registro Nacional de Veículos Automotores RENAVAL. Além disso, essa portaria determina a emissão do Certificado de Adequação à Legislação de Trânsito – CAT.

O inciso §4, inc. IV da Portaria nº 190/2009, define que durante o processo de concessão do código de marca/modelo/versão, o DENATRAN poderá, ainda, solicitar aos fabricantes, importadores, encarregadores e transformadores de veículos, esclarecimentos ou testes adicionais que comprovem o atendimento à legislação vigente. No Art. 9º, após a concessão do código de marca/modelo/versão, o DENATRAN poderá requisitar uma amostra dos lotes de veículos e ou componentes, nacionais ou importados, a serem comercializados no país, para fins de comprovação do atendimento às exigências de identificação e segurança veicular, mediante a realização de avaliações, executadas de acordo com a legislação vigente.

#### **2.11.1. Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT - NBR)**

As normas utilizadas nos testes dos caminhões da montadora em questão, são de caráter interno e em virtude disso não puderam ser divulgadas. Todavia, o protótipo deve obedecer aos padrões estabelecidos pela resolução Nº 558/80 (art. 4º) do CONTRAN de desgaste dos pneus.

#### **2.11.2. Resolução Nº 558/80 (art. 4º) do CONTRAN**

Conforme esta resolução “fica proibida a circulação de veículos automotores equipado com pneu cujo desgaste da banda de rodagem tenha atingido os indicadores TWI (Tread Wear Indicators) ou cuja a profundidade remanescente da banda de rodagem seja inferior a 1,6 mm”. Quanto menor for a profundidade restante dos sulcos,

os riscos de acidentes serão maiores, pois reduz a aderência, em particular, nos pisos molhados.



### 3. Pneus

#### 3.1. Importância

Para Cardoso (2010) “pneu é um componente importante para a condução, conforto e segurança veicular, atuando como interface entre o veículo e a pista, sendo projetado para suportar e transmitir forças em diversas condições operacionais”. O pneu está submetido à algumas condições dinâmicas como acelerações e desacelerações, forças laterais, irregularidades da pista e impactos (Cardoso, 2010, p.24).

Segundo o fabricante de pneus Continental®, a parte mais importante do automóvel são os pneus, por ser o único ponto de contato entre o veículo e a estrada: *“O pneu é um componente do chassi, de alta qualidade, habilmente engendrado de forma a adequar-se aos velozes automóveis modernos. Devem-se adaptar as variedades de suspensões e responder com precisão aos comandos da direção, assim como rodar com suavidade e serem duráveis”*.

Para que os veículos permaneçam firmes e em segurança na estrada, os pneus têm de saber lidar com as forças sobre eles exercidas, na travagem, na aceleração, ou em curva. Isto é particularmente importante quando o piso está molhado e escorregadio, ou coberto por neve ou gelo (Manual Continental®).

O corte das arestas é muito importante por proporcionar conforto na condução e também melhorando a segurança dos condutores. Asseguram a melhor transferência da potência, mesmos nas mais variadas condições climáticas, a máxima precisão direcional e contato entre pneus e estrada (Manual Continental®).

#### 3.2. Composição do Pneu

Gent (2005) declara que a constituição do pneu em sua maior parte se dá por compostos de borracha, cujo ingrediente básico são os elastômeros, formados por cadeias poliméricas entrelaçadas. Os elastômeros são os materiais responsáveis pelas características físicas de elasticidade, flexibilidade e impermeabilidade ao ar e à água.

Segundo Cardoso (2010) existem dois tipos estruturais de pneus, os diagonais ou convencionais e os radiais. Os primeiros possuem carcaça formada por camadas de tecidos dispostas em ângulo, já no segundo tipo a estrutura é composta por camadas



de tecido ou fios metálicos alinhados radialmente e envolvidas por cinturas geralmente metálicas, conforme mostrado na Figura 7.

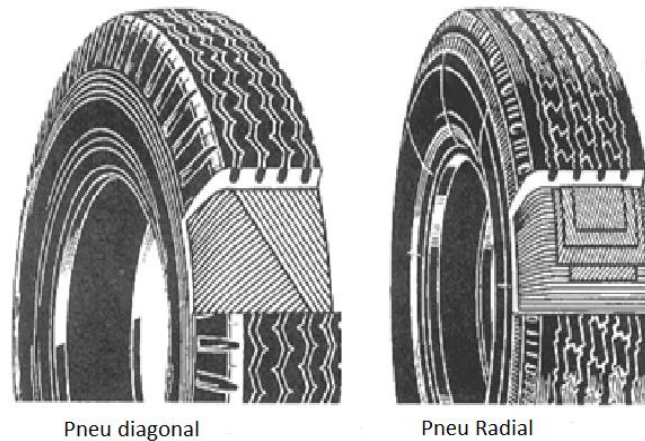


Figura 7: Tipos estruturais de pneus. Fonte: Sakai (2001).

O pneu radial é composto por 13 camadas, sendo elas: *liner*, friso, tela, lista antiabrasiva, enchimento do talão, flanco, cintura metálica, lista separadora, inserto do ombro, Nylon, folheta e banda de rodagem conforme a Figura 8 (Gent, 2005).

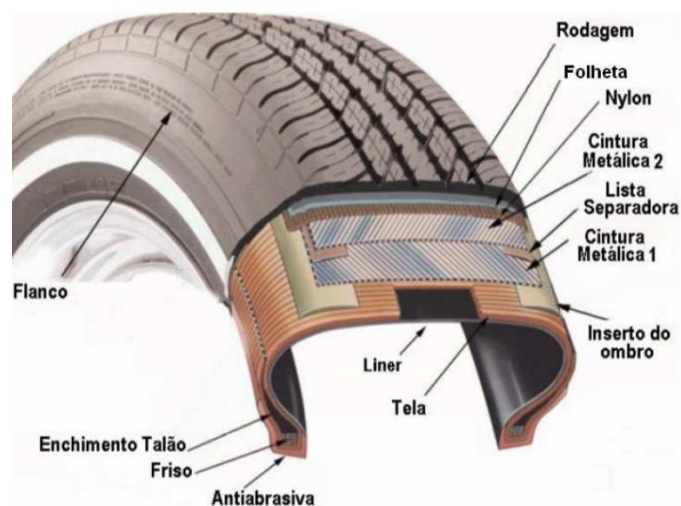


Figura 8: Componentes do pneu radial. Fonte: Gent (2005).

Segundo Nicolazzi (2012) os pneus radiais têm maior durabilidade, menor resistência ao rolamento, maior conforto em altas velocidades, melhor absorção de forças laterais, maior estabilidade direcional e uma menor sensibilidade direcional, porém são menos confortáveis em baixas velocidades e tem um maior custo.

A banda de rodagem, onde ocorre o desgaste analisado neste trabalho, é definida segundo Gent (2005) como *“componente que sofre a interação com o pavimento e fornece a aderência necessária para as manobras. Seu composto é especialmente*

*formulado para proporcionar equilíbrio entre desgaste, tração, dirigibilidade e resistência ao rolamento”.*

### 3.3. Profundidade do sulco dos pneus

No catálogo de pneus da Continental® é mostrada a diferença da distância de frenagem entre os pneus com distintas profundidades de sulcos (Figura 9).

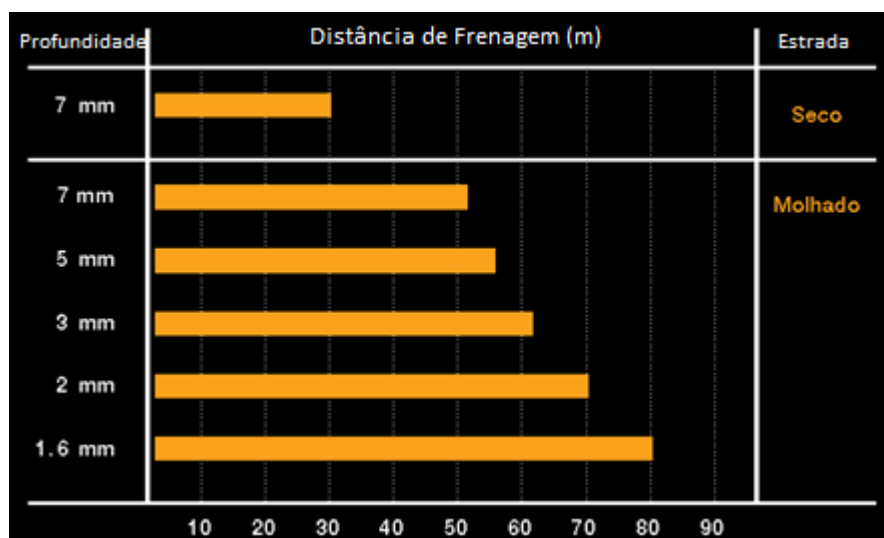


Figura 9: Frenagem de 100 km/h para 60 km/h. (Fonte: Manual Continental®)

Para uma profundidade de sulco de 1,6 mm (mínimo permitido), a distância percorrida na frenagem até a completa desaceleração, com o piso molhado é cerca de 60% maior que a distância percorrida pelos pneus com sulcos de 7 mm de profundidade.

### 3.4. Desgaste de pneus

Para Cardoso (2010), o desgaste de um pneu pode sofrer influência do tipo de pavimento, da topografia, do motorista, da velocidade do veículo e da carga levada, de condições climáticas como temperatura ambiente, volume de chuvas e sazonais verão ou inverno. Em virtude disso, a tarefa de avaliar seu comportamento quanto ao desgaste é complexa.

### 3.5. Influência da textura dos pavimentos no desgaste dos pneus

Lowne (1971) realizou testes em diversos pavimentos e concluiu que a microtextura é o principal fator para a determinação do desgaste da banda de rodagem

do pneu, tendo a macrotextura pequena participação. O aumento da macrotextura resultou em pequeno aumento no desgaste.

Veith (1987) e Le Maitre et al. (1998) concluíram que a microtextura é o fator mais significativo para o desgaste e, além disso, indicam que a abrasividade do pavimento é influenciada pelas condições climáticas.

### **3.6. Influência da pressão e da carga no desgaste de pneus**

A pressão em pneus do tipo pneumáticos é um fator importante na performance e consequentemente satisfação do cliente. Para cada carga é determinada uma pressão mínima para os pneus. Caso a pressão aplicada estiver abaixo do especificado, há consequências como: desgaste irregular, superaquecimento da carcaça, separação de componentes (estouros ou bolhas), baixo rendimento, perda de estabilidade direcional e de operação, aumento da resistência ao rolamento e maior consumo de combustível (Manual TWI, 2012).

A calibragem correta e a manutenção da pressão constituem fatores determinantes para a vida útil dos pneus e a consequente redução de custos. Com a pressão correta, os pneus apresentam sua máxima eficiência, garantindo o melhor aproveitamento da carcaça e, como resultado, obtendo o melhor custo-benefício (Manual TWI, 2012).

O tipo de aplicação influencia o valor da pressão para a qual os pneus devem ser calibrados. Dependendo do tipo de serviço, seja em terrenos com inclinação de rampa ou realizados com carga e sem carga.

### **3.7. Influência da velocidade do veículo no desgaste dos pneus**

O segundo fator que mais afeta a vida do pneu é a velocidade (Manual TWI, 2012). Os pneus têm limites especificados, o que equivale a dizer que foram projetados para flexionar um número de vezes com a carga correspondente num determinado intervalo de tempo. Uma velocidade acima da especificada fará com que essas deflexões gerem calor, aumentem a pressão (e/ou temperatura) interna e provoquem atrito entre as diferentes partes do pneu, gerando risco de separação entre componentes e diminuindo significativamente a vida útil do produto (Manual TWI, 2012).

### 3.8. Comportamento Dinâmico

#### 3.8.1. Alinhamento das rodas

O objetivo das montadoras é obter um alinhamento das rodas dianteiras igual a zero quando o carro estiver em movimento, o que elimina o arrasto lateral dos pneus e minimiza o desgaste (Junior, 2007).

Junior (2007) define como alinhamento divergente (TOE IN) para veículo com tração traseira, as rodas dianteiras saem da condição de descanso e sofrem um deslocamento para fora da linha central do veículo. E caso o veículo for com tração dianteira, as rodas dianteiras apresentarão um deslocamento para a linha central do mesmo, o alinhamento será convergente (TOE IN), a Figura 10 ilustra as duas situações de alinhamento.

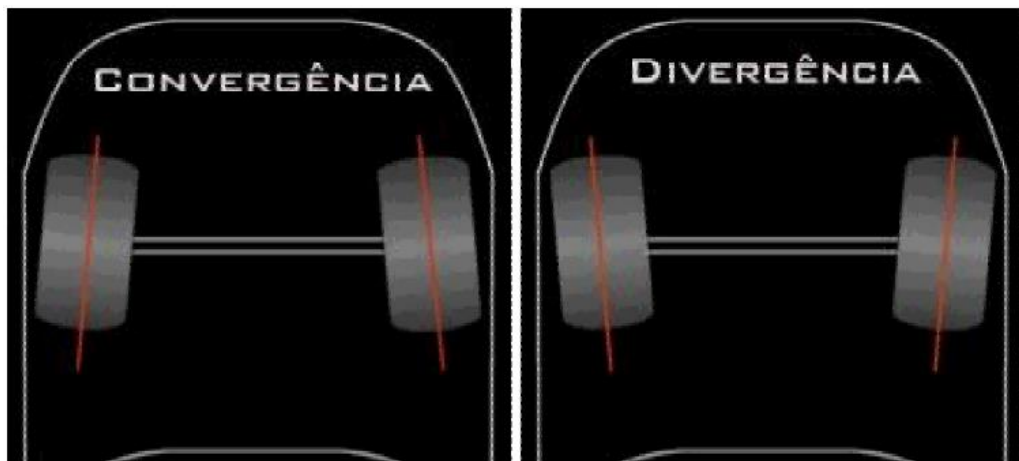


Figura 10: Alinhamento divergente e convergente Fonte: Junior (2007).

A Figura 11 mostra os efeitos do desalinhamento das rodas dianteiras em função do aumento de atrito, onde a banda lateral do pneu sofre uma sobrecarga e um desgaste excessivo (Junior, 2007)



Figura 11: Desgaste da banda de rodagem devido ao desalinhamento das rodas. Fonte: Junior (2007).

### 3.8.2. Ângulo de impulso

É o ângulo formado entre o eixo de simetria do veículo e o sentido de direção das rodas traseiras. Conforme a Figura 12.

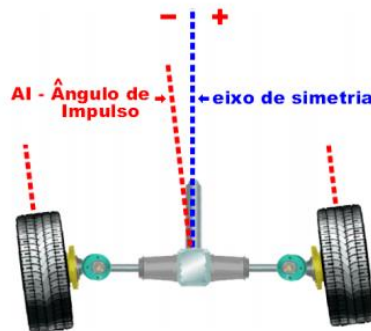


Figura 12: Ângulo de impulso Fonte: KMC.

### 3.8.3. Ângulo de *Set-Back*

O ângulo *Set-Back* é o ângulo formado pela perpendicular do eixo de giro em relação ao eixo de simetria do veículo, ou seja, se uma roda está adiantada em relação à outra, conforme a Figura 13.

