



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

FELIPE DA SILVA ZACARIAS

**Desenvolvimento de uma Modelagem
Experimental para Estimativa da Vida Útil
de um Pneu**

CAMPINAS
2021

FELIPE DA SILVA ZACARIAS

Desenvolvimento de uma Modelagem Experimental para Estimativa da Vida Útil de um Pneu

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO FELIPE DA SILVA ZACARIAS, E ORIENTADO PELA PROF.^a DR.^a LUDMILA CORRÊA DE ALKMIN E SILVA.

CAMPINAS
2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Zacarias, Felipe da Silva, 1983-
Z11d Desenvolvimento de uma modelagem experimental para estimativa da vida útil de um pneu / Felipe da Silva Zacarias. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Pneus - Desempenho. 2. Pneus. 3. Estimação de máxima verossimilhança. 4. Mínimos quadrados. 5. Confiabilidade. I. Silva, Ludmila Corrêa de Alkmin e, 1981-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Desenvolvimento de uma modelagem experimental para estimativa da vida útil de um pneu.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Development of an experimental model to estimate the service life of a tire

Palavras-chave em inglês:

Tires - Performance

Tires

Maximum likelihood estimation

Least squares

Reliability

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva [Orientador]

Hélio Fiori de Castro

Zilda de Castro Silveira

Data de defesa: 19-03-2021

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-7703-9403>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1043712102947566>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Desenvolvimento de uma Modelagem
Experimental para Estimativa da Vida Útil
de um Pneu**

Autor: Felipe da Silva Zacarias

Orientadora: Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo:

Prof. Dr. Hélio Fiori de Castro

Instituição: Departamento de Engenharia Mecânica FEM - UNICAMP

Prof. Dra. Zilda de Castro Silveira

Instituição: Departamento de Engenharia Mecânica (SEM), EESC -USP

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 15 de Fevereiro de 2021.

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos que de alguma forma me ajudaram, em especial a minha família, minha esposa e minha filha por todo o apoio dado, pela paciência e compreensão para que este trabalho fosse concluído.

Agradecimentos

Dificuldades e barreiras surgem em nosso caminho ao longo de nossas vidas, muitos são os obstáculos encontrados, os quais são suplantados com muito esforço e trabalho e é nessa hora que podemos contar com o apoio dos amigos, que não possuem interesse algum além de ajudar.

Desta forma, inicio os meus agradecimentos à Deus por me guiar ao longo dos últimos 5 anos, principalmente no momento do nascimento da minha filha, a maior alegria da minha vida.

A minha orientadora professora doutora Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva, que sempre apoiou, ajudou e incentivou durante a conclusão das disciplinas e elaboração deste trabalho.

Agradeço ao professor Franco Dedini pela aprovação e indicação no início do mestrado a professora Ludmila, permitindo que minha vida acadêmica iniciasse e apresentando grandes ideias durante as discussões no Laboratório de Sistemas Integrados (LabSIn).

Agradeço a todos meus colegas e amigos do (LabSIn), em especial ao Rodrigo Yamashita e ao Fabrício Silva por me ensinar e ajudar nas disciplinas obrigatórias e pelas leituras críticas deste trabalho, pela paciência e ótima monitoria e orientação, tornando possível a elaboração e conclusão deste trabalho.

Ao meu amigo Jefferson Silva, que me orientou nas questões específicas dos diferentes tipos de elastômeros e sílica e nas discussões de fabricação de pneus e suas funções.

Por fim, finalizo os meus agradecimentos à minha esposa e melhor amiga Ana Carolina e em especial a minha filha Maria Luiza, que mesmo muito pequena, apenas com 4 anos de idade compreendeu a necessidade da minha ausência em alguns momentos. Meus agradecimentos sinceros. Sem vocês nada disso seria possível!

*“If I have seen further than others, it is by
standing upon the shoulders of giants.”*

Sir Isaac Newton

Resumo

ZACARIAS, Felipe da Silva, Desenvolvimento de uma Modelagem Experimental para Estimativa da Vida Útil de um Pneu. 2021. 174p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP.

Este trabalho visa o desenvolvimento de uma modelagem experimental, com a implementação de métodos estatísticos de mínimos quadrados e máxima verossimilhança em um software utilizando ajuste linear e exponencial, para a estimativa da vida útil de pneus de veículos de passeio. O pneu desempenha funções essenciais como: garantir a dirigibilidade do veículo, segurança e bom desempenho. Atualmente, um dos requisitos dos fabricantes de veículos é a prova da durabilidade real ou da vida útil do pneu, tendo em vista, que os fabricantes de pneus investem tempo e dinheiro para garantir que os testes de durabilidade e vida útil sejam feitos em seus novos produtos. Nos modelos atuais, empresas que executam testes de durabilidade de pneus utilizam um modelo matemático de extrapolação para estimar a vida útil do pneu. Contudo, para atingir este objetivo é necessário rodar os pneus até que o seu indicador de desgaste (TWI) tenha sido alcançado, para tal, pode-se necessitar uma quilometragem superior ou igual a 40000 km. Medições intermediárias do desgaste do pneu são feitas a cada 5000 km e projeções intermediárias são obtidas a cada medição, para estimar a vida útil do pneu. Esse teste pode levar pelo menos nove semanas gerando um alto custo. Assim, este trabalho tem como objetivo estimar a vida útil do pneu empregando modelos estatísticos não lineares como Mínimos Quadrados e Máxima Verossimilhança, visando obter uma maior precisão dos resultados obtidos, uma vez que o elastômero apresenta comportamento não linear, garantindo redução de custos, tais como galões de combustível e recursos humanos.

Palavras-chave: Desgaste de pneu, contato pneu-pavimento, TWI, confiabilidade, mínimos quadrados, máxima verossimilhança, métodos estatísticos não lineares.

Abstract

This work aims to develop an experimental model, with the implementation of statistical methods of least squares and maximum likelihood in software using linear and exponential adjustment, to estimate the service life of a passenger car tire. The tire is a complex product, built with different types of components that utilize a large variety of raw materials. Besides that, tires perform essential functions to ensure the vehicle's drivability, safety, and good performance. Nowadays, one of the car manufacturer requirements is the proof of the real durability or tire's service life, thus, tire manufacturers are investing time and money to ensure that durability and service life tests are being done in their new products. In current models, companies that execute tire durability tests, use a linear mathematical model to estimate the tire's service life. However, to achieve this goal, it is necessary to run the tires until its tread wear indicator (TWI) has been reached, where it may take a mileage higher or equal to 40000 km. Intermediary measurements of the tread wear are done every 5000 km to be used in the mathematical model to estimate the tire life. This kind of test can take at least nine weeks having a high cost. This work aims to estimate the tire service life, employing non-linear mathematical models as Maximum Likelihood and Least Squares, aiming to obtain higher reliability of the results obtained, since the rubber shows a non-linear behavior, thus ensuring a cost reduction, such as gallons of fuel and human resources.

Keywords: Tread wear, tire contact, TWI, reliability, least squares, maximum likelihood, nonlinear statistical method.

Lista de Ilustrações

Figura 1: Extração do látex da seringueira (Arquivo pessoal).....	22
Figura 2: Nomenclatura de um pneu comercial (Arquivo pessoal).....	26
Figura 3: Fórmula de Poli isopreno (Adaptado de Gent, 2012).....	29
Figura 4: Componentes de um pneu e suas funções (Arquivo pessoal).....	31
Figura 5: Estrutura de um pneu diagonal (Adaptado de Jazar, 2008).....	32
Figura 6: Contato de um pneu diagonal com o solo (Adaptado de Jazar, 2008).....	33
Figura 7: Estrutura de um pneu radial (Adaptado de Jazar, 2008).....	34
Figura 8: Contato de um pneu radial com o solo (Adaptado de Jazar, 2008).....	34
Figura 9: Banda de rodagem de um pneu (Arquivo pessoal).....	36
Figura 10: Tamanho da partícula vs. Área superficial (Arquivo pessoal).....	41
Figura 11: Ilustração do fenômeno aquaplanagem (Jazar, 2008).....	43
Figura 12: Ilustração do footprint de um pneu (Arquivo pessoal).....	44
Figura 13: Desgaste dos blocos dos pneus (Luk et al., 2017).....	46
Figura 14: <i>Footprint</i> medido e calculado (Becker e Seifert, 1997).....	51
Figura 15: <i>Footprint</i> estático e ao esterçar (Ghoreishy 2008).....	54
Figura 16: Modelagem de pneu para diferentes condições (Yang et. al., 2016).....	55
Figura 17: Comparação entre testes internos e simulações (Cho e Jung, 2006).....	57
Figura 18: Medição do pneu realizada a cada 90 graus (Arquivo pessoal).....	64
Figura 19: Pontos de medição dos sulcos (Arquivo pessoal).....	64
Figura 20: Profundímetro digital (Arquivo pessoal).....	65
Figura 21: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência.....	70
Figura 22: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos.....	71
Figura 23: Exemplo de veículo utilizado nos testes (Arquivo pessoal).....	74
Figura 24: Pneu no estado novo (Arquivo pessoal).....	76
Figura 25: Pneus após a distância de 57354 km percorridos (Arquivo pessoal).....	77
Figura 26: Pegadas do Pneu Dianteiro Direito (DD) ao Solo (Arquivo pessoal).....	78
Figura 27: Pegadas do Pneu Traseiro Direito (TD) ao Solo (Arquivo pessoal).....	79
Figura 28: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus do carro 1.....	80
Figura 29: Um exemplo de cambagem positiva e negativa de um carro (Jazar, 2008).....	81
Figura 30: Distância total percorrida.....	82
Figura 31: Comparação do Método Proposto e da Extrapolação Utilizado pela EC.....	84