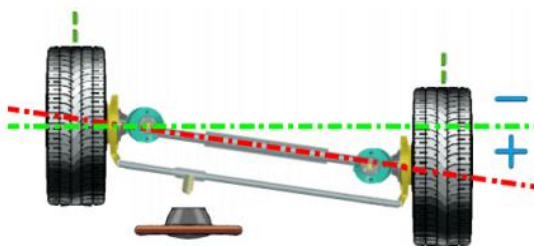


Figura 13: Ângulo entre as rodas Fonte: KMC.

### 3.8.4. Ângulo de deriva

Garrett et al. (2001), define ângulo de deriva como aquele entre a direção do pneu e a direção da trajetória do veículo. O ângulo de deriva está associado ao aumento de força lateral, sendo o responsável pela capacidade do pneu em desenvolver trajetórias curvilíneas.

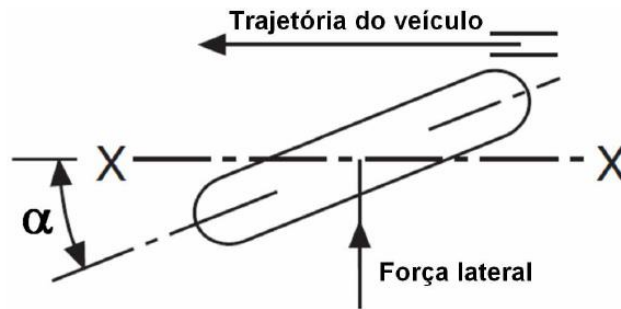


Figura 14: Ângulo de deriva. Fonte: Cardoso (2010).

As manobras em curvas são as principais responsáveis para o desgaste da banda de rodagem dos pneus (Gough, 1987). Por isso é necessário levar em consideração o ângulo de deriva para a análise da durabilidade dos pneus.

### 3.8.5. Ângulo de Câmbio

O ângulo de câmbio é o ângulo formado entre o plano da roda e o plano perpendicular à pista (Wong, 2001). O ângulo de câmbio é negativo quando o topo da roda se inclina na direção do veículo e positivo quando o topo da roda é inclinado na direção oposta ao veículo (Heisler, 2002).

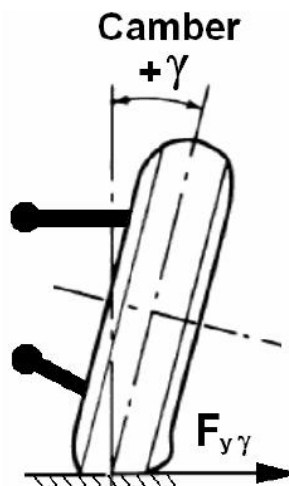


Figura 15: Ângulo de câmbio e forças atuantes. Fonte: Cardoso (2010).

De acordo com Gillespie (1992), a força lateral proveniente da cambagem é muito menor do que aquela obtida com ângulo da deriva.

### 3.8.6. Ângulo de Cáster

O ângulo de cáster tem o objetivo de estabilizar a roda após a realização de manobras, de modo que seu plano se mantenha paralelo ao da direção do movimento (Garrett et al., 2001).

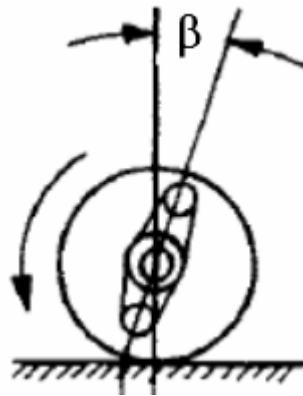


Figura 16: Ângulo de cáster. Fonte: Cardoso (2010).

O ângulo nulo é obtido quando o centro da área de contato do pneu coincide com a projeção do eixo de rotação do plano da roda, as rodas dianteiras se tornam instáveis em uma trajetória retilínea. Ângulos positivos são estabelecidos quando o centro da área de contato do pneu se localiza atrás da projeção do eixo de rotação do plano da roda. Já os ângulos negativos são obtidos quando o centro da área de contato do pneu se localiza na frente da projeção do eixo de rotação do plano da roda (Gillespie, 1992).

### 3.9. Atrito

Em inglês há uma distinção entre *friction* (atrito) e *rubbing* (esfregamento), pois o desgaste ocorre devido ao esfregamento, ou deslizamento, entre corpos (Cardoso, 2010). O escorregamento será diferente para a aceleração e frenagem (Nicolazzi, 2012). Conforme as Equações 46 e 47, respectivamente

$$e = \frac{\omega \cdot r - v}{\omega \cdot r} \quad (46)$$

$$e = \frac{v - \omega \cdot r}{v} \quad (47)$$

Em que “ $e$ ” é o escorregamento, “ $\omega$ ” é a velocidade angular da roda, “ $r$ ” o raio efetivo (dinâmico) do pneu e “ $v$ ” é a velocidade do veículo.

Da Vinci constatou a existência do atrito estático e dinâmico, onde a força para iniciar o movimento é maior do que para parar. O coeficiente de atrito diminui com o aumento da carga, a pressão dos pneus aumenta o coeficiente de segurança, já em relação à velocidade, o coeficiente diminui com o aumento da velocidade (Cardoso, 2010). Conforme pode ser visto na Figura 17.

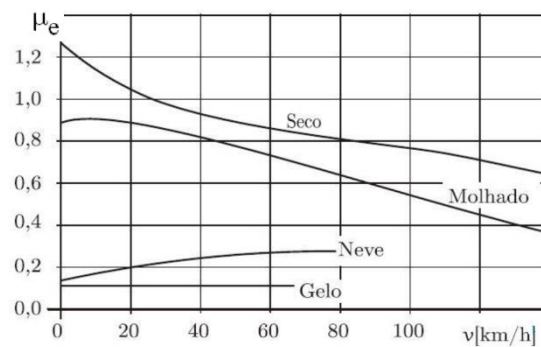


Figura 17: Coeficiente de atrito em diferentes velocidades. Fonte: Nicolazzi (2012).

Na Figura 18 pode ser observada a variação do coeficiente de atrito para diferentes tipos de pista.

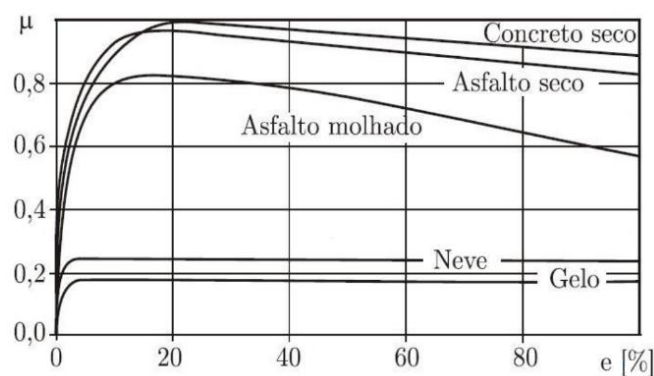


Figura 18: Coeficiente de atrito. Fonte: Nicolazzi (2012).

Brown (1996) determinou que compostos de borracha não obedecem às leis clássicas de atrito para os sólidos. Os coeficientes de atrito variam em função da área de contato, da força normal entre as superfícies e da velocidade de escorregamento. O coeficiente de atrito é afetado também pela temperatura segundo Costa (2007). As



particularidades de seu comportamento têm origem em duas das propriedades físicas destes compostos: o baixo módulo elástico e a viscoelasticidade (Costa, 2007).

O atrito das borrachas apresenta duas contribuições principais: uma parcela devida à adesão no contato entre a superfície e outra relativa à histerese que atua no corpo da borracha (viscoelasticidade) (Cardoso, 2010). A contribuição da adesão provém de forças de atração fracas (forças de *van der Waals*) entre a superfície da borracha e o contra-corpo. Nicolazzi (2012) declara que a histerese é a deformação da borracha e é menos sensível à água, enquanto que o atrito por adesão se dá pelo contato intermolecular e é sensível à água, conforme ilustra a Figura 19.

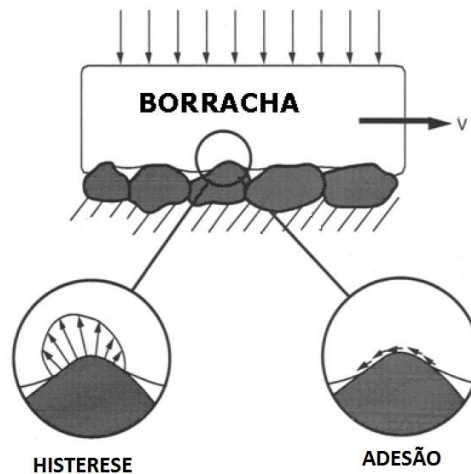


Figura 19: Atrito das borrachas. Fonte: Gillespie (2008).

Na Figura 20 é ilustrada a zona de contato e a zona de escorregamento, no contato do pneu com a pista, sendo observado o efeito da contração do pneu na região de atrito.

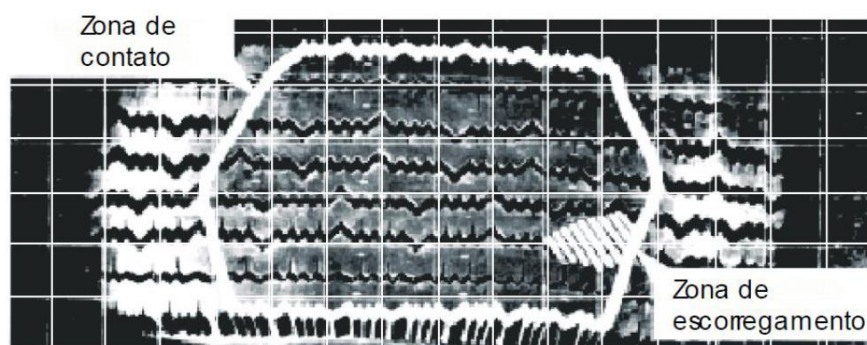


Figura 20: Zonas de contato e escorregamento e região de atrito. Fonte: Nicolazzi (2012).

## **4. Estudo de caso**

Neste capítulo são apresentados detalhadamente os procedimentos de realização do teste de durabilidade do caminhão da montadora. São apresentadas as rotas e as atividades requeridas para cada tipo de percurso, a carga utilizada e como os dados foram coletados.

### **4.1. Protótipos**

Para a realização dos testes foram utilizados dois caminhões protótipo, categoria leve, com capacidade de carga de 8.000 Kg cada, pertencentes à montadora.

### **4.2. Cargas**

Para realizar os testes de forma mais realística e como os caminhões são de carga, foram utilizadas cargas diferentes simulando possíveis utilizações em campo. As cargas influenciam diretamente o desgaste dos pneus como já foi abordado.

Inicialmente, foi determinado pelos engenheiros da equipe de trabalho, que a carga necessária para atender aos parâmetros de teste seria alcançada utilizando-se nas carrocerias dos caminhões, galões com água (com capacidade para 200 L) totalizando 3.000 kg como mostrado na Figura 21 (A). Entretanto, durante a realização dos testes foi constatado que a carga se apresentava muito instável, causando insegurança durante o percurso das rotas, devido a sua excessiva movimentação. Diante disso, optou-se por substituir a carga de galões por aço prensado fornecido pelo departamento de reciclagem da própria empresa, conforme mostra a Figura 21 (B). A nova carga foi inserida até atingir o peso necessário de 3.000 kg, somada à massa do próprio caminhão, resultando em aproximadamente 8.000 kg no total.



(A)



(B)

Figura 21. A) Carga composta por galões de água. B) Carga de sucata de aço prensado.

Fonte: o autor (2014).

Após a padronização da carga a ser utilizada, para fixação das mesmas nas carrocerias, foram utilizadas cintas e catracas conforme a Figura 22 (A); a fim garantir o correto posicionamento, evitando movimentações excessivas em curvas ou frenagens durante o percurso das rotas (garantindo a estabilidade). Em seguida, as cargas foram cobertas por lonas como mostra a Figura 22 (B), para impedir que alguma parte do aço prensado, que porventura se soltasse, fosse projetado durante o percurso e causasse qualquer tipo de acidente.



(A)



(B)

Figura 22: A) Catraca e cinta. B) Lona.

Fonte: (A) Internet (B) O autor (2014).

#### 4.3. Rotas dos testes

As rotas de percurso, determinadas para os testes, foram de fundamental importância para os estudos com os protótipos; pois possibilitaram simular de maneira verossímil as possíveis condições a serem enfrentadas pelos caminhões que serão desenvolvidos. Os testes foram realizados na cidade onde está instalada a montadora

e suas proximidades, incluindo parte da BR-060. Foram elaboradas quatro diferentes rotas para que os caminhões fossem testados.

O teste foi programado para atingir o total de 65 mil quilômetros de rodagem, os quais foram divididos conforme mostra a Tabela 2, em que *HW* corresponde a rota *Highway*, *HU* corresponde a rota *Heavy Urban*, *EU* a rota *Extra Urban* e *DD* a rota *Door to Door* e a letra “c” diferencia se a rota foi realizada com carga. Os protótipos percorreram carregados durante a metade do tempo dos testes e na outra metade, descarregados.

Tabela 2. Esquemático das rotas percorridas pelos caminhões.

Veículo	10k km	15k km	20k km	25k km	30k km	35k km	45k km	55k km	60k km	65k km
Protótipo	HW' c	HU' c	HW' c	HU' c	EU' c	DD' c	HW	EU	HU	DD

#### 4.3.1. Rota *Highway*

Essa rota foi elaborada com o objetivo de simular viagens e percursos longos, em que os caminhões teriam de atingir velocidades razoavelmente altas e durante um longo período. Durante a rodagem neste tipo de rota, foi possível observar o comportamento dos motores em alta rotação, dos freios e dos conjuntos de suspensão. A rota *highway* ou rota rodoviária foi desenvolvida na rodovia BR-060, com velocidade máxima de 90 km/h. Cada caminhão percorria cerca de 120 km em cada percurso parcial, totalizando mais de 1.000 km por dia de teste.

#### 4.3.2. Rota *Extra Urban*

Esta rota foi elaborada com o objetivo de observar o comportamento dos caminhões em vias urbanas, em que os mesmos desenvolveriam velocidades menores que na rota *highway* e incluindo momentos de paradas (semáforo, trânsito, etc). Esta rota foi percorrida principalmente na avenida principal e em parte do centro da cidade, mantendo em média a velocidade de 50 km/h. A rota *extra urban* foi desenvolvida em vias cujas velocidades máximas eram de 60 km/h. No total, os protótipos percorreram cerca de 630 km por dia nesta rota, com percursos parciais de 80 km.

#### 4.3.3. Rota *Heavy Urban*

Nesta rota, o objetivo foi simular o comportamento dos caminhões no perímetro urbano. A maior parte do percurso desta rota foi desenvolvido no perímetro urbano, com momentos de parada devido a fatores urbanos (semáforo, trânsito congestionado). Os sistemas de transmissão e freios foram bastante exigidos nesta rota. Os protótipos mantiveram em média uma velocidade de  $17 \text{ km/h}$ . Os percursos parciais eram  $66 \text{ km}$ , resultando em  $450 \text{ km/dia}$ .

#### 4.3.4. Rota *Door to Door*

Nesta rota, o objetivo foi simular os serviços de frete e entregas de mercadoria. Esta rota foi desenvolvida em vias secundárias. O percurso da rota obedeceu à algumas regras: os caminhões tiveram de andar até completar 5 minutos de percurso (independente do tamanho do percurso), e posteriormente parar por 3 minutos. Com velocidade média de  $17 \text{ km/h}$ , nesta rota os protótipos percorriam de  $300$  a  $350 \text{ km}$  por dia.

#### 4.3.5. Dados coletados nos testes

Para esta análise foram coletados os dados dos pneus Continental® e Pirelli®, conforme mostra a Figura 23.



Figura 23: Pneus dos fabricantes Continental® e Pirelli® respectivamente. Fonte: Internet.

A avaliação do desgaste dos pneus é bastante minuciosa. Em cada pneu foram realizadas medições dos sulcos, utilizando um paquímetro, à medida que os protótipos alcançavam  $10.000 \text{ km}$  rodados. Os sulcos são os entalhes de drenagem na banda de

rodagem dos pneus, que favorecem a passagem de água, evitando o processo de aquaplanagem.

O procedimento de medição dos sulcos é realizado da seguinte maneira: com o paquímetro na mão direita, mede-se a partir do ponto 1 (localizado paralelo ao *DOT* do pneu) utilizando o sulco mais externo como referência, sendo este denominado “sulco 1”. A partir da determinação do “sulco 1”, os demais pontos estarão localizados a 90° do *DOT* conforme ilustrado na Figura 24. Para cada ponto escolhido, foram medidos todos os sulcos paralelos a este ponto.

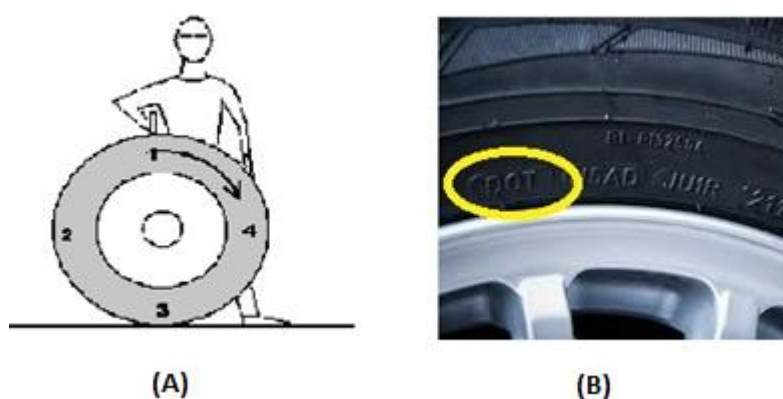


Figura 24. A) Procedimento de medição e B) DOT do pneu. Fonte: Material fornecido pela montadora.

Há duas formas de análise do desgaste da banda de rodagem dos pneus, uma delas é utilizando como referência o indicador *TWI* (*Tread Wear Indicator*). O *TWI* é um filete de borracha disposto transversalmente aos sulcos em alguns pontos da banda de rodagem. Outra forma de verificação é através da medição da degradação dos sulcos dos pneus. Pode ser utilizada como referência para este tipo de análise a especificação da resolução nº 558/80 (art. 4º) que define “os sulcos não devem ter profundidade restante inferior a 1,6 mm”. A montadora optou pelo método de análise de altura dos sulcos.



## 5. Análise de falha

Para a realização das análises é necessário seguir o procedimento o qual os testes foram realizados, para isso segue um fluxograma.

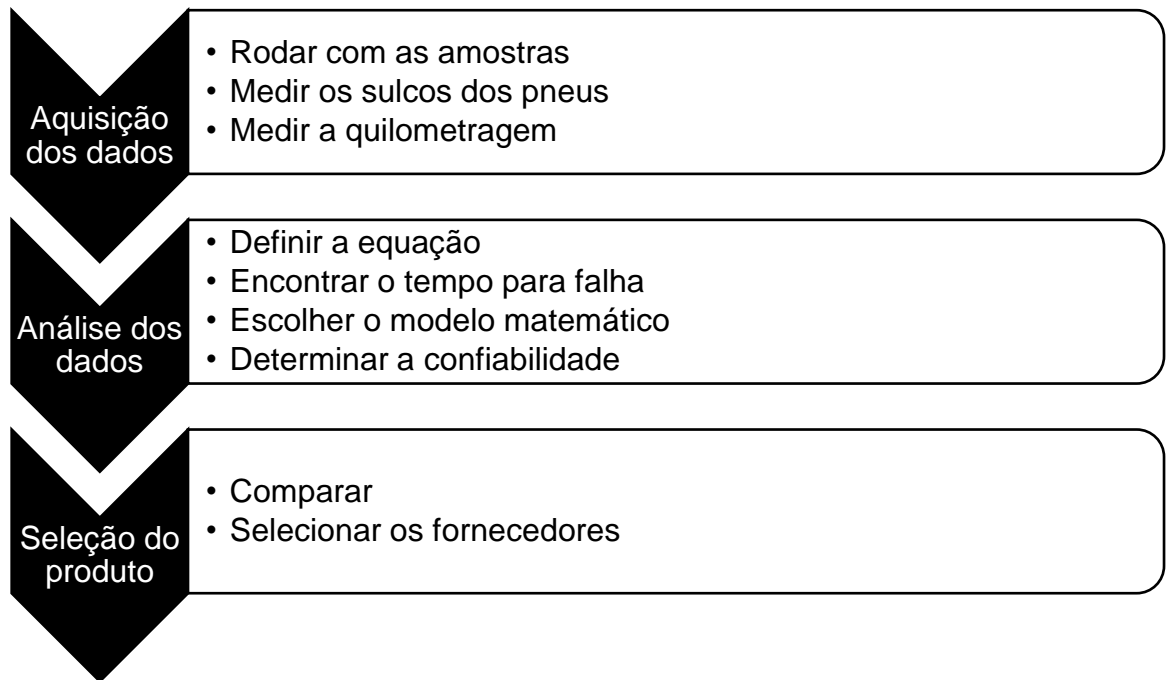


Figura 25: Fluxograma da análise de dados.

### 1. Rodar com as amostras

O primeiro passo é a realização dos testes experimentais, para isso deve-se calcular o tamanho da amostra. Com as amostras definidas deve ser observado as condições de rodagem, como a velocidade e rotas exigidas, assim como a carga utilizada.

### 2. Medir os sulcos dos pneus

No segundo passo deve-se realizar a medição dos sulcos dos pneus testados, sempre seguindo o mesmo padrão de medição, para que o sulco estudado seja aferido no mesmo ponto, com isso o resultado será confiável.



### 3. Medir a quilometragem

Nesse passo três é necessário observar a quilometragem do veículo testado para que a medição dos sulcos dos pneus seja feita no período determinado. Os passos 1 ao 3 são realizados simultaneamente.

### 4. Definir a equação

Com os dados coletados nos passos 1 ao 3, são realizados os cálculos para encontrar os coeficientes da equação que regem esses dados. Para isso utiliza-se o teste de degradação e estimador de parâmetros da distribuição *Weibull*.

### 5. Encontrar o tempo para falha

Com a equação definida, substitui-se o valor da falha e será encontrada a quilometragem que ocorrerá a falha. O tempo para falha será calculado com o tempo necessário para chegar na quilometragem da falha. Como cada rota deve conter a quilometragem que será testado, com isso o tempo para falha pode ser calculado.

### 6. Escolher o modelo matemático

Com o tempo para falha definido, é feito o cálculo de estimativa do parâmetro beta da distribuição *Weibull*, que definirá qual a distribuição que rege os dados.

### 7. Determinar a confiabilidade

Após o sexto passo, cada distribuição terá uma forma de calcular a confiabilidade. Seguindo os cálculos que a distribuição demonstra é possível encontrar a confiabilidade requerida para o fabricante.

## 8. Comparar

Nessa fase, após ser calculada a confiabilidade para todos os fabricantes testados, é realizada a comparação entre os valores da confiabilidade dos componentes fornecidos pelos fabricantes para serem testados.

## 9. Selecionar os fornecedores

Após a comparação, é realizada escolha do fornecedor que melhor se adequa as exigências da montadora.

### 5.1. Exposição de dados

Após a realização dos três primeiros passos do fluxograma, foi possível observar três falhas para o fabricante *Pirelli*<sup>®</sup>, o que significa que o pneu não cumpriu o mínimo necessário de profundidade do sulco devido ao desgaste da banda de rodagem. Porém as três falhas foram observadas na medição de 60 mil quilômetros. Por se tratar de uma medição dos sulcos dos pneus realizada a cada 10 mil quilômetros, o que prejudicou saber o momento exato da falha. Os tempos de falha podem ser verificados na Tabela 3. Sendo constatado que as falhas ocorreram no último período de testes.

Tabela 3: Valores do tempo de falha dos testes com os pneu.

Resultados dos testes de desgaste de Pneus			
Pneus	<i>N</i>	<i>r</i>	TPF (horas)
<i>Pirelli</i> <sup>®</sup>	6	3	1.664
<i>Continental</i> <sup>®</sup>	6	0	2.096

Em que “*N*” significa a quantidade de itens testados e “*r*” o número de falhas ocorridas.

Como já dito anteriormente, as coletas dos dados foram realizadas a cada 10 mil km, nas Tabelas 4 e 5 constam as medições dos sulcos dos pneus obtidas durante os testes de durabilidade.

Tabela 4: Medição dos sulcos dos pneus Pirelli®.

Quilometragem (Km)	10.000	20.000	30.000	40.000	50.000	60.000
Pneu Dianteiro Esquerdo Medição da profundidade do sulco (mm)	11,3	11,18	9,21	7,98	5,99	1,36
Pneu Traseiro Direito Externo Medição da profundidade do sulco (mm)	11,03	9,33	7,8	4,97	2,42	1,53
Pneu Traseiro Direito Interno Medição da profundidade do sulco (mm)	10,63	9,64	7,61	4,44	3,2	1,3

A falha foi observada na medição de 60 mil quilômetros, o que significa que a falha ocorreu entre 50 e 60 mil quilômetros rodados, nos três pneus mostrados na tabela 4. Porém é necessário encontrar a quilometragem aproximada da falha para cada pneu.

Tabela 5: Medição dos sulcos dos pneus Continental®.

Quilometragem (Km)	10.000	20.000	30.000	40.000	50.000	60.000
Pneu Dianteiro Esquerdo Medição da profundidade do sulco (mm)	11	9,5	8	6,5	4,1	4
Pneu Traseiro Esquerdo Externo Medição da profundidade do sulco (mm)	11,5	9,4	7,5	5,4	3,9	2,7
Pneu Traseiro Esquerdo Interno Medição da profundidade do sulco (mm)	12,2	11,9	10,8	8	4,4	3,2

Não foi observada nenhuma falha durante os 60 mil quilômetros, ou seja, nenhum dos pneus do fabricante Continental® atingiu o limite mínimo de 1,6 mm de profundidade dos sulcos dos pneus.

## 5.2. Tratamento dos dados

Com rodagem das amostras realizadas e os dados coletados, é possível realizar o quarto passo do fluxograma, definição da equação e seus coeficientes. Como os dados coletados não tem uma equação pré-estabelecida é necessário escolher uma

equação que mais se aproxime desses dados, o que representará mais fielmente. Encontrando tal equação será possível determinar o tempo aproximado de quando a falha ocorreu. Foi realizado o quarto passo do fluxograma para os dois fabricantes testados.

Para analisar a qualidade dos dados foi calculada a variância das estimativas, primeiro é confeccionada as equações, conforme as equações 48 a 51.

$$Y = a * x^3 + b * x^2 + c * x + d + e \quad (48)$$

$$Y_1 = a * x_1^3 + b * x_1^2 + c * x_1 + d + e \quad (49)$$

$$Y_2 = a * x_2^3 + b * x_2^2 + c * x_2 + d + e \quad (50)$$

$$Y_N = a * x_N^3 + b * x_N^2 + c * x_N + d + e \quad (51)$$

Com as equações montadas é transformada para forma matricial.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^3 & x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^3 & x_2^2 & x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N^3 & x_N^2 & x_N & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix}$$

Essas matrizes são, Y é vetor de medidas, E é vetor de Erro e  $\theta$  é o vetor de parâmetros, conforme a equação 53.

$$Y = \Phi * \theta + E \quad (52)$$

Com isso, pode-se encontrar as variâncias das estimativas.

$$P(\theta) = Se^2 * (\Phi^T * \Phi)^{-1} \quad (53)$$

$$(\Phi^T * \Phi)^{-1} = \frac{1}{DET(\Phi^T * \Phi)} * ADJ(\Phi^T * \Phi) \quad (54)$$

$$P(\theta) = \frac{Se^2}{DET(\emptyset^T * \emptyset)} * ADJ(\emptyset^T * \emptyset) \quad (55)$$

Resultando na matriz, em que os valores das variâncias das estimativas será  $Sa^2=a_{11}$ ,  $Sb^2=a_{22}$ ,  $Sc^2=a_{33}$ ,  $Sd^2=a_{44}$ .

$$\begin{bmatrix} Sa^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Sb^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Sc^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Sd^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

Para o fabricante Pirelli foi substituído os valores das medidas.

$$10.000 = a * 11,3^5 + b * 11,3^4 + c * 11,3^3 + d * 11,3^2 + e * 11,3 + f + \varepsilon \quad (56)$$

$$20.000 = a * 11,18^5 + b * 11,18^4 + c * 11,18^3 + d * 11,18^2 + e * 11,18 + f + \varepsilon \quad (57)$$

$$30.000 = a * 9,21^5 + b * 9,21^4 + c * 9,21^3 + d * 9,21^2 + e * 9,21 + f + \varepsilon \quad (58)$$

$$40.000 = a * 7,98^5 + b * 7,98^4 + c * 7,98^3 + d * 7,98^2 + e * 7,98 + f + \varepsilon \quad (57)$$

$$50.000 = a * 5,99^5 + b * 5,99^4 + c * 5,99^3 + d * 5,99^2 + e * 5,99 + f + \varepsilon \quad (58)$$

$$60.000 = a * 1,36^5 + b * 1,36^4 + c * 1,36^3 + d * 1,36^2 + e * 1,36 + f + \varepsilon \quad (59)$$

Transformando na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} 10.000 \\ 20.000 \\ 30.000 \\ 40.000 \\ 50.000 \\ 60.000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11,3^5 & 11,3^4 & 11,3^3 & 11,3^2 & 11,3 & 1 \\ 11,18^5 & 11,18^4 & 11,18^3 & 11,18^2 & 11,18 & 1 \\ 9,21^5 & 9,21^4 & 9,21^3 & 9,21^2 & 9,21 & 1 \\ 7,98^5 & 7,98^4 & 7,98^3 & 7,98^2 & 7,98 & 1 \\ 5,99^5 & 5,99^4 & 5,99^3 & 5,99^2 & 5,99 & 1 \\ 1,36^5 & 1,36^4 & 1,36^3 & 1,36^2 & 1,36 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix}$$