Figura 32: Equação da reta (Adaptado de Venturi, 2015).	87
Figura 33: Esquema ilustrativo da regressão Linear (Adaptado de Charnet et al., 2008).....	91
Figura 34: Diagrama de dispersão (Adaptado de Montgomery et al., 2013).	94
Figura 35: Relação entre o tamanho da amostra e o erro amostral (Arquivo pessoal).	104
Figura 36: Fluxograma do modelo estatístico de Mínimos Quadrados.	107
Figura 37: Fluxograma do modelo estatístico de Máxima Verossimilhança.	109
Figura 38: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência.	113
Figura 39: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos.....	114
Figura 40: Imagem do <i>footprint</i> dos pneus de referência (Arquivo pessoal).	115
Figura 41: Imagem do footprint dos pneus propostos (Arquivo pessoal).	116
Figura 42: Ambiente criado em um software (Arquivo pessoal).	117
Figura 43: Projeção da vida útil dos pneus de testes (Arquivo pessoal).	118
Figura 44: Comparação entre o método atual e métodos propostos.	121
Figura 45: Comparação do Ajuste Linear pelo Método de Mínimos Quadrados e da Extrapolação Utilizada pela EC.	123
Figura 46: Comparação do Ajuste Linear pelo Método da Máxima Verossimilhança e da Extrapolação Utilizada pela EC.	124
Figura 47: Comparação do Ajuste Exponencial pelo Método de Mínimos Quadrados e da Extrapolação Utilizada pela EC.	125
Figura 48: Comparação do Ajuste Exponencial pelo Método da Máxima Verossimilhança e da Extrapolação Utilizada pela EC.	126
Figura 49: Triângulo mágico dos pneus (Arquivo pessoal).	159
Figura 50: Curva reométrica de uma mistura genérica de elastômero (Rocha et al., 2003).	161

Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros de sensibilidade do desgaste do pneu.....	48
Tabela 2: Profundidade dos sulcos dos pneus de referência novos ou 0 km	66
Tabela 3: Profundidade dos sulcos dos pneus propostos novos ou 0 km.....	66
Tabela 4: Profundidade dos sulcos dos pneus de referência após 30000 km percorridos.....	67
Tabela 5: Profundidade dos sulcos dos pneus propostos após 30000 km percorridos.....	68
Tabela 6: Projeção da vida útil dos pneus após 30000 km.	72
Tabela 7: Profundidade dos sulcos dos pneus novos ou 0 km.	75
Tabela 8: Profundidade dos sulcos dos pneus após 12000 km percorridos.	75
Tabela 9: Comparação dos resultados da EC e cálculo da equação da reta.	88
Tabela 10: Dados da equação da reta nos cálculos das projeções.....	89
Tabela 11: Valores críticos associados ao grau de confiança na amostra (Meeker et al., 1998).	105
Tabela 12: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência novos ou 0 km	111
Tabela 13: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos novos ou 0 km.....	111
Tabela 14: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência em 12000 km.	112
Tabela 15: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos em 12000 km.	112
Tabela 16: Comparação de consumo de combustível entre os métodos	120
Tabela 17: Comparação entre os Métodos de Ajuste de Curvas.....	127
Tabela 18: Comparação entre os dados utilizados na Estimativa da Vida Útil de um Pneu.....	129
Tabela 19: Escala de graduação (Lindén, 2003).	164

Lista de Abreviaturas e Siglas

<i>Abreviações</i>	<i>Descrições</i>
A.C.	Antes de Cristo
ALAPA	Associação Latino Americana de Pneus e Aros
ALE	Arbitrariedade Lagrangiana Euleriana
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CG	Centro de Gravidade
CNT	Confederação Nacional de Transportes
D	Diagonal
DD	Dianteiro Direito
DE	Dianteiro Esquerdo
EC	Empresa Comercial
FFT	Transformada Rápida de Fourier
GNV	Gás Natural Veicular
GPS	Sistema de Posicionamento Global
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	Organização Internacional de Normalização
NVH	Noise, Vibration, Harshness
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PSD	Densidade Espectral de Potência
R	Radial
RBC	Rede brasileira de Calibração
RR	Resistência ao Rolamento
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
SBR	Styrene-Butadiene Rubber
TD	Traseiro Direito
TE	Traseiro Esquerdo
TWI	Tire Wear Indicator

Lista de Símbolos

<i>Símbolos</i>	<i>Descrições</i>
x, y, z	Direções ortogonais
175/70R13	Dimensões de um pneu (175 Largura mm, 70 Relação entre a altura do flanco e a largura da seção, R Tipo de construção e 13 Diâmetro do pneu)
SiO_2	Dióxido de silício
Na_2CO_3	Carbonato de sódio
δ	Elétron
O	Oxigênio
H	Hidrogênio
pH	Potencial hidrogeniônico
F	Carga
R_{eff}	Raio de rolagem efetivo do pneu
N_{rev}	Número de revoluções do pneu na distância percorrida
a, b	Parâmetros desconhecidos da reta
A, B, C, D, E	Pontos de medição do pneu localizado lateralmente ao longo da banda de rodagem

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivo do trabalho.....	18
1.2 Apresentação do trabalho.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Descoberta e Evolução do Elastômero.....	20
2.2 Funções de um Pneu	25
2.2.1 Suportar.....	26
2.2.2 Girar.....	27
2.2.3 Transmitir.....	27
2.2.4 Amortecer	28
2.2.5 Guiar	29
2.2 Estrutura de um Pneu	29
2.2.1 Elastômero Interno.....	31
2.2.2 Lona Carcaça	32
2.2.3 Lonas de Topo	35
2.2.4 Banda de rodagem	35
2.2.5 Aros.....	37
2.2.6 Zona baixa.....	37
2.2.7 Flancos	38
2.2.8 Compostos Químicos de uma Banda de Rodagem de Um Pneu	38
2.3 Métodos para Análise de desgaste de Pneus	44
2.3.1 Sistema e Método de Previsão de Desgaste de Pneus.....	45
2.3.2 Métodos de Elementos Finitos para Previsão de Desgaste de Pneus	47
2.3.3 Métodos Estatísticos para Previsão de Desgaste de Pneus	58
3 TESTE DE DURABILIDADE DE UMA EMPRESA COMERCIAL.....	60
3.1 Metodologia Experimental dos Testes Controlados (<i>Captive</i>)	62
3.2 Resultado Experimental dos Testes Controlados (<i>Captive</i>).....	65
3.3 Metodologia Experimental dos Testes de Campo (<i>Focus</i>)	72
3.4 Resultado Experimental dos Testes de Campo (<i>Focus</i>).....	74
3.5 Determinação do Método de Estimativa da Vida Útil do Pneu Utilizado por uma Empresa Comercial.....	85

4 MATERIAS E MÉTODOS.....	90
4.1 Métodos de Ajuste de Curvas	91
4.1.1 Regressão Linear Simples.....	91
4.1.2 Método de Mínimos Quadrados.....	95
4.1.3 Método da Máxima Verossimilhança	101
4.1.4 Determinação do Número de Amostras no Experimento	104
4.2 Implementação da Metodologia Proposta.....	106
4.2.1 Implementação do Algoritmo de Mínimos Quadrados.....	106
4.2.2 Implementação do Algoritmo de Máxima Verossimilhança	108
4.2.3 Implementação da Metodologia de Teste Aplicada.....	110
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	119
5.1 Resultados obtidos com a Metodologia Proposta	119
5.2 Ajuste Linear pelo Método dos Mínimos Quadrados	122
5.3 Ajuste Linear pelo Método da Máxima Verossimilhança.....	123
5.4 Ajuste Exponencial pelo Método dos Mínimos Quadrados.....	125
5.5 Ajuste Exponencial pelo Método da Máxima Verossimilhança	126
5.6 Comparação Entre os Métodos	127
6 CONCLUSÃO	128
6.1 Trabalhos Futuros	130
REFERÊNCIAS.....	131
APÊNDICE A - Medições de Profundidade dos Sulcos dos Pneus de Referência	
185/65R15 e os Pneus Propostos 195/55R16.....	136
APÊNDICE B - Medições de Profundidade dos Sulcos dos Pneus com Características	
195/65R15 Utilizados nos Veículos	146
APÊNDICE C - Medições de Profundidade dos Sulcos dos Pneus de Referência	
185/65R15 e os Pneus Propostos 195/55R16	149
APÊNDICE D - Medições de Profundidade dos Sulcos dos Pneus com Características	
195/65R15 Utilizados nos Veículos	155
APÊNDICE E - Compostos Químicos e Funções da Banda de Rodagem de Um Pneu	158
E.1 Sílica.....	158
E.2 Agente Vulcanizante.....	159
E.3 Ruído, Vibração e Aspereza (NVH – Noise, Vibration and Harshness)	161

1 INTRODUÇÃO

Durante o desenvolvimento de pneus, um dos testes solicitados pelos fabricantes de veículos é o teste de desgaste de pneus, em inglês *tread wear test*. No qual é apresentado o desempenho e a estimativa da vida útil de um pneu. Com isso, é indispensável formas de se analisar este teste com menor custo e tempo no decorrer dos ensaios.

Cada vez mais se aumenta o nível de exigência, com os clientes desejando rodar mais com seus pneus, existindo assim a necessidade de grandes investimentos por parte da indústria pneumática em desenvolvimento de melhores compostos de elastômeros, que irão proporcionar esse acúmulo de quilometragem.

Os pneus são os únicos pontos de contato do carro com a pista, sendo um item de extrema importância no que diz respeito a segurança do veículo. Apesar do Brasil aplicar leis de controle e multas para condutores que utilizam veículos com pneus com desgaste avançado, é muito comum identificar essa situação em rodovias públicas e ruas dos grandes centros.

No ano de 2009, em Moscou, foi realizada uma reunião conjunta entre a Organização das Nações Unidas (ONU, 2009) e a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2009), com participação de centenas de países para o levantamento das principais causas de mortes no mundo. O resultado dessa reunião apontou que, morrem no mundo cerca de 1,2 milhões de pessoas todos os anos em razão da violência do trânsito, enquanto entre 20 a 50 milhões de pessoas apenas se ferem. Segundo a CNT (Confederação Nacional de Transportes), nas rodovias federais policiadas, no período de 2007 a 2017, ocorreram 1.652.403 acidentes, uma média de 411,3 acidentes por dia, envolvendo um total de 3.573.295 vítimas, deixando 1.040.095 pessoas feridas gravemente ou levemente e 83.481 mortos, uma média de 20,8 mortos por dia. Em 2017, o Brasil registou 58.716 acidentes em rodovias federais, os pneus tiveram uma participação aproximada de 3.472 acidentes, com uma parcela de 5,9% (no total dos acidentes registrados). Pois ainda no Brasil, alguns acidentes não são registrados. Estimativas apresentam um custo aproximado de R\$ 10 bilhões ao ano decorrentes destes acidentes (CNT, 2018).