Utilizando o software Matlab, foi possível calcular o valor da variância.

$$\begin{aligned} \emptyset = & [11.3^5 \ 11.3^4 \ 11.3^3 \ 11.3^2 \ 11.3 \ 1; \ 11.18^5 \ 11.18^4 \ 11.18^3 \ 11.18^2 \ 11.18 \ 1; \ 9.21^5 \ 9.21^4 \\ & 9.21^3 \ 9.21^2 \ 9.21 \ 1; \ 7.98^5 \ 7.98^4 \ 7.98^3 \ 7.98^2 \ 7.98 \ 1; \ 5.99^5 \ 5.99^4 \ 5.99^3 \ 5.99^2 \ 5.99 \ 1; \ 1.36^5 \\ & 1.36^4 \ 1.36^3 \ 1.36^2 \ 1.36 \ 1] \end{aligned} \quad (60)$$

$$P(\theta) = Se^2 * (\emptyset^T * \emptyset)^{-1} \quad (61)$$

O cálculo  $(\emptyset^T * \emptyset)^{-1}$  foi realizado no Software Matlab, conforme o programa abaixo:

```
A=[11.3^5 11.3^4 11.3^3 11.3^2 11.3 1; 11.18^5 11.18^4 11.18^3 11.18^2 11.18
1; 9.21^5 9.21^4 9.21^3 9.21^2 9.21 1; 7.98^5 7.98^4 7.98^3 7.98^2 7.98 1;
5.99^5 5.99^4 5.99^3 5.99^2 5.99 1; 1.36^5 1.36^4 1.36^3 1.36^2 1.36 1]
B=A'
C=B*A
D=inv(C)
```

Resultando na seguinte matriz.

$$\begin{bmatrix} 0,0000 & -0,0000 & 0,0001 & -0,0004 & 0,0011 & -0,0009 \\ -0,0000 & 0,0002 & -0,0023 & 0,0142 & -0,0390 & 0,0319 \\ 0,0001 & -0,0023 & 0,0308 & -0,1934 & 0,5311 & -0,4346 \\ -0,0004 & 0,0142 & -0,1934 & 1,2142 & -3,3347 & 2,7292 \\ 0,0011 & -0,0390 & 0,5311 & -3,3347 & 9,1607 & -7,4984 \\ -0,0009 & 0,0319 & -0,4346 & 2,7292 & -7,4984 & 6,1383 \end{bmatrix} * 10^4$$

E como os valores das variâncias são os valores da diagonal então  $Sa^2=0,0000$ ,  $Sb^2=2,0000$ ,  $Sc^2=308$ ,  $Sd^2=12.142$ ,  $Se^2=91.607$ ,  $Sf^2=61.383$ . Repetindo o mesmo procedimento para o fabricante Continental os valores da variância são  $Sa^2=0,0000$ ,  $Sb^2=0,0000$ ,  $Sc^2=8.000$ ,  $Sd^2=437.000$ ,  $Se^2=5.570.000$ ,  $Sf^2=10.558.000$ . Como o resultado da variância das estimativas foi muito alto, isso indica uma baixa quantidade de dados coletados.

### 5.2.1. Fabricante Pirelli®

Para aproximar o tempo de falha, por se tratar de experimento em que os sulcos dos pneus foram verificados a cada 10 mil km, foi necessário desenvolver a ferramenta teste de degradação para se obter os tempos de falha aproximado.

Para descobrir a equação que mais se aproxima à curva formada pelos pontos aferidos, foram feitas três tentativas de aproximação, por uma equação de primeiro, segundo e terceiro graus respectivamente (consultar Anexos).

Com os dados coletados, foi elaborado no software *Matlab*® um programa que calcula os coeficientes da equação de aproximação pelo método de mínimos quadrados. Na variável *X* serão os valores das medições dos sulcos dos pneus, deve ser realizado o programa para cada pneu testado, A variável *Y* será a quilometragem que foi medido os sulcos dos pneus, conforme descrito abaixo.

```
X=[11.30;11.18;9.21;7.98;5.99;1.36]
Y=[10000;20000;30000;40000;50000;60000]
plot(X,Y, 'b.')
A=[X.^0,X,X.^2,X.^3]
th=(inv(A'*A))*(A'*Y)
Y_ap=A*th;
hold on
plot(X,Y_ap, 'r')
```

O programa mostrado acima resolve o problema para uma equação de 3º grau. Para alterar o programa para a equação de 2º grau, na tentativa de verificar qual função mais se aproximava ao pontos obtidos, foi modificada a quarta linha para  $A=[X.^0,X,X.^2]$ . E para uma função linear a quarta linha bastou alterar a quarta linha para  $A=[X.^0,X]$ .

Tabela 6: Valores dos coeficientes das equações de aproximação para o fabricante *Pirelli*®.

Equação de aproximação	Coeficientes	Pneu 1	Pneu 2	Pneu 3
1º Grau	<i>a</i>	-4.721	-4.848	-4.972
	<i>b</i>	71.993	64.958	65.511
2º Grau	<i>a</i>	-455	-43	-8
	<i>b</i>	1.146	-4.320	-4.873
	<i>c</i>	59.328	63.863	65.304
3º Grau	<i>a</i>	7	-78	-83
	<i>b</i>	-600	1.450	1.454
	<i>c</i>	1.931	-12.411	-11.991
	<i>d</i>	58.468	74.638	73.889

Para a definir qual equação se aproximava melhor dos pontos, foi feita a análise gráfica.

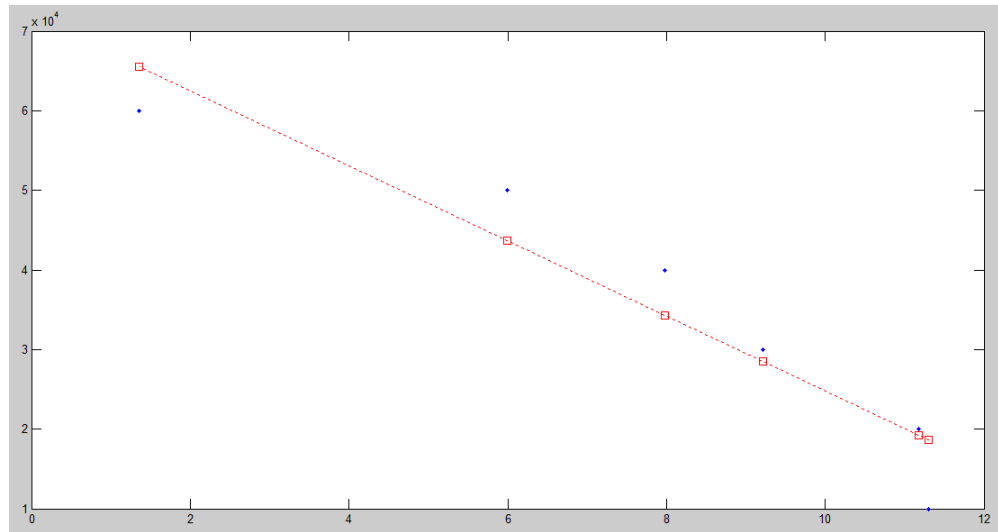


Figura 26: Reta obtida por aproximação com equação de 1° grau.

Fonte: O autor.

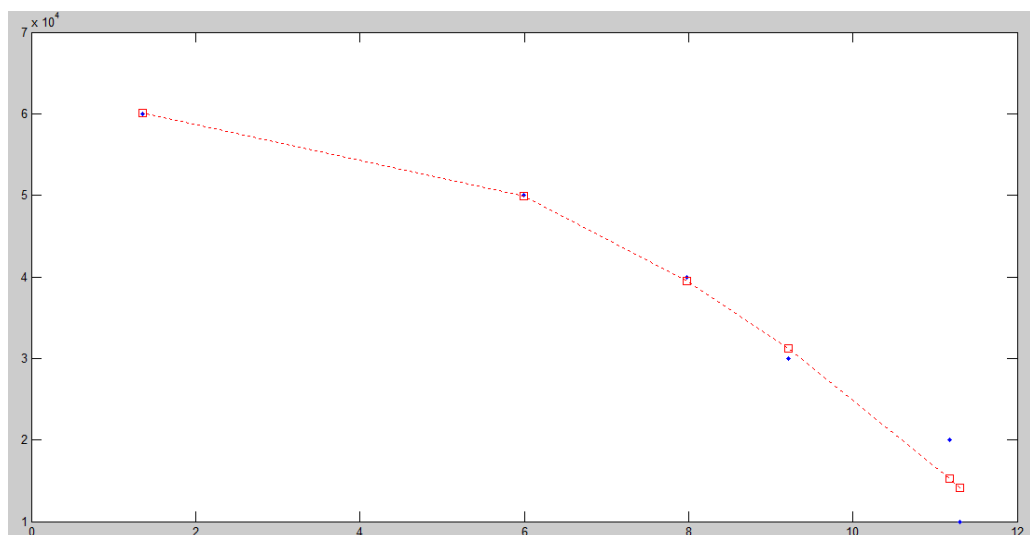


Figura 27: Curva obtida por aproximação com equação de 2° grau.

Fonte: O autor.



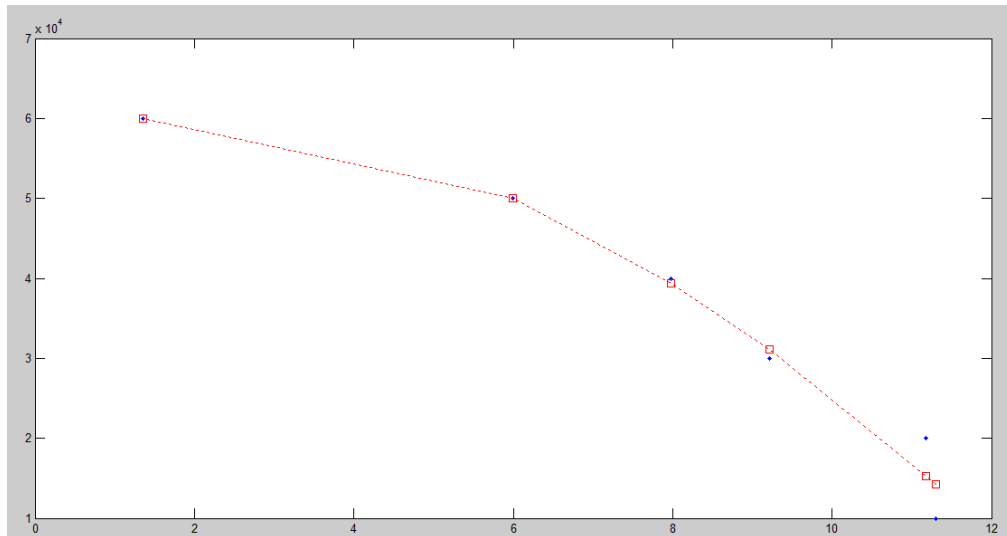


Figura 28: Curva obtida por aproximação com equação de 3º Grau.

Fonte: O autor.

Como observado, não foi possível diferenciar qual equação mais se aproximava dos pontos, apenas com a análise gráfica. Diante disso, foi feito o caminho inverso: substituiu-se os valores dos coeficientes encontrados nas equações e também os valores de X e então foram analisados os resultados em Y, o qual deve se aproximar a quilometragem medida. Conforme apresenta a Figura 29.

%Para o Pneu 1 equação de 3º Grau

```
x=11.30
%x=11.18
%x=9.21
%x=7.98
%x=5.99
%x=1.36
%x=1.6
```

```
%Y=10000
%Y=20000
%Y=30000
%Y=40000
%Y=50000
%Y=60000
```

```
a=-600
b=7
c=1931
d=58468
```

```
y=a*x^3+b*x^2+c*x+d
```

Figura 29: Programa elaborado para aproximação pelo “caminho inverso”: substituição dos coeficientes e análise dos valores de Y. Fonte: O autor.

Com isso, pôde-se comprovar que a equação que mais se aproximava ao comportamento dos dados foi a equação de 3º grau.

Com o quarto passo do fluxograma resolvido, a equação definida. É passado para o quinto passo que é encontrar o tempo para a falha dos componentes testados. Para isso, foi substituído o valor da falha, 1,6 mm, no programa para equação de terceiro grau e encontrada as respectivas quilometragens de falha para os pneus do fabricante Pirelli®, conforme a Tabela 7, e a partir da quilometragem é encontrado o tempo para a falha.

Tabela 7: Quilometragem da falha.

Falha	Quilometragem da falha (km)	Valor Crítico para o sulco do pneu (mm)
Pneu 1	59.118	1,6
Pneu 2	58.173	1,6
Pneu 3	58.086	1,6

O tempo de rodagem foi calculado através do número de dias em que os caminhões foram testados, os quais foram 131 dias, com carga horária de dois turnos de 8 horas totalizando 16 horas por dia. O teste completo teve a duração 2.096 horas. Para a primeira amostra foi constatada a falha com 59.118 *km*, com 107 dias de rodagem, totalizando 1.712 horas de utilização até a falha. Para a amostra 2 foi constatada a falha no dia 106, pois rodou 58.173 *km*, totalizando 1.696 horas para falha.

Para a amostra 3 a falha ocorreu após rodar 58.086 *km* ou 105 dias de rodagem, totalizando 1.680 horas para a falha.

Tabela 8: Tempo para falha de acordo com o teste de degradação.

Falha	TPF (Horas)
Pneu 1	1.712
Pneu 2	1.696
Pneu 3	1.680

O quinto passo do fluxograma foi concluído, com os valores do tempo para falha, pode-se encontrar o sexto passo, que é a obtenção de um modelo matemático que resultará na confiabilidade dos itens. Para encontrar esse modelo matemático, ou seja, a distribuição de probabilidade, utilizando os valores do tempo de falha é feito o cálculo dos parâmetros da distribuição *Weibull* utilizando a estimativa de parâmetros *Hazard*

*Plotting*. O procedimento de *Hazard Plotting* é mostrado na Tabela 9, em que o TPF são os tempos de falha encontrados para os itens que apresentaram falha e para os itens que não apresentaram falha o tempo do teste foi de 2096 horas, o que corresponde a duração total dos testes e para isso coloca-se o “c” que significa censura, que o item foi retirado sem falha.

Tabela 9: Tratamento dos dados por *Hazard Plotting* para teste de desgaste de pneus.

TPF	Rank (inv)	$h(x)$	$H(x)$	$\ln(H(x))$	$\ln(x)$
1.680	6	0,1666	0,1666	-1,7921	7,4265
1.696	5	0,2	0,3666	-1,0034	7,4360
1.712	4	0,25	0,6166	-0,4835	7,4454
2.096 c	3	-	-	-	-
2.096 c	2	-	-	-	-
2.096 c	1	-	-	-	-

O Rank inverso é a numeração decrescente dos itens,  $h(x)$  que é a função Hazard é a divisão do valor unitário pelo Rank inverso,  $H(x)$  é a função Hazard acumulativa que se obtém somando os valores de  $h(x)$ . As duas últimas colunas são obtidas calculando o logaritmo natural de  $H(x)$  e TPF. Para encontrar o parâmetro da *Weibull*,  $\beta$ , que definirá qual distribuição de probabilidade representará os dados, basta realizar uma regressão linear com os valores de  $\ln(H(x))$  e  $\ln(x)$ , com o auxílio de uma calculadora científica e foi possível obter o valor para o parâmetro  $\beta$  de *Weibull*, apresentado na Tabela 10.

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum X^2 * \sum Y^2 - (\sum XY) * \sum X}{n * \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (62)$$

$$\hat{\beta} = \frac{n \sum (XY) - \sum (X) * \sum Y}{n * \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (63)$$

Tabela 10: Valor do parâmetro da distribuição *Weibull* para os testes de desgaste de pneus.

Parâmetro	Valor
$\beta$	3

Como o valor de  $\beta$ , a distribuição que rege os dados será a distribuição Normal, com isso concluído o sexto passo. Isto se torna ainda mais coerente por se tratar de análise de desgastes de materiais, pois para Benck (2008) o modo de falhas por desgaste é caracterizado por  $\beta > 1$ , o que foi observado.

### 5.2.2. Fabricante Continental®

Para o fabricante Continental® foi repetido os mesmos passos do fluxograma. Utilizando o mesmo programa para o cálculo dos coeficientes, modificando os valores da variável “X”.

```
X=[11.00;9.5;8.0;6.5;4.1;4.0]
Y=[10000;20000;30000;40000;50000;60000]
plot(X,Y, 'b.')
A=[X.^0,X,X.^2,X.^3]
th=(inv(A'*A))*(A'*Y)
Y_ap=A*th;
hold on
plot(X,Y_ap, 'r')
```

Utilizando esse programa e alterando ele para todas as amostras e para as funções linear, quadrática e cúbica, foram obtidos os seguintes coeficientes.

Tabela 11: Valores dos coeficientes do fabricante Continental®.

Equação de aproximação	Coeficientes	Pneu 1	Pneu 2	Pneu 3
1º Grau	A	-6.473	-5.540	-4.647
	B	81.497	72.306	74.108
2º Grau	A	-41	184	-310
	B	-5.876	-8.144	170
	C	79.608	79743	59.413
3º Grau	A	-19	-42	-23
	B	390	1.078	510
	C	-8.905	-13.857	-3820
	D	86.113	90.261	13.808

Como observado no caso do fabricante Pirelli a melhor equação que representa melhor os pontos é a equação de maior grau, e será a equação de terceiro grau. Substituindo os valores dos coeficientes, foi encontrado os valores da quilometragem de falha, ou seja, quando o pneu terá um desgaste de 1,6 mm. Conforme a Tabela 12.

Tabela 12: Quilometragem da falha para pneus Continental®.

Item que falhou	Quilometragem da falha (km)
Pneu 1	72.786
Pneu 2	70.677
Pneu 3	89.074

O tempo de rodagem foi calculado através do número de dias em que os caminhões foram testados, os quais foram 131 dias, com carga horária de dois turnos de 8 horas totalizando 16 horas por dia. O teste completo teve a duração 2.096 horas. E como não houve falha durante esse período de teste, mesmo assim é possível fazer uma previsão do tempo para falha utilizando o teste de degradação. Durante o percurso o caminhão roda uma média de 200 km por dia, já que as rotas exigem diferente quilometragem.

Para a primeira amostra a falha ocorreu 12.786 km após o término dos testes, o que resulta em 64 dias a mais, ou 1.024 horas, o que resulta um total de 3.120 horas aproximadamente. Para a amostra 2 foi observada falha após 10.677 km do final dos testes, cerca de 54 dias, ou 864 horas, totalizando 2.960 horas para a falha. Já para a amostra 3 a falha só ocorreu após 29.074 km do fim dos testes, ou 146 dias, 2.336 horas. O tempo de falha da amostra 3 será 4.432 horas.

Tabela 13: Tempo para falha de acordo com o teste de degradação para pneus Continental®.

Item que falhou	TPF (Horas)
Pneu 1	3.120
Pneu 2	2.960
Pneu 3	4.432

Com os valores do tempo de falha é feito o cálculo dos parâmetros da distribuição *Weibull* por *Hazard Plotting*. O tratamento dos dados está na Tabela 14.

Tabela 14: Tratamento dos dados por *Hazard Plotting* para teste de desgaste de pneus Continental®.

TPF	Rank (inv)	$h(x)$	$H(x)$	$\ln(H(x))$	$\ln(x)$
3.120	3	0,3333	0,3333	-1,0987	8,0455
2.960	2	0,5	0,8333	-0,1823	7,9929
4.432	1	1	1,8333	-0,6061	8,3966

Com os valores de  $\ln(Hx)$  e  $\ln(x)$  foi calculada a regressão linear, com o auxílio de uma calculadora científica e foi possível obter o valor para o parâmetro  $\beta$  de *Weibull*, apresentado na Tabela 15.

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum X^2 * \sum Y^2 - (\sum XY) * \sum X}{n * \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (64)$$

$$\hat{\beta} = \frac{n \sum(XY) - \sum(X) * \sum Y}{n * \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (65)$$

Tabela 15: Valor do parâmetro da distribuição *Weibull* para os testes de desgaste de pneus Continental®.

Parâmetro	Valor
$\beta$	3

Assim como o resultado para o pneu do fabricante Pirelli®, o valor do parâmetro  $\beta$  para o fabricante Continental® foi 3 o que está de acordo com Benck (2008) em que o modo de falhas por desgaste é caracterizado por  $\beta > 1$ , o que foi observado.



## 6. Resultados e Discussões

Com os parâmetros da distribuição *Weibull* definidos para este problema, pode-se calcular a confiabilidade desejada. Por se tratar de um valor de  $\beta=3$ , a distribuição *Weibull* se comporta como uma distribuição Normal.

Para calcular o sétimo passo do fluxograma, encontrar a confiabilidade, basta utilizar as equações da distribuição normal. Realizando os cálculos para os dados dos pneus do fabricante Pirelli®.

Primeiramente calcula-se a média ( $\mu$ ) que é o valor que mostra para onde se concentra os dados da distribuição.

$$\mu = \frac{\sum X_i}{n} \quad (67)$$

Em que  $\sum X_i$  é o somatório dos tempos de falha encontrados para o pneu do fabricante Pirelli®, conforme a tabela 9. No denominador, “ $n$ ” é a quantidade de itens testados, como foram testados 6 pneus.

$$\mu = \frac{11.376}{6} \quad (68)$$

Resultando na seguinte média:

$$\mu = 1.896 \text{ horas} \quad (69)$$

A variância é uma medida da sua dispersão dos dados, a variância é definida como a média dos quadrados dos desvios em relação à média aritmética conforme a equação 54.

$$S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (70)$$

Quando o interesse não se restringe à descrição dos dados, mas partindo da amostra, visando retirar a interferência válidas para a respectiva população, deve-se modificar o divisor para  $n-1$  em lugar de  $n$ .

$$S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (71)$$

$$S^2 = \frac{(1.680-1.896)^2 + (1.696-1.896)^2 + (1.712-1.896)^2 + (2.096-1.896)^2 + (2.096-1.896)^2 + (2.096-1.896)^2}{6-1} \quad (72)$$



$$S^2 = 48.102,4 \quad (73)$$

A variância por ser um quadrado não permite comparação com a unidade que se está trabalhando. Para se ter uma medida de variabilidade com a mesma unidade do conjunto utiliza-se a raiz quadrada da variância, que é o desvio padrão:

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (74)$$

$$S = \sqrt{\frac{(1.680-1.896)^2 + (1.696-1.896)^2 + (1.712-1.896)^2 + (2.096-1.896)^2 + (2.096-1.896)^2 + (2.096-1.896)^2}{6-1}} \quad (75)$$

$$S = 219,3225 \quad (76)$$

O valor da  $Z$  será o indicador do gráfico da distribuição Normal.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (77)$$

Para isso  $\mu$  é a média dos tempos de falha dos itens que apresentaram falha,  $X$  é o valor que se quer saber a probabilidade, que no caso é o tempo do teste e  $\sigma$  é o desvio padrão.

$$Z = \frac{2096-1896}{219,3225} \quad (78)$$

$$Z = 0,91 \quad (79)$$

A probabilidade para 0,91 foi de aproximadamente 82%, o que significa que a confiabilidade do pneu resistir ao desgaste, é de 18% para um período de 2.096 horas. Conforme a Figura 30.

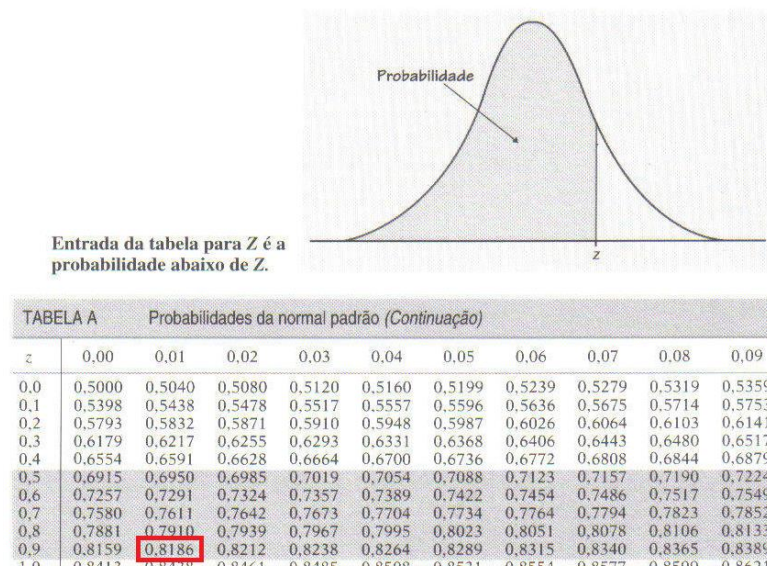


Figura 30: Probabilidade da durabilidade dos pneus Pirelli® Fonte: UFRJ.

Foi encontrada a probabilidade de 82%, o que significa que a confiabilidade será de 18% que os itens não falharam durante o período de 2.096 horas. Com esse resultado é possível compará-lo com outro fornecedor e assim escolher qual dos fabricantes fornece maior confiabilidade, concluindo o fluxograma.

O tamanho da amostra é um parâmetro muito importante, principalmente antes de iniciar os testes para que seja possível determinar o número requerido para as amostras e para se ter uma razoável estimativa do parâmetro.

O tamanho da amostra pode ser calculado com a fórmula mostrada na Equação 60.

$$n = \left( \frac{Z_{\alpha} \cdot \sigma}{E} \right)^2 \quad (80)$$

Em que “n” é o número de indivíduos na amostra,  $Z_{\frac{\alpha}{2}}$  é o valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado,  $\sigma$  é o desvio padrão da variável estudada, E é a margem percentual de erro,  $\bar{X}$  é uma estimativa da média,  $\mu$  é a média populacional.

Pode-se escolher o tamanho da amostra de modo que esteja 100(1-  $\alpha$ ) % confiantes de que o erro na estimação de  $\mu$  seja menor do que o limite especificado para o erro. O percentual do erro é de aproximadamente 26%.

A Tabela 16 apresenta os valores críticos para cada grau de confiança.

Tabela 16: Valor crítico.

Grau de confiança	$\alpha$	Valor Crítico $Z_{\frac{\alpha}{2}}$
90%	0,1	1,645
95%	0,05	1,96
99%	0,01	2,575

Com isso, é calculado do tamanho da amostra para os pneus do fabricante Pirelli®:

$$n = \left( \frac{1,645 \cdot 1.982,78}{500} \right)^2 \quad (81)$$

$$n = 42 \quad (82)$$

Para a análise ter um nível de confiança de 90% seriam necessárias 42 amostras (pneus).

No teste dos pneus do fabricante Continental® não foi observado falha em seus pneus. Porém para determinar a confiabilidade foi feito o cálculo para encontrar o tempo para falha, utilizando a metodologia proposta por esse trabalho que pode prever quando a falha ocorrerá. Esses tempos para falha está na Tabela 13, com isso é possível realizar o cálculo para os pneus do fabricante Continental®.

Primeiramente calcula-se a média ( $\mu$ ):

$$\mu = \frac{\sum X_i}{n} \quad (83)$$

Em que  $\sum X_i$  é o somatório dos tempos de falha encontrados para o pneu do fabricante Pirelli®, conforme a tabela 9 e  $n$  é a quantidade de itens testados no caso 6 pneus.

$$\mu = \frac{10;512}{3} \quad (84)$$

Resultando na seguinte média:

$$\mu = 3.504 \text{ horas} \quad (85)$$

A variância é uma medida da sua dispersão dos dados, a variância é definida como a média dos quadrados dos desvios em relação à média aritmética conforme a equação 54.

$$S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (86)$$

Quando o interesse não se restringe à descrição dos dados, mas partindo da amostra, visando retirar a interferência válidas para a respectiva população, deve-se modificar o divisor para  $n-1$  em lugar de  $n$ .

$$S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (87)$$

$$S^2 = \frac{(3.120-3.504)^2 + (2.960-3.504)^2 + (4.432-3.504)^2}{3-1} \quad (88)$$

$$S^2 = 652.288 \quad (89)$$

A variância por ser um quadrado não permite comparação com a unidade que se está trabalhando. Para se ter uma medida de variabilidade com a mesma unidade do conjunto utiliza-se a raiz quadrada da variância, que é o desvio padrão:

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{652.288} \quad (90)$$

$$S = 807,6434 \quad (91)$$

O valor da  $Z$  será o indicador do gráfico da distribuição Normal.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (92)$$

Para isso  $\mu$  é a média dos tempos de falha dos itens que apresentaram falha,  $X$  é o valor que se quer saber a probabilidade, que no caso é o tempo do teste e  $\sigma$  é o desvio padrão.

$$Z = \frac{2.096 - 3.504}{807,6434} \quad (93)$$

$$Z = -1,74 \quad (94)$$

A probabilidade para 1,74 foi de aproximadamente 4%, o que significa que a confiabilidade do pneu resistir ao desgaste, é de 96% para um período de 2.096 horas. Conforme a Figura 30.

Entrada da tabela para Z é a probabilidade abaixo de Z.

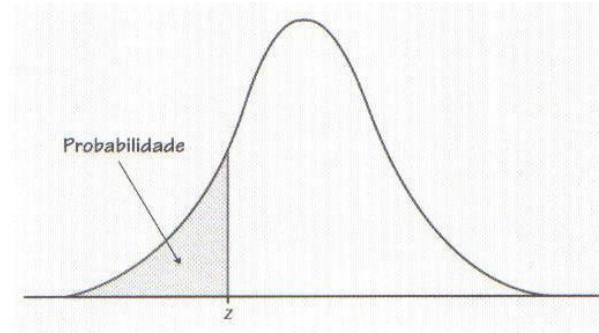


TABELA A Probabilidades da normal padrão										
z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
-3,4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
-3,3	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003
-3,2	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005
-1,9	0,0287	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
-1,8	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294
-1,7	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0367
-1,6	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455

Figura 31: Probabilidade da durabilidade dos pneus Continental® Fonte: UFRJ.