1.1 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma modelagem experimental, com a implementação de métodos estatísticos de mínimos quadrados e máxima verossimilhança, em um software utilizando ajuste linear e exponencial para a estimativa da vida útil de um pneu. Este software apresenta o modo de desgaste do pneu, a pegada ao solo e a estimativa da vida útil de um pneu.

Foi desenvolvido juntamente com a parte da modelagem experimental, uma nova metodologia de teste, visando otimizar os custos e tempo de teste.

Logo este trabalho tem como objetivos específicos:

- Revisão dos métodos de ajuste de curvas;
- Determinar o método de previsão do desgaste de pneus utilizado pelas empresas comerciais;
- Implementar métodos de ajuste de curvas para prever o desgaste do pneu;
- Comparar os métodos de ajuste de curvas com o método utilizado pelas empresas comerciais;
- Propor uma metodologia experimental para previsão do desgaste do pneu.

1.2 Apresentação do trabalho

O polímero usado na fabricação dos pneus, faz parte de uma classe conhecida como Elastômero. O elastômero é um material com comportamento não linear, e seu desgaste também é não linear, por isso, se faz necessário a aplicação de modelos estatísticos mais apropriados para a estimativa do desgaste (Rippel, 2005). Os modelos de Mínimos Quadrados e Máxima Verossimilhança foram implementados em um software e foram utilizados dados coletados diretamente de pneus em testes para validar o software e estimar a vida final dos pneus.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica, uma breve introdução da descoberta e evolução do elastômero utilizado na fabricação dos pneus até o dia de hoje.

Conceitos, definições e estrutura de um pneu também são descritos no capítulo 2. Os pneus quando estão em serviço, funcionam como um filtro de irregularidades do solo. Portanto, os pneus também desempenham outras funções essenciais como: garantir o bom desempenho, segurança e dirigibilidade do carro. Suas principais funções são: *suportar* o peso do veículo, *rodar* de forma segura e confortável, *transmitir* as forças de aceleração e frenagem, *amortecer* as irregularidades dos diferentes tipos de pavimento e *guiar* e obedecer aos comandos do condutor.

O pneu é formado por diferentes tipos de materiais e sua estrutura básica é composta por vários componentes, como: elastômero interno, lona carcaça, lonas de topo, banda de rodagem, aros, zona baixa (talão) e flancos.

Este trabalho apresenta ainda no capítulo 2 uma revisão bibliográfica sobre desgaste de pneus, onde são demonstradas diferentes metodologias aplicadas para análise de desgaste, métodos de ensaios e estudos aplicados. Também apresenta a descoberta e evolução dos elastômeros utilizados na fabricação de um pneu e suas funções quando parado ou em movimento.

No capítulo 3, são apresentados os testes de durabilidade, metodologias e resultados dos testes realizados por uma empresa comercial e especializada em durabilidade de pneus, bem como a metodologia experimental e resultados da aplicação dos modelos propostos neste trabalho.

O capítulo 4 apresenta os métodos de ajustes de curvas aplicados neste trabalho. Métodos estatísticos que podem ser aplicados em testes de rodagem de pneus com o objetivo da estimativa da vida útil dos pneus e também apresenta a determinação do número de amostras ou número mínimo de pneus a serem utilizados nos testes, para garantir a precisão dos resultados estimados.

O capítulo 5 apresenta os resultados alcançados com os diferentes métodos estatísticos propostos neste trabalho. Além disso é apresentada uma comparação entre os métodos estatísticos e os resultados encontrados.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões que podem ser retiradas deste trabalho e possíveis melhorias e sugestões para sua continuidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica proposta neste capítulo, consiste em um resumo da descoberta do elastômero e da sua evolução, principalmente quando utilizado na fabricação de pneus e até permitindo que as diversas características de uso e de métodos possam determinar a melhor maneira do elastômero ser aplicado.

2.1 Descoberta e Evolução do Elastômero

A história do automóvel tem início por volta de 1769, com a criação do motor a vapor de automóveis capazes de transportar humanos. Em 1807, os primeiros carros movidos por um motor de combustão interna a gás combustível apareceram, o que levou à introdução em 1885 do moderno motor a gasolina ou com combustão a gasolina onipresente interno. O ano de 1886 é considerado o ano de nascimento do automóvel Benz Patent-Motorwagen, criado pelo inventor alemão Karl Benz. O início da história do automóvel pode ser dividido em eras, o das invenções, o da modernização e a atual. Ferdinand Verbiest, um membro de uma missão jesuíta na China, por exemplo, construiu o primeiro veículo movido a vapor por volta de 1672, tratava-se de uma espécie de brinquedo para o Imperador da China. Enquanto Nicolas-Joseph Cugnot demonstrou sua *fardier à vapeur* ("carroça a vapor") como se fosse um trator de artilharia movido a vapor experimental, em 1770 e 1771. Os motores a vapor - que queimavam o combustível fora dos cilindros, deram lugar aos motores de combustão interna, que queimavam no interior do cilindro uma mistura de ar e gás de iluminação. O ciclo de 4 tempos foi utilizado com êxito pela primeira vez em 1876, num motor construído pelo engenheiro alemão conde Nicolaus Otto. A primeira patente do automóvel nos Estados Unidos da América foi concedida a Oliver Evans, em 1789. Mais tarde, em 1804, Evans demonstrou o seu primeiro veículo automóvel que não só foi o primeiro automóvel nos EUA mas também o primeiro veículo anfíbio, já que este veículo a vapor dispunha de rodas para circulação terrestre e de pás para circulação na água como um barco a vapor. Contudo, não há como negar que o automóvel surgiu e modificou a história do mundo. Com ele, o homem ganhou maior liberdade de movimento e conseguiu realizar muitas atividades impossíveis anteriormente, como percorrer

centenas de quilômetros em poucas horas (International Institute of Synthetic Rubber Producers Inc., Holanda. 1973).

Na época de sua criação ele foi considerado por Henry Ford inicialmente como um brinquedo para ricos e, logo depois, “o cavalo da família”. O acesso aos carros, chegou depois dos anos 1950.

A evolução do pneu não foi diferente do automóvel e também passou por etapas. Mas antes da chegada do pneu, é preciso citar uma das grandes invenções do homem, a roda. Criada para a locomoção do homem e de cargas, no entanto, no início era muito rudimentar. Há 3500 a.C em Ur na Mesopotâmia, encontramos a primeira representação de uma carroça com rodas de madeira maciça, na China em 2000 a.C, as rodas com raios passaram a ser empregadas em carruagens e carroças e há 1000 a.C na Europa Ocidental. As utilizadas em carroças eram cobertas com uma chapa de metal, o que aumentava sua resistência e durabilidade (Anthony, 2007).

Por volta dos anos 1839, Charles Goodyear após diversos experimentos para aprimorar as propriedades do elastômero, descobriu por acidente, o processo de vulcanização, tornando o elastômero mais resistente, permitindo aplicá-lo em diversas situações que necessitem de um material elástico (Hage, 1998). Goodyear descobriu que uma mistura de elastômero com enxofre exposto ao calor e ao chumbo permitia que todas as propriedades do elastômero fossem otimizados para a utilização industrial, conferindo maior resistência mecânica, resistência à dilatação e maior elasticidade. Com isso, Goodyear patenteava a revolucionária invenção em 15 de junho de 1844. Goodyear conseguiu resolver um desafio, pois o elastômero utilizado no início do século 18 apresentava dois grandes problemas: dificuldade para ser trabalhado de maneira sólida e, por outro lado, os artefatos se tornavam moles e pegajosos quando submetidos ao calor. Em tempo frio, por exemplo, tornava-se progressivamente rígido, até que no rigor do inverno, quase completamente inflexíveis. Ademais, desenvolviam odores desagradáveis após em um curto período de tempo. Para melhorar o elastômero e deixá-lo propício para ser usado em diversas finalidades, o elastômero precisava então ser vulcanizado.

O processo criado por Goodyear consiste apenas na adição de enxofre na composição da borracha, que ao ser levado a altas temperaturas, gera ligações cruzadas (*cross-link*) entre as cadeias do polímero. Isso confere maior rigidez e tenacidade (garante sua elasticidade). Temperatura e pressão foi descoberto mais tarde para acelerar esse processo. A patente afirma que o elastômero "terá alterado suas qualidades de forma a não ficarem amolecidas pela ação do raio solar ou do calor artificial... nem serão deteriorados pela exposição ao frio." O nome vulcanização é em homenagem ao Vulcano, o Deus romano do fogo, significando a patente

tanto no sentido do calor como no do enxofre que é de origem vulcânica onde ambos estão envolvidos na reação. Até os dias de hoje o processo é utilizado na indústria.

O elastômero natural é obtido do látex da *Hevea brasiliensis* (Figura 1), comumente conhecida como seringueira, árvore nativa das Américas. O termo látex vem do latim *latice*, que é utilizado na forma singular e *látice* na forma plural. O látex está presente em cerca de 200 espécies de plantas, sendo a *Hevea brasiliensis* produtora aproximadamente de 99% da produção mundial do elastômero natural, nenhuma outra planta é tão eficiente na produção de látex quanto a seringueira (Rippel, 2005). O interesse da indústria pneumática na utilização do elastômero natural na fabricação de pneus é nítido, devido às suas características únicas em comparação aos polímeros sintéticos, como: elasticidade, flexibilidade, resistência à abrasão e à corrosão, fácil adesão a tecidos e ao aço, além também da impermeabilidade (Rippel, 2005).



Figura 1: Extração do látex da seringueira (Arquivo pessoal).