Com o tempo para falha projetados, pois não foi observada falha durante o período de teste, a confiabilidade de que não ocorra falha é bastante alta, 96%.

## 7. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Através do acompanhamento dos testes na montadora e com as análises realizadas a partir das ferramentas estatísticas foi possível obter uma resposta para a falha dos componentes estudados. O tempo de falha é importante pois determina a periodicidade das manutenções preventivas as quais a montadora deve indicar aos usuários proporcionando segurança e conforto ao assegurar que o componente não falhará durante a sua utilização, se forem respeitados os períodos pré-determinados para manutenções.

Nos componentes analisados, pneus, foram observadas três falhas, porém dentre amostras de um mesmo fabricante, Pirelli®. As amostras do fabricante Continental® não apresentaram falha durante o período de testes. Com as três falhas do primeiro fabricante, foi possível desenvolver o método do teste de degradação, tempo médio para falha e utilização dos parâmetros de *Weibull* para obtenção da confiabilidade dos testes. Para os pneus fabricante Continental® foi possível projetar quando seria os possíveis tempo para falha, graças ao método demonstrado por esse trabalho e com isso foi calculado a confiabilidade deste fabricante.

Para o fabricante Pirelli a confiabilidade foi de 18% para o período de 2.096 horas, que foi o tempo necessário para atingir 60 mil km. O que significa que a confiabilidade do pneu funcionar sem defeito, ou seja, sem atingir o limite mínimo de 1,6 mm de profundidade do sulco do pneu é de 18%.

Para o fabricante Continental® o resultado da confiabilidade foi de 96% dos pneus resistirem ao período de teste. Só foi possível encontrar tal confiabilidade utilizando essa metodologia de prever os resultados, pois como os testes foram restringidos pelo tempo e não por falhas, não foi observada falha durante o período de teste, não seria possível obter um resultado da confiabilidade, por se tratar de itens que foram censurados (não ocorreu falha durante os testes).

Foi observado que para uma confiança de 90% é necessário um número de amostra de 42, porém não foi possível utilizar essa quantidade de pneus. Como foram utilizados 6 pneus e apenas 3 pneus do fabricante Pirelli® apresentaram falha, a análise ficou prejudicada, porém mesmo com o número baixo de itens foi possível observar a diferença de desgaste entre os fabricantes, sendo possível notar que os pneus do fabricante Pirelli® tem um desgaste maior que o do fabricante Continental®.

Nos dois fabricantes foi verificada uma variância muito elevada, isso pode ser explicado pelo baixo número de amostras testadas ou pela baixa quantidade de dados coletados. Seria necessário aumentar o número de amostras e diminuir o tempo de medição para que fossem obtidos mais dados, o que melhoraria a análise.

Este trabalho teve como objetivo demonstrar uma metodologia de análise utilizando ferramentas estatísticas que auxiliam na tomada de decisão e na redução de tempo de teste. Utilizando ferramentas como teste de degradação, que foi possível estimar os valores das falhas, utilizando para isso regressão linear, métodos dos mínimos quadrados, distribuições *Weibull* e normal para se obter uma confiabilidade dos itens testados.

Nesse trabalho foi acompanhado todo o teste, por isso, foi utilizado o teste de degradação e realizando uma regressão linear, interpolando os valores para encontrar o tempo para a falha. Para reduzir o tempo de duração dos futuros testes, utilizando essa metodologia, não seria necessário realizar os testes por completo, e sim parte dos deles e calcularia uma regressão linear, mas utilizando a extrapolação, que a partir dos dados coletados, seria possível prever o comportamento e o resultado dos itens testados. O que resultaria em uma grande redução de custos e tempo, agilizando o processo de desenvolvimento do veículo.

## 8. Referência Bibliográficas

Anuário da indústria Automotiva Brasileira – ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2015.

BENCK, C., Luiz.; WONG, Kevin.; CANDIDO, Tamara. Distribuição de *Weibull* conceitos básicos aplicações. São Paulo, Escola Superior de Engenharia e Gestão, 2008.

BILLINTON, R., ALLAN, R.N., Reliability Evaluation of Engineering Systems, England: The Bath Press, Avon, 1987, 349p.

BORGES, WS.; COLOSIMO, E.A.; FREITAS, M.A. Métodos estatísticos e melhoria da qualidade: construindo confiabilidade em produtos São Paulo: ABE-Associação Brasileira de Estatística, 1996

BROWN, R. Physical testing of rubber. London. Champman & Hall, 1996.

BUSSAB, MORETTIN, Regressão Linear Simples, 2015.

CARDOSO, A. Fernando. Estudo do desempenho dos componentes de borracha utilizados na fabricação da banda de rodagem dos pneus automotivos em função dos pavimentos das rodovias, São Paulo, 2010.

COSTA, A. L. A. Caracterização do comportamento vibracional do sistema pneu-suspensão e sua correlação com desgaste irregular verificado em pneus dianteiros de veículos comerciais. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Dodson, Bryan. Schwab, Harry. 1962. *Accelerated Testing: A Practitioner's Guide to Accelerated And Reliability Testing*, Ed. SAE International, 1962.

FREITAS, M. A, COLOSIMO, E. A. Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados, Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1997, 326p.

GARRETT, T. K.; NEWTON, K.; STEEDS, W. The motor vehicle. Great Britain. Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 2001.

GENT, A. N.; WALTER, J.D. The pneumatic tire. Washington: National Highway Traffic Safety Administration, 2005.

GERTLER, J. J. Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 8, p. 3-11, 1988.

HIMMELBLAU, D. M. **Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes**. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1978.



LAFRAIA, J.R, Ricardo. Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. São Paulo, Ed. Qualitymark, 2001.

LOPES, L. F. D. Análise de componentes principais aplicada à confiabilidade de sistemas complexos. 2001.

Magalhães, R.R. - Tese de D.Sc. Simulação Numérica para Predição de Falhas em Componentes Automotivos usando dados de testes cíclicos de bancada e de durabilidade veicular, PEI/EP/UFBA, 2011

Manual técnico Diesel S-10

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

NETO, F. B. Edgard, Testes de fadiga de rodas veiculares – Proposta de estabelecimento, para os testes em laboratório, dos carregamentos que simulem os ocorridos no teste de durabilidade estrutural de veículo m pista. São Paulo, 2010.

NICOLAZZI, Lauro C., Rosa, E. e Leal, L.C.M.. Uma introdução à modelagem quase-estática de veículos automotores de rodas. Florianópolis: Publicação interna do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, 2012.

Resolução nº 558/80, art. 4º, do Código de Trânsito Brasileiro (CTB).

Sartori, Isabel, Amaro, Carolina, Júnior, Mauricio, Embiruçu, Marcelo. Detecção, diagnóstico e correção de falhas: Uma proposição consistente de definição e terminologias, 2012.

SHRYUCK, Henry S. e SIEGEL, S.J. The methods and material of Demography. Washington: U. S. Government Printing Office, 1980.

Souza, Rinaldo de Oliveira. Reengenharia no desenvolvimento de protótipos automotivos funcionais, Escola de Engenharia Mauá – São Caetano do Sul, 2013.

WONG, J. Y. Theory of ground vehicles. United States of America. John Wiley & Sons, 2001.

## ANEXOS

- Programas desenvolvidos no software *Matlab*

Pneu 1

1º Grau

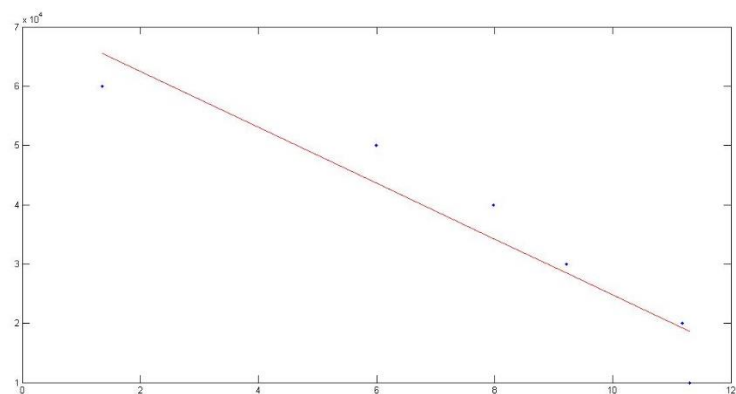
```
X=[11.30;11.18;9.21;7.98;5.99;1.36]
Y=[10000;20000;30000;40000;50000;60000]
plot(X,Y, 'b.')
A=[X.^0,X]
th=(inv(A'*A))*(A'*Y)
Y_ap=A*th;
hold on
plot(X,Y_ap, 'r')
```

Coefficientes da equação

1.0e+04 \*

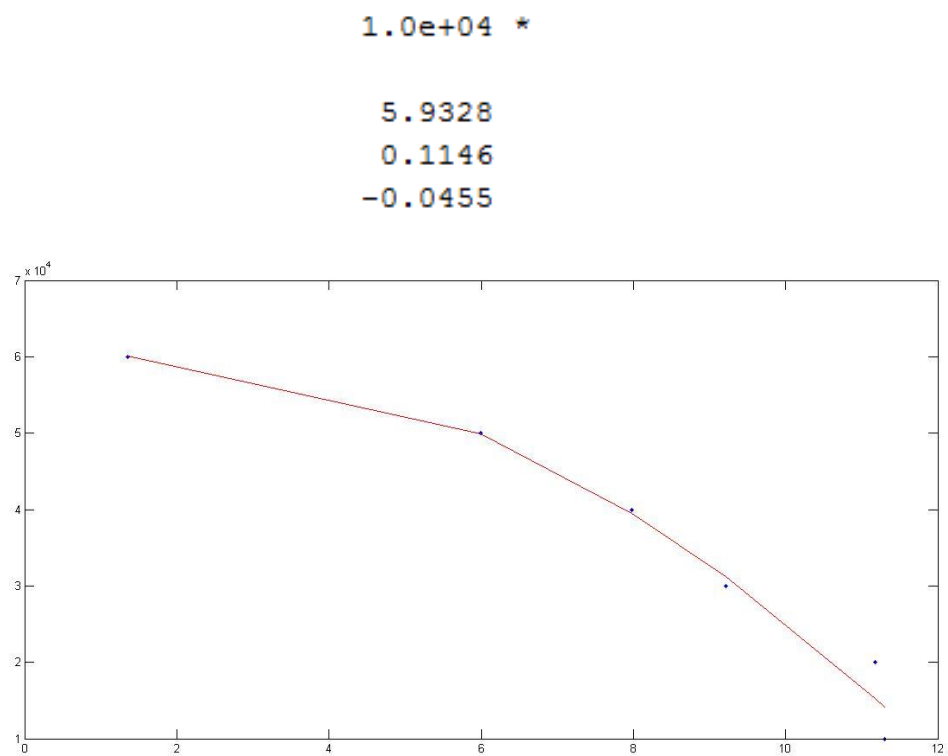
7.1993

-0.4721



2° grau

```
X=[11.30;11.18;9.21;7.98;5.99;1.36]
Y=[10000;20000;30000;40000;50000;60000]
plot(X,Y,'.r')
A=[X.^0,X,X.^2]
th=(inv(A'*A))*(A'*Y)
Y_ap=A*th;
hold on
plot(X,Y_ap,'r')
```

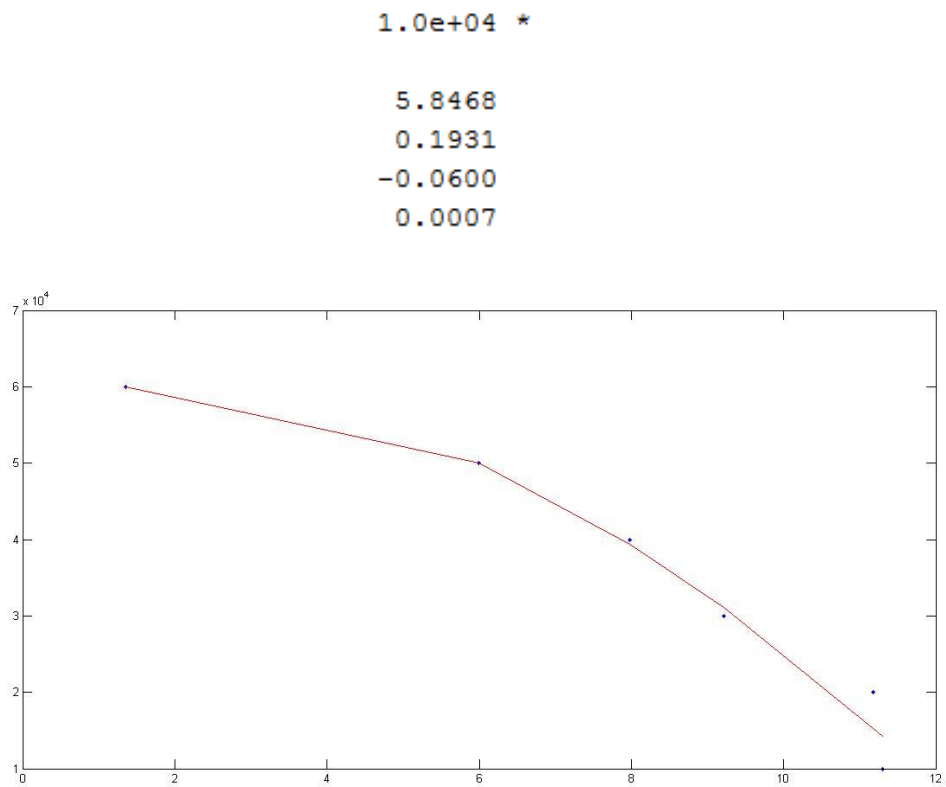


### 3° Grau

```

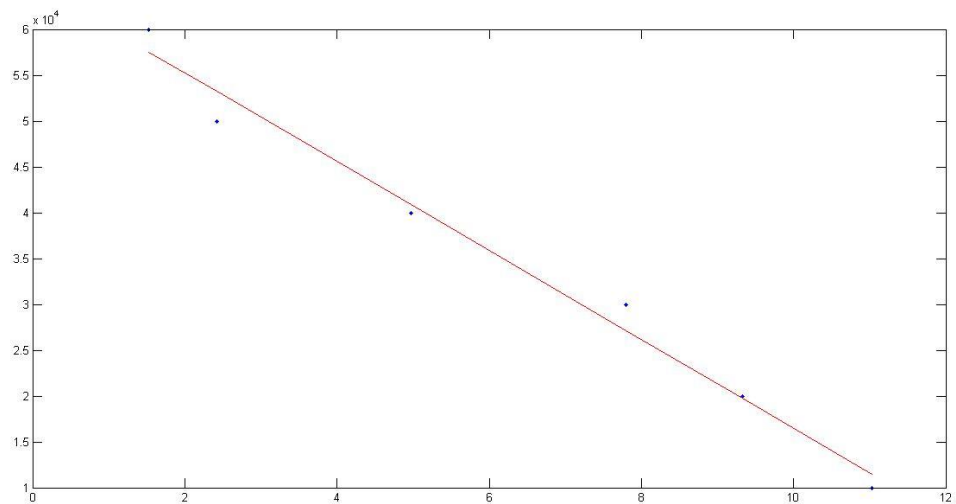
X=[11.30;11.18;9.21;7.98;5.99;1.36]
Y=[10000;20000;30000;40000;50000;60000]
plot(X,Y, 'b.')
A=[X.^0,X,X.^2,X.^3]
th=(inv(A'*A))*(A'*Y)
Y_ap=A*th;
hold on
plot(X,Y_ap, 'r')