No século XVI, os europeus conheceram o elastômero natural, que já era usado pelos índios no Brasil e no México, que praticavam jogos com bolas elásticas, portavam calçados e peças de vestuário impermeável à água, essa prática foi observada pelo historiador italiano P. d'Anghieria em 1525, que escreveu suas primeiras histórias nas Américas Central e do Sul. No entanto, Charles de la Condamine foi o primeiro a fazer um estudo científico sobre o elastômero, que ele conhecera durante uma viagem ao Peru, em 1735. Essa viagem o levou ao conhecimento de vários tipos de árvores, nas quais uma pequena incisão no caule possibilitava a obtenção do látex. Uma espécie descoberta por C. F. Fresnau nas Guianas foi dado o nome de *Hevea huianensis* e a variedade predominante no Brasil, *Hevea brasiliensis*. Fresnau, estudara o elastômero no local e concluíra que esta não era senão “uma espécie de óleo resinoso condensado” (Bazzon, 2009).

O primeiro emprego do elastômero foi como apagador. Foi Magellan, descendente de célebre navegador, quem propôs este uso. Mas foi Joseph Priestley, um famoso químico inglês, que na Inglaterra difundiu o elastômero como apagador, recebendo o nome em inglês "India Rubber", que significa "Borracha da Índia". A palavra borracha teve sua origem numa das primeiras aplicações úteis deste produto, dada pelos portugueses, quando foi utilizada para a fabricação de botijas, em substituição as chamadas borrachas de couro, que os portugueses usavam no transporte de vinhos (Bazzon, 2009).

No ano de 1768, o elastômero torna-se utilizável, através da descoberta dos químicos franceses Herissant e Macquer. A descoberta feita por eles foi a solubilidade do elastômero com adição de essência de terebentina, esse estudo abre caminho para o processamento do látex, e em 1819, Thomas Hancock percebe que trabalhando a matéria-prima é possível obter uma massa pastosa e plástica. A adição de certos produtos permite a sua laminação, sendo um primeiro passo importante na fabricação do elastômero. Esta descoberta permitiu a utilização do elastômero em solução na impregnação de tecidos, tornando-os impermeáveis à água, sendo então utilizados na confecção de peças de vestuário, em processos desenvolvidos pelo inglês Samuel Peal e pelo francês Bessom, em 1793, e pelo americano Champion, em 1811, processo mais tarde aperfeiçoado pelo escocês Mac Intosh, na data de 1823. Mas a grande desvantagem do elastômero, era que se tornava pegajoso com tempo quente e duro e quebradiço em tempos frios (Bazzon, 2009).

No ano de 1839, a vulcanização é descoberta por Charles Goodyear. É a solução através do desenvolvimento do processo de vulcanização, ação do calor dentro de uma mistura de elastômero e enxofre, que dá as propriedades elásticas do elastômero. Toda essa conjuntura possibilitou que, no século XIX, o uso do elastômero aumentasse rapidamente. Suas qualidades

intrínsecas: maleabilidade, elasticidade, alta resistência mecânica, aderência em qualquer superfície, fez com que o elastômero se tornasse um material indispensável na indústria de pneus.

Em 1845, o engenheiro de Robert W. Thomson inventou o primeiro pneumático que combina a elasticidade do elastômero, que serve como um invólucro exterior e o ar aprisionado em vários tubos de elastômeros.

Em 1888, John Boyle Dunlop imagina uma roda, que combina tecido, elastômero, couro e ar. O pneu ainda não era da forma como conhecemos hoje, sua reparação era muito longa, no entanto, permitia a aplicação imediata para bicicletas, carruagens e veículos automotores, foi um grande sucesso para a época. A invenção foi patenteada em 1888 e, em 1890, em parceria com W. H. Du Cross, começaram a produção comercial.

Em 1891, os irmãos André e Edouard Michelin criaram o pneu removível. Esta é a origem do pneu como é conhecido hoje. Esse pneu é significativamente superior ao modelo anterior e com maior facilidade de uso, é possível sua montagem e desmontagem rapidamente. Esta invenção é aplicada pela primeira vez à bicicleta devido ao baixo peso, em seguida, os irmãos Michelin passaram rapidamente para pneus de veículos automotores. Em 1895, eles enfrentam um desafio com seus pneus de automóvel, a corrida Paris-Bordeaux-Paris, um veículo que eles próprios projetaram e fabricaram "L'Éclair", traduzindo, o raio, assim chamado por causa de uma falha de direção que o faz ziguezaguear. Apesar de muitas dificuldades durante a corrida, L'Éclair chega ao tempo necessário e publicamente demonstra o interesse desta invenção histórica, o pneu de automóvel, o que permitirá que o carro percorra em todas as direções com uma rapidez elevada (International Institute of Synthetic Rubber Producers Inc., Holanda. 1973).

O pneu absorve os obstáculos das ruas, a mecânica dos veículos e os passageiros são isolados das discontinuidades nas pistas encontradas no percurso. A partir do desenvolvimento desta tecnologia, os veículos puderam passar a barreira de 30 km/h, até então um desafio.

Em 1898, um carro elétrico "La Jamais Contente", equipado com pneus Michelin cujo diâmetro pequeno abaixa o centro de gravidade do veículo, atravessado pela primeira vez na história da indústria automotiva, a parede dos 100km/h. Além do entusiasmo coletivo que geram as competições, sempre desempenhou um papel importante no desenvolvimento do pneu. Entre os anos de 1900 a 1911, o pneu Michelin foi usado em todos os eventos automotivos, na maioria das vezes na liderança e já demonstrou a sua tecnologia para a competição (Bazzon, 2009).

No ano de 1918, os pneus são padronizados. Eles agora incluem aros, negro de fumo e cabos têxteis (Bazzon, 2009).

Hoje, corridas de Fórmula 1 e os *Rallys* são sempre vitrine técnica extrema da tecnologia aplicada nos pneus. Foram desenvolvidos poderes excepcionais para os veículos de competição, o pneu de corrida será empurrado para níveis extremos para acompanhar toda essa força e evolução (Bazzon, 2009).

2.2 Funções de um Pneu

O pneu é um produto complexo e de alta tecnologia, formado por vários componentes que utilizam uma grande variedade de matérias primas. Na maioria das aplicações, é inflado com gases, em algumas aplicações específicas, como por exemplo em máquinas agrícolas, pode ser parcialmente preenchido com água, para melhorar a tração e reduzir o escorregamento. Os pneus são os únicos pontos de contato entre o veículo e a pista, sendo assim um componente do veículo fundamental para a segurança do condutor e dos passageiros (NHTSA, 2006).

A nomenclatura de um pneu comercial é dada como 175/70R13. Essa nomenclatura corresponde as características dimensionais do pneu, que são lidas da seguinte forma: 175 corresponde à largura do pneu em mm, 70 indica a relação entre a altura do flanco e a largura da seção do pneu, R corresponde ao tipo de construção e 13 o diâmetro do pneu. Neste exemplo, a altura do flanco corresponde a 70% da largura do pneu. Quanto menor a proporção de elevação do pneu, menor a altura do flanco. A letra R trata-se da construção interna do pneu, indica que a construção é radial (R) ou diagonal (D) e 13 o diâmetro interno do pneu em polegadas. Como exemplo temos a Figura 2, onde ilustramos um pneu 175/70R13 vendido comercialmente (ALAPA, 2018).



Figura 2: Nomenclatura de um pneu comercial (Arquivo pessoal).

Segundo Gillespie (1992), o contato pneu-pavimento é fundamental para a transmissão de potência, controle e estabilidade do veículo em funcionamento. Os pneus além de estarem em contato direto com o solo, suportam todo o peso e carga do veículo e funcionam como um filtro de irregularidades do solo. Além disso, eles desempenham outras funções essenciais para garantir o bom desempenho, segurança e dirigibilidade do carro. Suas principais funções serão apresentadas nas seções 2.2.1 até 2.2.5.

2.2.1 Suportar

Uma das funções do pneu é suportar a carga do veículo e de seus passageiros, parado ou em movimento. Também resistir às sobrecargas dinâmicas laterais, verticais e longitudinais produzidas em curvas, aclives e declives, aceleração e frenagem em diferentes tipos de pavimentos e condições ambientais (Gillespie, 1992).

Pneus com desgastes severos, são favoráveis a terem maior probabilidade de falhas quando comparados a pneus novos. Isto ocorre, porque com desgaste severo a construção interna do pneu está exposta a maior aquecimento por conta do binário carga e tração. Falhas em pneus gastos, são mais comuns em pneus de caminhões e ônibus devido a cargas elevadas nestes tipos veículos (Genta, 1997).

2.2.2 Girar

O movimento de rotação dos pneus deve ser feito de maneira regular, de forma mais segura e pelo maior tempo possível, com o maior prazer de condução aos ocupantes do veículo. Motoristas de veículos comerciais passam muitas horas dentro de caminhões e ônibus, fazendo com que os fabricantes de pneus se preocupem também com o conforto dos motoristas e passageiros, não somente para a manutenção da saúde, mas também como estabilizador da condição física dessas pessoas (Kubo et al., 2007).

O pneu tem um papel fundamental no isolamento de vibrações provenientes das irregularidades dos pavimentos. O ser humano pode apresentar tolerância a vibrações transferidas pelos diferentes tipos de pistas. Quanto maior o desgaste dos pneus, maior a transferência de excitações ao motorista e seus passageiros. Para maiores níveis de desgaste dos pneus, o resultado coincide com o movimento de rotação dos pneus de forma irregular, transmitindo menor conforto aos ocupantes do veículo. Quanto mais elastômeros na banda de rodagem do pneu, maior é o isolamento de irregularidades do solo e maior sua vida útil, ou seja, maior o tempo de serviço (ISO 2631).

2.2.3 Transmitir

O pneu é responsável por transmitir o comando do motorista em curvas e esforços de frenagem e aceleração. O termo de força de frenagem é originado do atrito dos pneus com o solo. Uma análise mais completa da desaceleração requer conhecimento detalhado da ação de todas as forças no veículo. O máximo desempenho da aceleração de um veículo no sentido longitudinal é determinado por dois limites: a potência disponível no motor e os limites de tração dos pneus. O limite que prevalece depende da velocidade do veículo. Em velocidades baixas, a tração dos pneus pode ser um fator limitante, enquanto que em velocidade mais elevadas, a potência do motor pode limitar a aceleração (Gillespie, 1992).

Pneus novos apresentam maior capacidade de tração, frenagem e dirigibilidade devido a maior sensibilidade aos comandos do motorista. No entanto, com alto nível de desgaste da banda de rodagem este comportamento é afetado, pois diminui a aderência entre os pneus e o solo. Essa característica ocorre porque a área de contato entre o pneu e a pista é reduzida. Esse

comportamento de perda de aderência entre o pneu e a pista é amplificado em pavimentos molhados, pois os sulcos dos pneus são reduzidos com o desgaste da banda de rodagem dificultando o escoamento da água (Jazar, 2008).

2.2.4 Amortecer

Segundo Perseguiim (2005), o pneu amortece vibrações e irregularidades do solo, além de proteger a mecânica dos veículos. O pneu é um produto complexo que transforma o sinal de excitação em outros sinais de vibração nas superfícies do veículo, com as quais o motorista está em contato. Apesar dos perfis de pistas serem as principais fontes de excitação ao se tratar de conforto (*ride*), existem outras fontes significativas, como as excitações de desbalanceamento e excentricidade dos conjuntos de rodas e pneus (*run-out*). As avaliações de *ride* englobam as componentes desses sinais com valores de frequência de até aproximadamente 25 Hz (ISO 2631).

O desempenho do veículo em movimento com relação as forças laterais, verticais e longitudinais, está associado ao movimento resultante da aplicação dos pneus ao solo. Quanto maior o desgaste da banda de rodagem, menor a aderência dos pneus ao pavimento, bem como o conforto, devido a redução da absorção das irregularidades do pavimento por conta da perda de elastômero da banda de rodagem. Desta forma, o efeito na capacidade do veículo de suportar solicitações é reduzido por conta do desgaste do pneu (Genta, 1997).

O pneu sofre deformações nas três direções, no eixo x (longitudinal), y (lateral) e no eixo z (vertical), no entanto, para avaliações de conforto é mais comum estudos no eixo z , onde é mais perceptível deformações nos pneus provenientes de irregularidades das pistas. Esta percepção é mais evidente quando os pneus estão mais gastos ou no final da vida útil. A pressão dos pneus também tem um papel muito importante na influência do conforto dos pneus, quanto maior a pressão, maior a rigidez do pneu (Jazar, 2008).

2.2.5 Guiar

O pneu também permite que o veículo tenha uma direção, estabilidade e dirigibilidade segura para o condutor e os passageiros, em qualquer tipo de solo e condições climáticas. A dirigibilidade é definida como a capacidade e habilidade do veículo sair de uma condição de movimento em regime permanente a outra desejada. A estabilidade é definida como a tendência decrescente das amplitudes do movimento perturbado de um veículo, após algum tempo do término da perturbação (Gillespie, 1992).

Pneus gastos ou comumente conhecidos como pneus “carecas”, têm a pegada ao solo reduzida devido ao desgaste da banda de rodagem. Com isso, a aderência é reduzida, em piso seco e mais evidente em piso molhado, devido a redução de contato com o piso e a dificuldade em escoar a água. Pneus gastos impactam diretamente na dirigibilidade do veículo e também podem provocar o fenômeno da aquaplanagem, quando o pneu perde o contato com o solo por falta da capacidade de escoar a água da pista (Jazar, 2008).

2.2 Estrutura de um Pneu

O pneu é um produto de alta tecnologia e diferentes componentes. A composição do elastômero varia num mesmo pneu. Os elastômeros são quimicamente classificados como polímeros. De uma forma geral os polímeros são formados por inúmeras moléculas de carbono e hidrogênio ligadas entre si. Os polímeros são compostos que possuem em sua cadeia, diversas repetições de uma estrutura conhecida como monômero. Por isso o nome polímero (do grego: *Poli* = várias; *meros* = partes), (Gent, 2012).

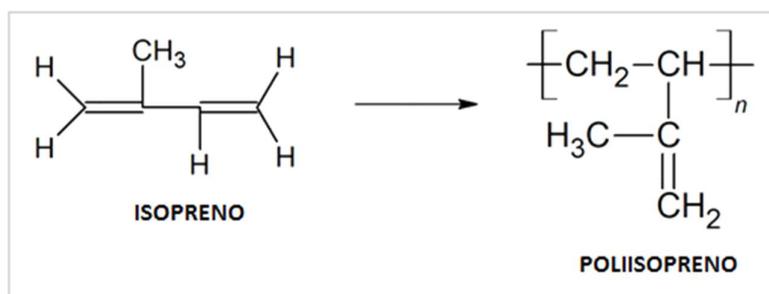


Figura 3: Fórmula de Poli isopreno (Adaptado de Gent, 2012).

Os elastômeros possuem uma elevada capacidade de alongação, atingindo até 200% do seu tamanho original sem apresentar ruptura. Contudo, sua alta viscoelasticidade devido a sua alta linearidade de cadeia, o impede de ser utilizado em muitas aplicações. O elastômero natural é um elastômero encontrado *in natura* nas *Hevea brasiliensis*, popularmente conhecida como seringueira ou árvore-da-borracha. O elastômero natural é obtida do látex da seringueira em geral com a seguinte composição: água (52% a 70 %), isopreno (27 % a 40 %), proteínas (1,6 % a 1,8 %), resinas (1,0 % a 1,7 %), açúcares / produtos minerais (0,7 % a 1.4 %). Ela é de extrema importância na fabricação dos pneus. Sua característica visco elástica torna seu processamento de fácil realização. Contudo, para a aplicação desejada, se faz necessário a realização de um processo conhecido como vulcanização. Isso se deve porque o elastômero em seu estado natural apresenta características como: alta viscoelasticidade e alta influência da temperatura em seu estado. Após o processo de vulcanização, ocorrem alterações em suas propriedades mecânicas e reológicas, tais como: aumento da resistência a fadiga e mecânica, além da diminuição da resistência ao envelhecimento. Sua reologia após a vulcanização se modifica. O elastômero apresenta transição de um estado visco elástico para um sólido elástico com o decorrer da reação de vulcanização (Rippel, 2005).

Como vimos anteriormente, o pneu é um produto de alta complexidade e contém muitos materiais em sua composição. O desenvolvimento de um novo produto leva em média 5 anos, muitas horas de engenharia no desenvolvimento e milhares de quilômetros rodados em testes para alcançar suas características e desempenhos pré-estabelecidos e desejados pelos fabricantes (Jung and Cho, 2006).

A Figura 4, apresenta um corte ou seção de um pneu de passeio do tipo radial, como é comumente conhecido na indústria pneumática, para mostrar os componentes de um pneu e suas funções. Suas diferentes cores são apenas para facilitar a visualização e diferenciar cada componente do pneu e suas funções.

A estrutura interna de um pneu não é impactada com o desgaste, diferentemente da escultura externa do pneu, mais precisamente a banda de rodagem. Durante a vida útil de um pneu, apenas a banda de rodagem sofre alteração estrutural, a perda de elastômero procedente do uso do pneu.

A pressão dos pneus influencia diretamente no modo de desgaste. Pneus com pressão alta ou acima do especificado pelo fabricante do veículo, apresentam desgaste na parte central da banda de rodagem. Já pneus com pressão inferior ao especificado, apresentam desgaste excessivo nos ombros (Jazar, 2008).

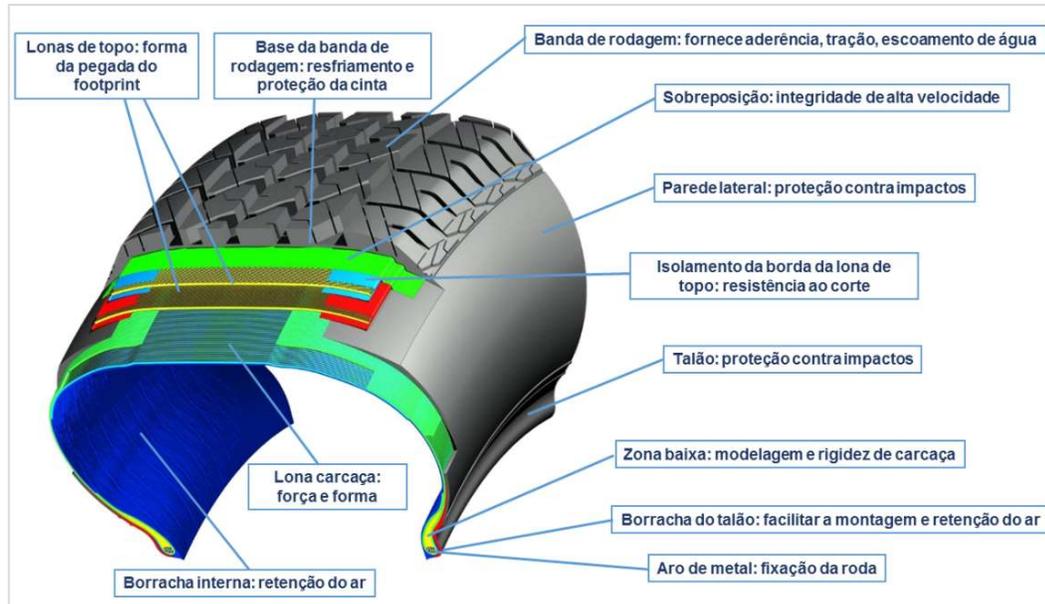


Figura 4: Componentes de um pneu e suas funções (Arquivo pessoal).

2.2.1 Elastômero Interno

Como dito anteriormente, o pneu é formado por diversas partes, uma delas é a goma interna ou elastômero interno, parte abordada neste item. A goma interna, tem função de estanqueidade do ar, ou seja, evitar que o ar escape de dentro do pneu. Esta camada encontra-se no interior do pneu e faz a função de câmara-de-ar em pneus radiais (Dick, 2001).