```



## Pneu 2 1° Grau

```
X=[11.03;9.33;7.80;4.97;2.42;1.53]
Y=[10000;20000;30000;40000;50000;60000]
plot(X,Y, '. ')
A=[X.^0,X]
th=(inv(A'*A))*(A'*Y)
Y_ap=A*th;
hold on
plot(X,Y_ap, 'r')
```



## 2° Grau

```
X=[11.03;9.33;7.80;4.97;2.42;1.53]
Y=[10000;20000;30000;40000;50000;60000]
plot(X,Y,'.')
A=[X.^0,X,X.^2]
th=(inv(A'*A))*(A'*Y)
Y_ap=A*th;
hold on
plot(X,Y_ap,'r')
```

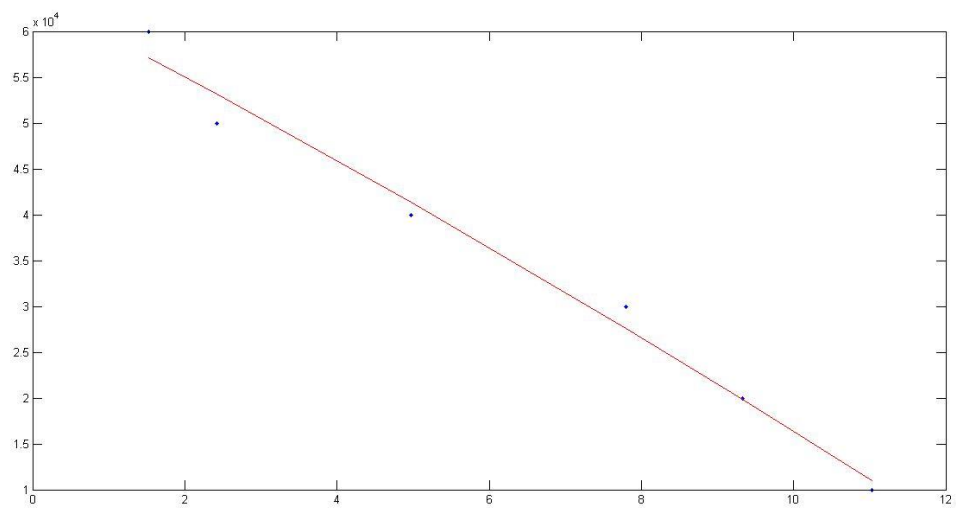
--

1.0e+04 \*

6.3863

-0.4320

-0.0043



3° Grau

```
X=[11.03;9.33;7.80;4.97;2.42;1.53]
Y=[10000;20000;30000;40000;50000;60000]
plot(X,Y, 'b.')
A=[X.^0,X,X.^2,X.^3]
th=(inv(A'*A))*(A'*Y)
Y_ap=A*th;
hold on
plot(X,Y_ap, 'r')
```

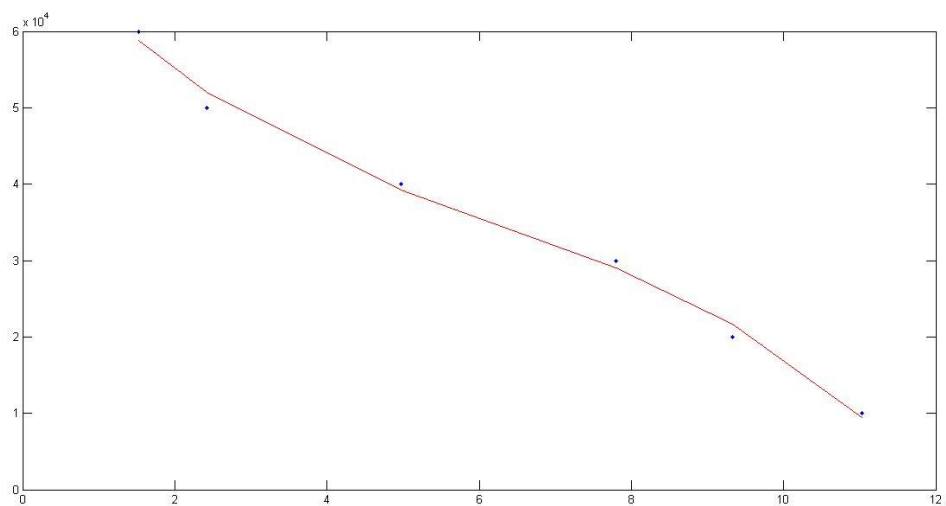
1.0e+04 \*

7.4638

-1.2411

0.1450

-0.0078



## Pneu 3

## 1º Grau

```

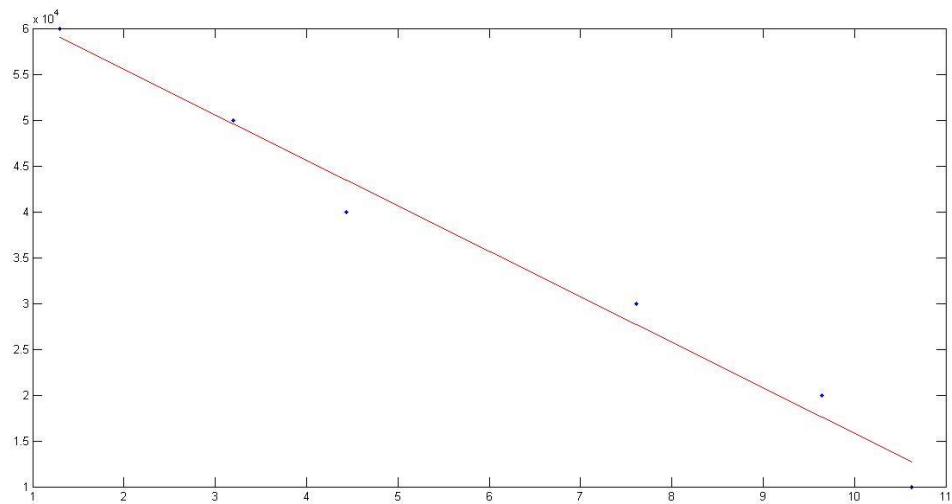
X=[10.63;9.64;7.61;4.44;3.20;1.30]
Y=[10000;20000;30000;40000;50000;60000]
plot(X,Y, '.')
A=[X.^0,X]
th=(inv(A'*A))*(A'*Y)
Y_ap=A*th;
hold on
plot(X,Y_ap, 'r')

```

1.0e+04 \*

6.5511

-0.4972





2° Grau

```
X=[10.63;9.64;7.61;4.44;3.20;1.30]
Y=[10000;20000;30000;40000;50000;60000]
plot(X,Y, 'b.')
A=[X.^0,X,X.^2]
th=(inv(A'*A))*(A'*Y)
Y_ap=A*th;
hold on
plot(X,Y_ap, 'r')
```

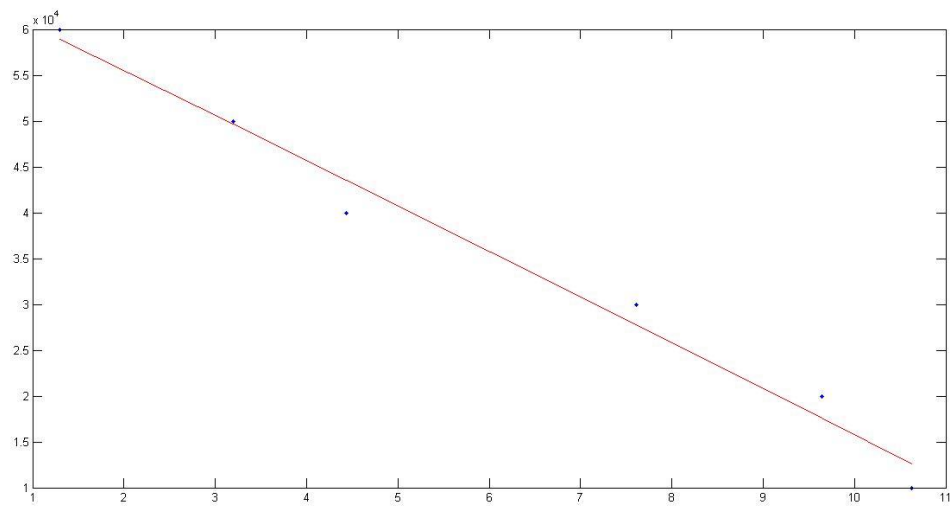
1.0e+04 \*

6.5304

-0.4873

-0.0008

,



3° Grau

```
X=[10.63;9.64;7.61;4.44;3.20;1.30]
Y=[10000;20000;30000;40000;50000;60000]
plot(X,Y, 'b.')
A=[X.^0,X,X.^2,X.^3]
th=(inv(A'*A))*(A'*Y)
Y_ap=A*th;
hold on
plot(X,Y_ap, 'r')
```

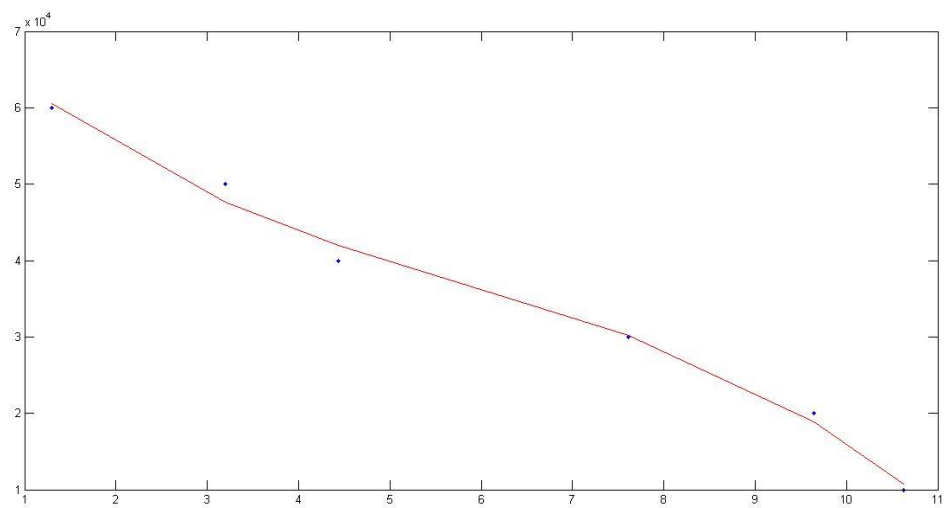
1.0e+04 \*

7.3889

-1.1991

0.1454

-0.0083



- Utilizando os coeficientes obtidos no cálculo acima, foi calculado o valor de  $Y$ , para encontrar o que mais se aproxima do valor original.

```
Command Window
>> calculo

x =

    11.3000

Y =

    10000

a =

   -4721

b =

    71993

y =

    1.8646e+04

erropercentual =

    46.3683

fx >>
```

```
Command Window
-7.2633

>> calculo

x =

    11.1800

Y =

    20000

a =

   -4721

b =

    71993

y =

   1.9212e+04

erropercentual =

   -4.1004

fx >>
```

```
Command Window
-4.1004

>> calculo

x =

    9.2100

Y =

    30000

a =

   -4721

b =

    71993

y =

   2.8513e+04

erropercentual =

   -5.2167

fx >>
```

```
Command Window
-5.2167

>> calculo

x =

    7.9800

Y =

    40000

a =

   -4721

b =

    71993

Y =

   3.4319e+04

erropercentual =

   -16.5521

fx >> |
```

```
Command Window
-16.5521

>> calculo

x =

    5.9900

Y =

    50000

a =

   -4721

b =

    71993

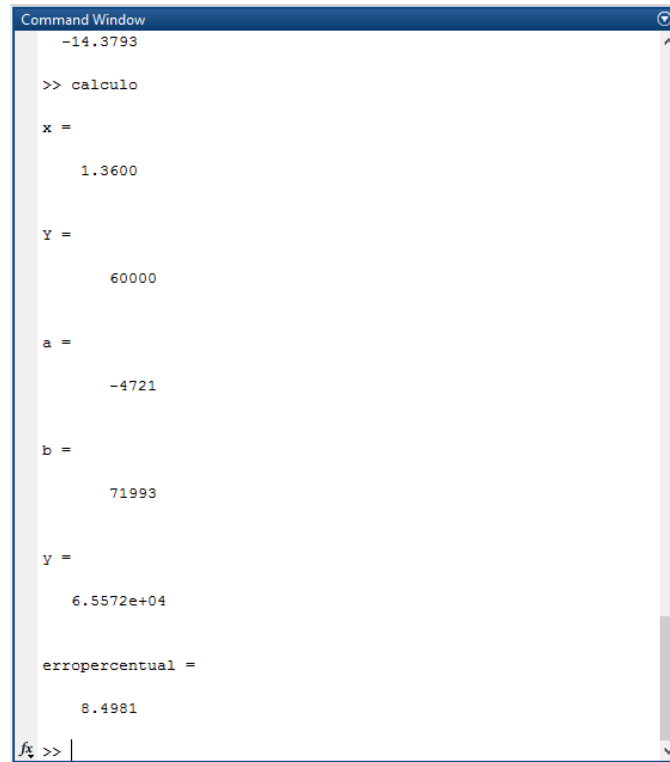
Y =

   4.3714e+04

erropercentual =

   -14.3793

fx >> |
```

A screenshot of the MATLAB Command Window. The window has a blue title bar that says "Command Window". The background is light gray. The text is black. It shows the results of a function call. At the top, there is a value "-14.3793". Below that, the prompt ">>" is followed by the function name "calculo". Then, several variables are assigned: "x =" followed by "1.3600", "Y =" followed by "60000", "a =" followed by "-4721", "b =" followed by "71993", "y =" followed by "6.5572e+04", and "erropercentual =" followed by "8.4981". At the bottom, there is a prompt "fx >>" followed by a vertical bar cursor.

```
Command Window
-14.3793

>> calculo

x =
    1.3600

Y =
    60000

a =
   -4721

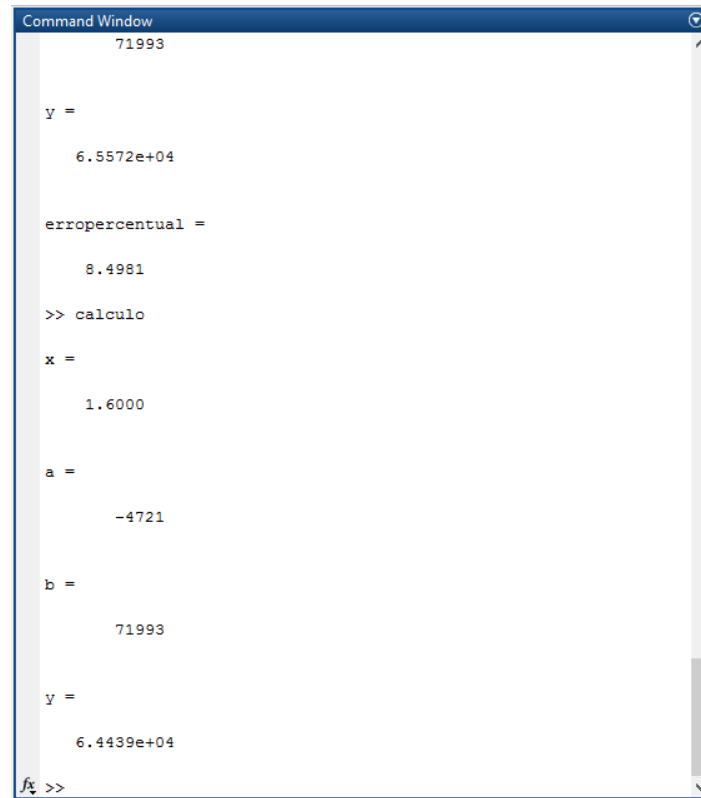
b =
    71993

y =
    6.5572e+04

erropercentual =
    8.4981

fx >> |
```

- Para o valor 1.6 que é o limite para que ocorra a falha



```
Command Window
71993

y =
    6.5572e+04

erropercentual =
    8.4981

>> calculo

x =
    1.6000

a =
   -4721

b =
    71993

y =
    6.4439e+04

fx >>
```

Com pode ser visto a aproximação pela reta não ficou adequada.