O elastômero butílico é o principal componente utilizado na fabricação da goma interna devido à grande impermeabilidade aos gases. Devido a sua baixa taxa de vulcanização é necessário o uso de componentes químicos conhecidos como aceleradores em sua composição. Sua presença só é permitida abaixo da napa carcaça devido a sua resistência a adesão a outros elastômeros. A adição de bromo no elastômero butílico melhora sua aderência antes da cura com outros elastômeros, além de aumentar ligeiramente a taxa de vulcanização e manter as propriedades do composto do elastômero. O elastômero interno do pneu não desgasta durante a vida do pneu (Gent, 2012).

2.2.2 Lona Carcaça

A Lona carcaça ou napa carcaça como é conhecida, é uma estrutura flexível formada por filamentos de nylon ou de aço revestidos com elastômero, que formam arcos e são fixados no talão do pneu. Sobre a carcaça são colocadas lonas e camadas de elastômeros que formam o pneu. Suas principais funções são, a estabilidade e conforto dos pneus, suportar a carga e a velocidade com ajuda da pressão de inflação. Existem alguns tipos de pneus, os mais conhecidos são os pneus diagonais e os radiais, esse último sendo o mais comum nos dias de hoje (Jazar, 2008).

O pneu diagonal é composto por uma sobreposição de lonas cruzadas, o topo e os flancos são dependentes, as deformações e flexões de uma parte são transmitidas à outra, a sobreposição das lonas forma uma camada espessa, menos flexível e mais propensa ao aquecimento. A banda de rodagem é afetada por todas as flexões dos flancos, isso provoca uma deformação na superfície de contato. Na Figura 5 é possível ver a estrutura de um pneu diagonal e como a carcaça forma uma estrutura uniforme, sendo a estrutura do pneu formada por apenas uma lona fixada nos talões de ambos os lados. A carcaça diagonal foi o padrão adotado desde o início da indústria automotiva americana até a década de 1960, quando as vantagens dos pneus de carcaça radial, desenvolvidos na Europa, tornaram-se reconhecidas (Gillespie, 1992).

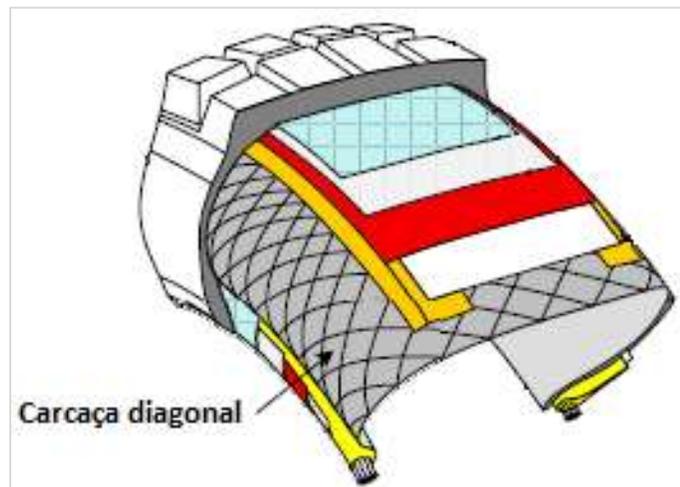


Figura 5: Estrutura de um pneu diagonal (Adaptado de Jazar, 2008).

A Figura 6 mostra o contato pneu-pavimento. O pneu está menos em contato com o solo, o que acarreta uma perda de tração e maior agressão ao solo. Devido à rigidez da carcaça, o pneu não filtra as irregularidades do solo, com isso, o condutor e a máquina estão expostos a todos os choques e impactos.

Pneus diagonais são mais utilizados em veículos fora-de-estrada, devido a seu uso severo, devem suportar grandes quantidade de carga. Atualmente, carcaças diagonais são raras no mercado de pneus para veículos de passeio. Quando encontradas, são pneus originais de veículos de coleção (Jazar, 2008).

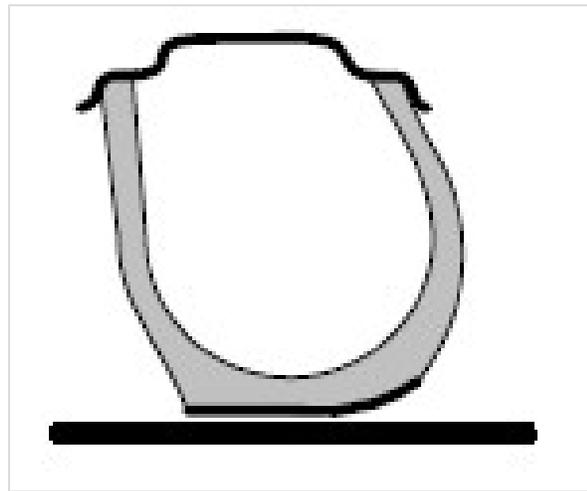


Figura 6: Contato de um pneu diagonal com o solo (Adaptado de Jazar, 2008).

O pneu radial é composto nos flancos por uma carcaça flexível disposta de maneira radial fixada nos aros, e no centro por uma armadura metálica para estabilizar a banda de rodagem. O trabalho dos flancos é, portanto, independente do trabalho da banda de rodagem. As flexões dos flancos não são transmitidas à banda de rodagem. Esse fenômeno proporciona maior conforto para o motorista e passageiros, mais importante ainda, aumenta a segurança e dirigibilidade do veículo, pois com essa construção a banda de rodagem está constantemente em contato com o solo. Atualmente os veículos de passeio, caminhões e ônibus rodoviários são equipados com pneus radiais sem câmara. Os pneus radiais possuem uma camada interna conhecido como goma interna, que tem a função de impedir a vazão dos gases, ou seja, mantendo o pneu sempre inflado. A Figura 7 mostra a secção de um pneu radial. Podemos notar que devido a orientação da carcaça se dar radialmente, caso exista a necessidade de deformação por parte do pneu, este manterá a banda de rodagem sempre em contato com o solo,

independente da magnitude dessa deformação, pois essa configuração de construção permite uma maior flexibilidade do pneu (Jazar, 2008).

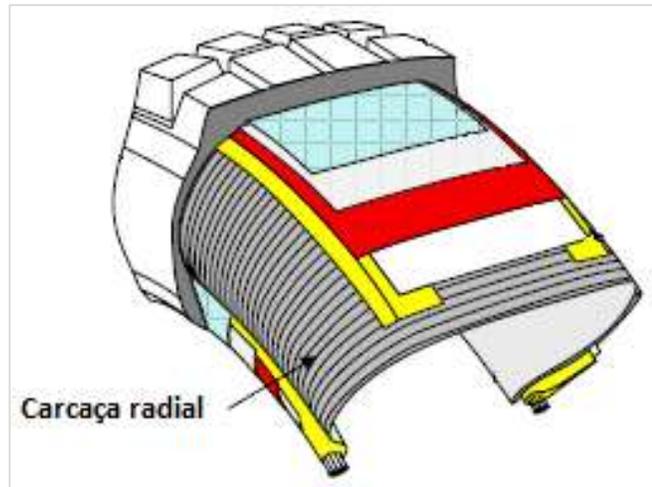


Figura 7: Estrutura de um pneu radial (Adaptado de Jazar, 2008).

A superfície de contato com o solo é constante, portanto há pouco escorregamento. A tração é, portanto, transmitida de maneira ótima, e há menos agressão ao terreno. Graças à flexibilidade da carcaça, o pneu absorve os choques, impactos e irregularidades dos pavimentos. A Figura 8 ilustra que mesmo sofrendo uma deformação, o pneu não perde seu ponto de contato com o solo, ao contrário do que acontece com os pneus diagonais (Jazar, 2008).

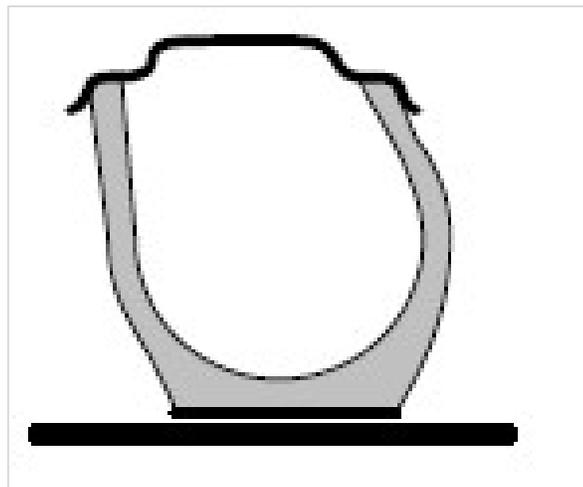


Figura 8: Contato de um pneu radial com o solo (Adaptado de Jazar, 2008).

2.2.3 Lonas de Topo

As lonas de topo têm a função de reforçar a lona carcaça e a estrutura do pneu, além de ajudar na dirigibilidade do veículo. Estas são constituídas por filamentos metálicos revestidos com elastômero. Posicionam-se sobre a carcaça formando uma cinta, o que garante a resistência mecânica e estrutural do pneu. As lonas que formam a cinta, cruzam-se obliquamente e colam-se uma sobre as outras. O cruzamento dos seus filamentos com os da carcaça forma triângulos indeformáveis, que garantem a rigidez do topo.

Estas camadas, que rodeiam todo o topo do pneu formando uma cinta, têm um papel muito complexo, têm de ser bastante rígidas no sentido circunferencial do pneu para não se estenderem sob o efeito da centrifugação e para controlar perfeitamente o diâmetro do pneu, independentemente das condições de utilização. Também têm de ser rígidas em sentido transversal para resistir aos esforços de deriva, mas também têm de ser muito flexíveis em sentido vertical para contornar o obstáculo.

A principal função das lonas de topo é garantir a maior área de contato do pneu ao solo e a proteção contra os impactos e perfurações, o que garante a resistência do pneu, mesmo sendo flexíveis verticalmente. A estrutura das lonas de topo não desgastam durante a vida do pneu, no entanto, as lonas de topo influenciam no modo de desgaste e diretamente na pegada do pneu ao pavimento (Jazar, 2008; NHTSA, 2006; Genta, 1997).

2.2.4 Banda de rodagem

A banda de rodagem é a parte do pneu que fica em contato com o solo. Esta é formada por uma camada maciça de elastômero e leva uma série de ranhuras que dão origem a escultura do pneu. A parte dianteira do seu desenho tem a função de cortar a água para as laterais, a parte central da escultura do pneu seca o solo e a parte traseira do pneu que são as frestas da escultura, expulsar o filme de água residual. A banda de rodagem tem outras importantes funções como: proporcionar aderência ao solo, resistir ao desgaste e agressões do pavimento, participar na baixa resistência ao rolamento, participar no conforto acústico e sonoridade do rolamento ao piso liso, participar no direcionamento e dirigibilidade do veículo, além da estética, fator importante para muitos utilizadores exigentes (Gillespie, 1992).



Figura 9: Banda de rodagem de um pneu (Arquivo pessoal).

A Figura 9 apresenta o desenho da banda de rodagem de um pneu comercial. O pneu apresenta 5 blocos longitudinais ou *ribs*, como são chamados em inglês. Todos os blocos têm a função de dirigibilidade e controlabilidade do veículo em linha reta, no entanto, o bloco central é quem sofre o primeiro comando do motorista, quando este sai do estado permanente para o estado transiente. Os blocos que ficam nos ombros internos e externos, sofrem maiores esforços quando o veículo realiza curvas para ambos os lados. Em curvas para o lado direito, o ombro do lado esquerdo sofrerá maior esforço devido a transferência de carga e o inverso é válido também.

Os chanfros ou *chamfer* transversais e inclinados nos blocos da banda de rodagem, têm a responsabilidade de escoamento da água, com o intuito de eliminar o fenômeno da aquaplanagem, que nada mais é do que a perda de contato de pneu com o solo, fazendo com que o motorista tenha uma perda parcial ou completa do veículo. Nos períodos de chuvas intensas, o que é muito comum nos verões brasileiros, existe uma maior ocorrência de acidentes envolvendo aquaplanagem. A banda de rodagem representada na Figura 9, também apresenta 4 sulcos de escoamento de água com as mesmas funções dos chanfros (escoamento de água), com uma pequena diferença entre eles, os chanfros escoam a água nos sentidos transversais e

inclinados, já os sulcos escoam a maior parte da água para trás do veículo, permitindo maior controlabilidade do veículo (Genta, 1997).

O composto da banda de rodagem deve apresentar um desempenho com maior eficiência em várias condições de uso, incluindo superfícies secas, molhadas, com gelo e neve, além de atender às expectativas do cliente quanto a resistência ao desgaste. A banda de rodagem desgasta durante a vida útil do pneu até atingir o limitador de desgaste (NHTSA, 2006).

2.2.5 Aros

É a parte do pneu que se fixa nas rodas, um de cada lado do pneu, em diversas configurações que servem para ancorar o pneu inflado ao aro. Este é formado por filamentos de aço inextensíveis, de forma e proporções variáveis, segundo a dimensão e tipo do pneu. Neles enrolam-se a lona carcaça para sua fixação. Os aros são responsáveis pela formação da estrutura dos pneus. Suas funções são: fixar o pneu à roda e transmitir a potência do motor do veículo nos esforços de aceleração e frenagem. Um aro pode suportar até 1.800 kg sem risco de ruptura. Os aros não desgastam durante a vida do pneu (ALAPA, 2019).

2.2.6 Zona baixa

Um dos papéis fundamentais da zona baixa é a transmissão da potência do veículo em aceleração e frenagem das rodas para a zona de contato com o solo. Também é possível modificar a altura da zona baixa para o pneu apresentar maior conforto ou menor rigidez lateral. Com a diminuição da zona baixa é possível notar um incremento no desempenho de conforto devido a maior flexibilidade da lateral do pneu. Para proporcionar maior dirigibilidade, resposta de volante e aumento da precisão do pneu, é necessário aumentar a zona baixa para ter maior rigidez lateral do pneu. Essas duas situações se devem ao fato de as modificações da zona baixa influenciarem na deformação das laterais dos pneus quando estão em funcionamento. No intuito de proporcionar maior dirigibilidade dos pneus, resposta de comando de volante mais rápida e melhor precisão, com o aumento da zona baixa, por consequência menor área de deformação dos ombros, faz com que o desempenho de dirigibilidade seja melhorado. As

modificações realizadas na zona baixa, ajudam os desenvolvedores de pneus a alcançarem os resultados esperados pelos clientes, tanto no conforto como dirigibilidade (NHTSA, 2006).

2.2.7 Flancos

O flanco é a zona compreendida entre a banda de rodagem e os talões do pneu e contém todas as informações de construção e avisos de segurança dos pneus. O flanco representa a altura do pneu e é proporcional a largura do mesmo. Suas principais funções são: suportar a carga, suportar as constantes flexões mecânicas, resistir às fricções e agressões externas e participar da estabilidade e do conforto (Genta, 1997; ALAPA, 2019).

Mesmo com a função do conforto do pneu, os flancos influenciam na baixa resistência ao rolamento, o composto do elastômero dos flancos tem um papel fundamental para resistir a pequenas deformações e ajudar a reduzir a resistência ao rolamento. O composto dos flancos é formulado para resistir a riscos ambientais, como ozônio, oxigênio e a radiação ultra violeta. Os flancos não desgastam durante a vida do pneu (NHTSA, 2006).

2.2.8 Compostos Químicos de uma Banda de Rodagem de Um Pneu

Nesta secção serão apresentados os compostos químicos de uma banda de rodagem mais utilizados na fabricação de pneus.

2.2.8.1 Elastômero sintético SBR

A composição da banda de rodagem é uma mistura de elastômeros com aditivos. Os elastômeros são basicamente o SBR (*Styrene-Butadiene Rubber*) e o elastômero natural, já os aditivos são aceleradores, anti-oxidantes e cargas reforçantes (*carbon black* e/ou sílica). Os elastômeros têm a função de melhorar a durabilidade da banda de rodagem, aumentar a resistência ao rasgo além de elevar a aderência do pneu ao solo. O elastômero de estireno

butadieno (SBR), é o elastômero sintético mais usado no mundo. Uma das principais formas de se obter esse elastômero sintético é por meio de um processo químico denominado polimerização por emulsão. Este processo é comumente utilizado na indústria para obtenção do látex de SBR. Isso porque utilizando esse método de polimerização, é possível obter polímeros com alto peso molecular em uma solução aquosa. Esse processo envolve uma mistura de água, monômeros dos polímeros e um surfactante (tensoativo) como o agente emulsificante. Os surfactantes formam micelas, que induzem a migração dos monômeros para dentro das micelas. Os iniciadores de radicais livres, quando jogados na fase aquosa, também migram para a fase micelar iniciando a polimerização (National Research Council, 1994).

2.2.8.2 Negro de Fumo

Cargas reforçantes dentro da indústria pneumática exercem dois principais papéis. O primeiro sendo como corante, no caso do negro de fumo (*carbon black*), para o produto final; e o segundo mais importante, como precursor do aumento da resistência do elastômero. Em geral, são usados o negro de fumo e a sílica, essa última sendo a matéria prima atualmente mais utilizada na fabricação dos chamados “pneus verdes”, que apresentam baixa resistência ao rolamento e alto desempenho no piso molhado.

O negro de fumo (*carbon black*) é a forma coloidal do carbono, sua característica de carga reforçante se deve ao tamanho, formato e área de contato do agregado primário. O agregado do negro de fumo é constituído por partículas primárias aproximadamente esféricas e fortemente ligadas. Se faz necessário processos com altas taxas de cisalhamento para a ruptura do agregado no processo de mistura. Ao contrário do que se pensa, a partícula do negro de fumo não é a menor unidade. Pelo fato de o agregado do negro de fumo ter suas partículas fundidas entre si, o agregado se torna a menor unidade.

O negro de fumo tem sua origem do petróleo e é constituído por carbono elementar, obtido através de combustão controlada de óleos aromáticos em fornos especiais sob altas temperaturas. Existem alguns tipos de processos de produção, mas o mais utilizado é o processo denominado fornalha. As partículas de negro de fumo são formadas no fluxo de alta velocidade da fornalha, por camadas sobrepostas de carbono, que colidindo entre si formam os agregados ou estruturas.

Sua principal aplicação é como carga reforçante em compostos de elastômeros na fabricação de pneus para a indústria automotiva, o negro de fumo também é largamente empregado como o pigmento universal preto em plásticos e tintas diversas (Dick, 2001).

A ligação entre o negro de fumo e o elastômero é fraca, por conta da natureza apolar de ambos os compostos, sendo essa ligação em geral de Van der Waals. A adsorção físico-química do elastômero na superfície do negro de fumo resulta em imobilização parcial das cadeias poliméricas. Com isso, quanto maior a porcentagem de ligações entre o negro de fumo com o elastômero, maior será a rigidez da mistura.

O uso do negro de fumo na produção dos pneus automotivos, tem uma contribuição muito importante no desempenho dos pneus quando falamos de resistência ao desgaste. A área superficial do negro de fumo é um dos parâmetros mais importantes na resistência ao desgaste. Estudos feitos por Shieh and Funt (1991) mostram a influência da área superficial da resistência ao desgaste. Foi notado que aumentando a área superficial do negro de fumo ocorre um incremento da resistência ao desgaste, atingindo um pico máximo. Passado esse pico, observa-se a diminuição da resistência devido a diminuição do tamanho da partícula.

O negro de fumo usado na indústria automotiva, é fornecido na forma de *pellets*, pequenos cubos de fácil manuseio. O tamanho e a dureza do *pellet* podem influenciar no nível de dispersão na mistura. Se os cubos são frágeis eles podem ser quebrados durante o transporte e manuseio, dando origem a pequenas partículas ou fino de negro de fumo. Esse fino é de difícil dispersão no elastômero. O peso do *pellet* recomendado para o manuseio na indústria pneumática é de 5 à 20g para cubos menores que 1mm, e de 15 à 30 g para cubos maiores que 1mm (White, 2001).