- Tentativa de aproximação por uma equação de 2º Grau

```
Command Window

11.3000

Y =

    10000

a =

   -455

b =

    1146

c =

   63863

y =

   1.8714e+04

erropercentual =

   46.5636

fx >>
```

```
Documents ► MATLAB

Command Window

11.1800

Y =

    20000

a =

   -455

b =

    1146

c =

   63863

y =

   1.9804e+04

erropercentual =

   -0.9910

fx >>
```



```
Command Window

9.2100

Y =

    30000

a =

   -455

b =

    1146

c =

    63863

y =

   3.5823e+04

erropercentual =

    16.2542

fx >>
```

```
Command Window

7.9800

Y =

    40000

a =

   -455

b =

    1146

c =

    63863

y =

   4.4033e+04

erropercentual =

     9.1601

fx >>
```

```
Command Window

5.9900

Y =

    50000

a =

   -455

b =

    1146

c =

    63863

y =

    5.4402e+04

erropercentual =

    8.0918

fx >>
```

```
Command Window

1.3600

Y =

    60000

a =

   -455

b =

    1146

c =

    63863

y =

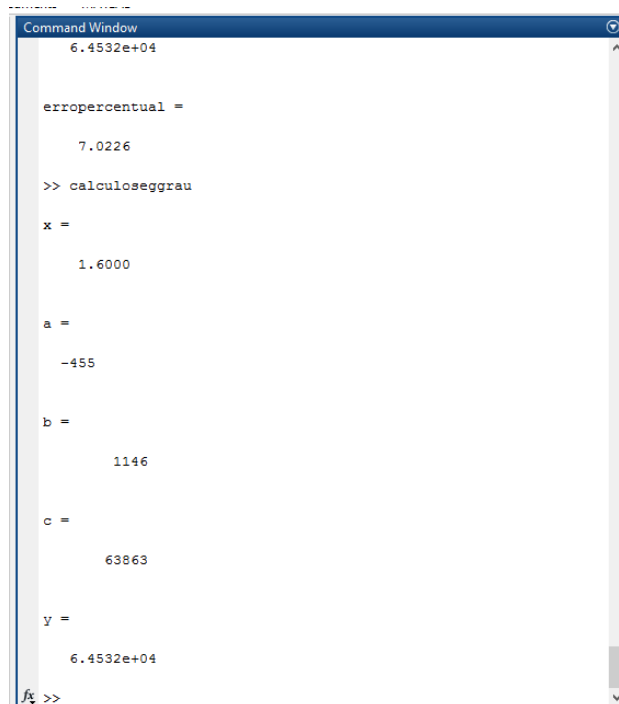
    6.4580e+04

erropercentual =

    7.0920

fx >>
```

- Para o valor 1.6 que é o limite para que ocorra a falha



```
Command Window
6.4532e+04

erropercentual =

    7.0226

>> calculoseggrau

x =

    1.6000

a =

   -455

b =

    1146

c =

    63863

y =

    6.4532e+04

fx >>
```

- Tentativa de aproximação por uma equação de 3º Grau

```
Command Window

10000

a =

-600

b =

7

c =

1931

d =

58468

y =

-7.8456e+05

erropercentual =

101.2746

fx >> |
```

```
Command Window

20000

a =

-600

b =

7

c =

1931

d =

58468

y =

-7.5752e+05

erropercentual =

102.6402

fx >> |
```

```
Command Window

30000

a =

-600

b =

7

c =

1931

d =

58468

y =

-3.9189e+05

erropercentual =

107.6552

fx >> |
```

```
Command Window

40000

a =

-600

b =

7

c =

1931

d =

58468

y =

-2.3058e+05

erropercentual =

117.3477

fx >> |
```

```
Command Window

50000

a =

-600

b =

7

c =

1931

d =

58468

y =

-5.8667e+04

erropercentual =

185.2265

fx >> |
```

```
Command Window

60000

a =

-600

b =

7

c =

1931

d =

58468

y =

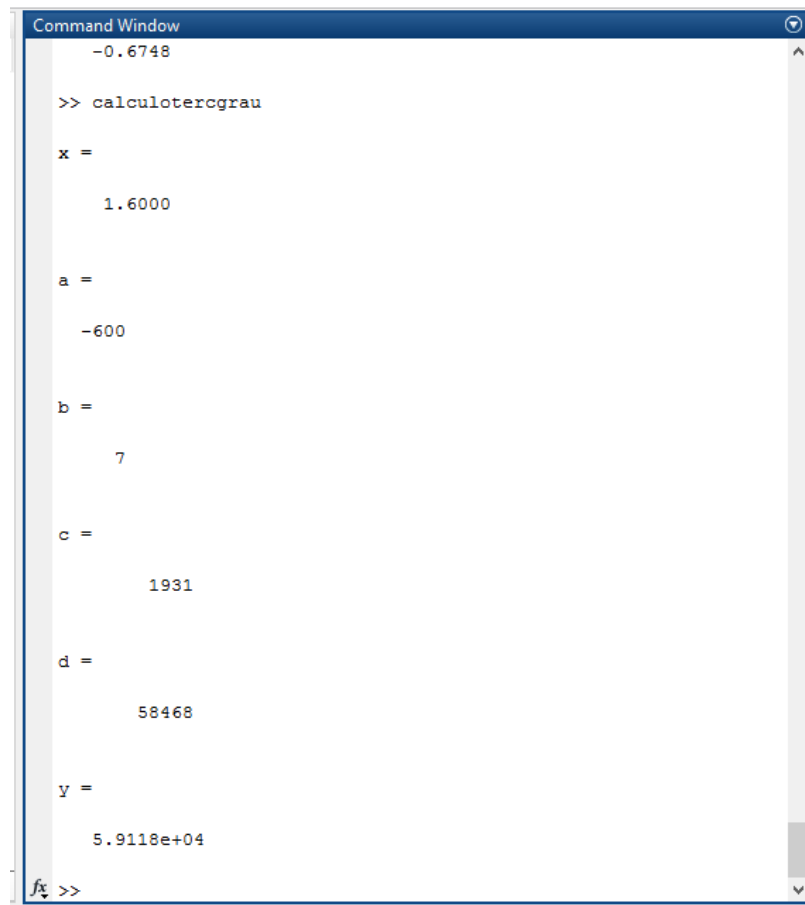
5.9598e+04

erropercentual =

-0.6748

fx >>
```

- Para o valor 1.6 que é o limite para que ocorra a falha



```
Command Window
-0.6748

>> calculotercograu

x =

    1.6000

a =

   -600

b =

     7

c =

    1931

d =

   58468

y =

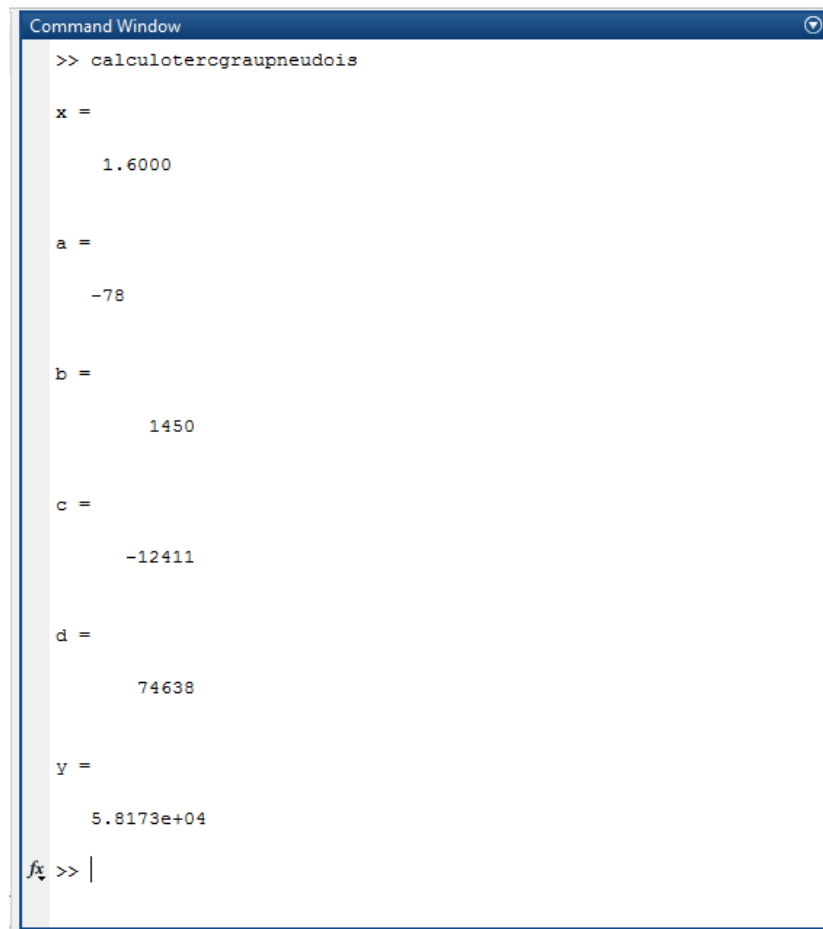
  5.9118e+04

fx >>
```

Ficou um resultado razoável utilizando a equação de 3º Grau

A quilometragem estimada para a falha do primeiro pneu é 59118 km

Para o Pneu 2

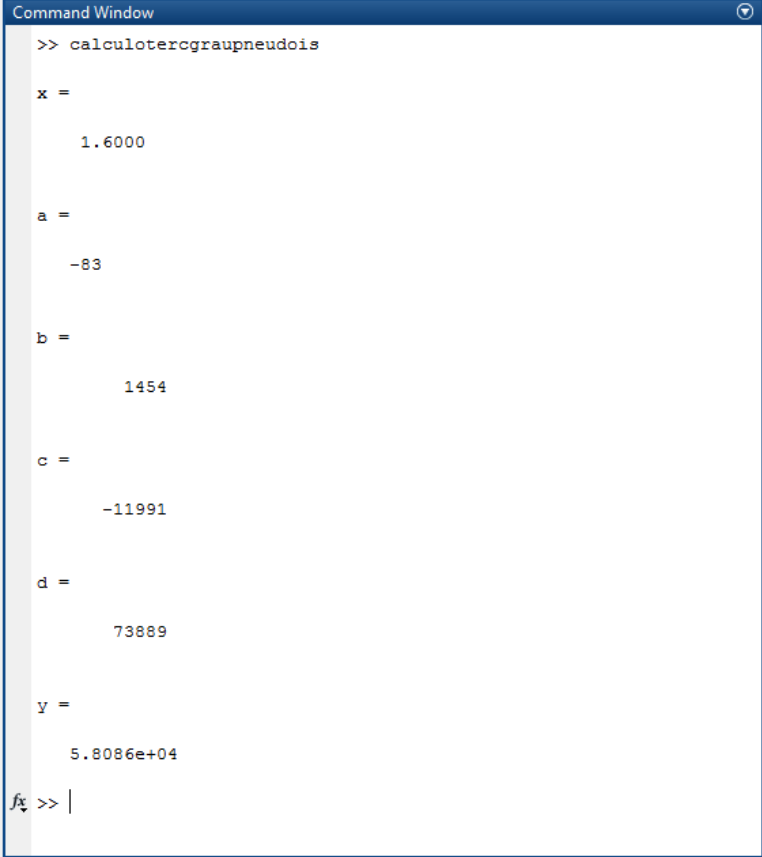
A screenshot of a MATLAB Command Window. The title bar is blue with the text "Command Window" and a small icon on the right. The window contains the following text:

```
>> calculotercgraupneudois  
  
x =  
    1.6000  
  
a =  
   -78  
  
b =  
    1450  
  
c =  
  -12411  
  
d =  
    74638  
  
y =  
  5.8173e+04  
fx >> |
```

A quilometragem estimada para a falha do primeiro pneu é 58173 km



Para o Pneu 3



```
Command Window
>> calculotercgraupneudois

x =

    1.6000

a =

   -83

b =

   1454

c =

  -11991

d =

   73889

y =

  5.8086e+04

fx >> |
```

A quilometragem estimada para a falha do primeiro pneu é 58086 km

## Variância das estimativas

```
A=[11.35 11.34 11.33 11.32 11.3 1; 11.185 11.184 11.183 11.182 11.18 1;
9.215 9.214 9.213 9.212 9.21 1; 7.985 7.984 7.983 7.982 7.98 1; 5.995 5.994
5.993 5.992 5.99 1; 1.365 1.364 1.363 1.362 1.36 1]
```

```
B=A'
```

```
C=A*B
```

Command Window					
11.3500	11.3400	11.3300	11.3200	11.3000	1.0000
11.1850	11.1840	11.1830	11.1820	11.1800	1.0000
9.2150	9.2140	9.2130	9.2120	9.2100	1.0000
7.9850	7.9840	7.9830	7.9820	7.9800	1.0000
5.9950	5.9940	5.9930	5.9920	5.9900	1.0000
1.3650	1.3640	1.3630	1.3620	1.3600	1.0000
B =					
11.3500	11.1850	9.2150	7.9850	5.9950	1.3650
11.3400	11.1840	9.2140	7.9840	5.9940	1.3640
11.3300	11.1830	9.2130	7.9830	5.9930	1.3630
11.3200	11.1820	9.2120	7.9820	5.9920	1.3620
11.3000	11.1800	9.2100	7.9800	5.9900	1.3600
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
C =					
642.6194	634.3939	522.8131	453.1459	340.4323	78.1891
634.3939	626.2751	516.1245	447.3503	336.0814	77.1996
522.8131	516.1245	425.3784	368.7197	277.0524	63.7760
453.1459	447.3503	368.7197	319.6255	240.1966	55.3948
340.4323	336.0814	277.0524	240.1966	180.5683	41.8350
78.1891	77.1996	63.7760	55.3948	41.8350	10.2861