2.2.8.3 Sílica

O composto químico dióxido de silício (SiO_2) é o principal componente da areia de praia e principal matéria prima para a fabricação do vidro. Atualmente a indústria pneumática vem utilizando desse composto para a fabricação de pneus verdes (*green tires*), em concordância com legislações ambientais ao redor do mundo. Mas pelo fato de a areia não ser puramente sílica, se faz necessário processos industriais para sua purificação e separação dos diversos tamanhos de partículas. Para a produção da sílica, inicialmente é acrescentada a soda Na_2CO_3 em altas temperaturas formando *cullets*, que serão misturados em água, dando origem

a uma solução fortemente alcalina, denominada silicato de sódio. Em seguida, acrescenta-se ácido sulfúrico no processo para precipitação da sílica. Essa solução passa pelo processo de filtração onde são obtidas as partículas de sílica pura. Após a obtenção da sílica, o processo de *Spray Dryer* se faz necessário para obter o tamanho de partícula necessário. Para que ocorra a hidrólise entre a sílica e o silanol (agente de coesão / ligação), o pH da sílica deve estar entre 6 – 8, essa característica influencia diretamente na mistura (White, 2001).

A aplicação da sílica na formulação do elastômero utilizado na banda de rodagem, tem como objetivo a melhora de desempenho tanto energético quanto de rodagem no seco e no molhado. Ela pode ser usada com diferentes tamanhos e áreas de contato, também podem ser usadas partículas primárias de tamanho de 10 – 100 nm, agregados de 50 – 300 nm e aglomerados maiores que 200 nm. Quanto maior a área de contato da partícula, menor será a quantidade de sílica utilizada na formulação, melhor será o desempenho em desgaste e vida útil do pneu (*treadwear*), ocorrerá menor deformação da banda de rodagem, causando menor aquecimento durante o uso proporcionando assim baixa resistência ao rolamento *RR*. Contudo, quanto menor a área de contato da sílica, maiores serão as partículas, o que acarretará em uma maior quantidade de partículas empregadas na formulação, melhorando assim o comportamento em piso molhado (*wet grip*). A **Error! Reference source not found.** Figura 10 exemplifica a correlação entre o tamanho e área superficial da partícula (White, 2001).

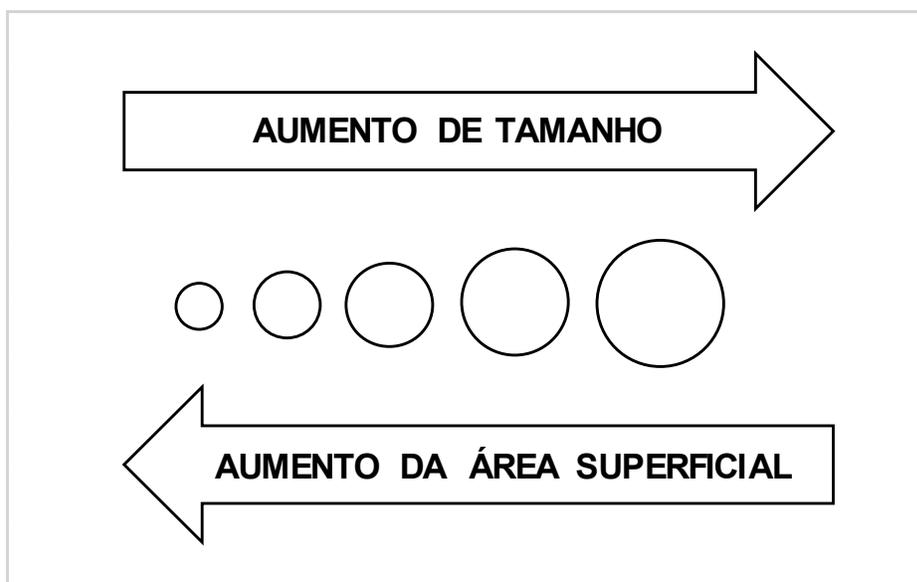


Figura 10: Tamanho da partícula vs. Área superficial (Arquivo pessoal).

2.2.8.4 Aquaplanagem

A banda de rodagem nos pneus também tem um papel fundamental no fenômeno conhecido como aquaplanagem. Esse fenômeno ocorre em veículos quando ao passar sobre uma camada ou filme de água, os pneus perdem o contato com o solo, provocando um escorregamento dos pneus sobre o filme de água. Este fato ocorre geralmente quando os sulcos dos pneus não são capazes de drenar toda a água. É mais comum ocorrer em rodovias planas e pavimentadas, que não tem boa drenagem da água, permitindo seu acúmulo e produzindo uma camada de água sobre as pistas. A aquaplanagem ocorre normalmente com água, mas também pode ocorrer com lama. Os pneus com escultura ou desenho da banda de rodagem assimétrica, caracterizados por uma escultura diferenciada da parte interna e externa da banda de rodagem, possuem um desempenho melhor em situações de aquaplanagem. Isso se deve ao fato de a parte interior, por ter os sulcos mais abertos, evacuar rapidamente a água, diminuindo assim o risco de aquaplanagem e a parte externa favorecer a estabilidade em curvas. A parte dianteira do desenho da banda de rodagem tem a função de cortar a água para as laterais, a parte central da escultura do pneu seca o solo e a parte traseira do pneu que são as frestas da escultura, expulsar o filme de água residual. A velocidade é um dos fatores que favorecem a aquaplanagem, aumentando o risco de acidentes automobilísticos (Jazar, 2008).

A Figura 11 demonstra o fenômeno da aquaplanagem no momento em que o pneu perde o contato com o solo e gira sobre o filme de água. Neste exato momento de perda de contato ao solo, o motorista pode sofrer perda parcial ou total do veículo, o que aumenta o risco de acidentes. É recomendado que neste momento de perda de aderência, o motorista deve tirar o pé do acelerador, para que contato do pneu ao solo volte rapidamente, (Gillespie, 1992). Fato muito comum nas estradas e rodovias brasileiras, (CNT, 2018).

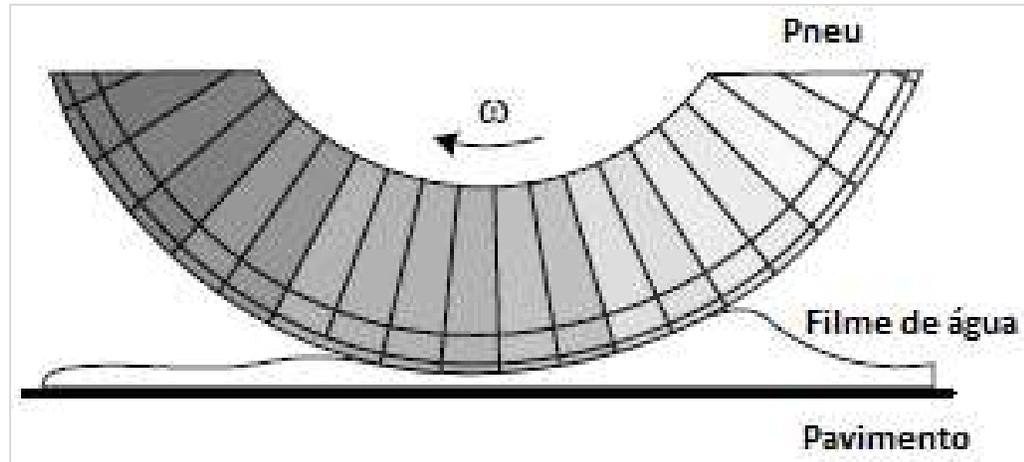


Figura 11: Ilustração do fenômeno aquaplanagem (Jazar, 2008).

2.2.8.5 Footprint

A área de contato do pneu com o solo é chamada de *footprint* em inglês ou pegada do pneu. É a única área do veículo em contato com o pavimento, responsável por transmitir as forças de frenagem, aceleração e dirigibilidade, obedecendo as reações do condutor do veículo.

A área de contato do pneu é inversamente proporcional a pressão do pneu. Quanto maior a pressão do pneu, menor a área de contato no solo. O uso da técnica de pressão baixa nos pneus é comumente usado em veículos fora-de-estrada ou *off-road*, como por exemplo no uso em terrenos arenosos, tendo como objetivo aumentar a área de contato, evitando cavar buracos e escorregamento em superfícies que apresentam baixa aderência. A pressão baixa também tem um papel fundamental no aumento do consumo de combustível, desgaste do pneu e sua temperatura de funcionamento. A pressão alta normalmente é utilizada em terrenos com muitas pedras, pois o pneu com maior pressão fica mais duro e menos vulnerável a cortes, ficam mais estreitos e altos o que possibilita maior altura em relação ao solo.

A área em azul mais escura na Figura 12, apresenta a área de contato da banda de rodagem com o solo, onde podemos ver perfeitamente os sulcos do pneu e o escoamento da água (Jazar, 2008).



Figura 12: Ilustração do footprint de um pneu (Arquivo pessoal).

2.3 Métodos para Análise de desgaste de Pneus

Nesta secção serão discutidos trabalhos e resultados obtidos em estudos realizados de desgaste de pneus e dos métodos utilizados para predição do tempo de vida útil dos pneus, que servirão de base para o estudo deste trabalho. Embora, a grande maioria dos estudos relacionados a testes de desgaste de pneus atualmente na indústria pneumática, estejam focados em testes realizados por simulações computacionais, com o objetivo de redução dos custos de fabricação de protótipos e maior rapidez e velocidade dos resultados das simulações com diferentes tipos de veículos e suas características, bem como, diferentes tipos de pavimentos, rodovias e até mesmo a implementação de temperaturas do solo e temperatura ambiente, a implementação de fatores ambientais nas simulações.

2.3.1 Sistema e Método de Previsão de Desgaste de Pneus

O trabalho desenvolvido por Luk et al., (2017) criou um método para estimativa do desgaste dos pneus. Seu método de estimativa do desgaste contempla quatro etapas da vida útil do pneu, onde os cálculos efetivos do desgaste são realizados usando uma fórmula empírica utilizando as revoluções dos pneus, que resultam na distância percorrida.

As quatro etapas citadas acima, estão divididas da seguinte forma: banda nova, $\frac{1}{3}$ desgastado, $\frac{1}{2}$ desgastado e $\frac{2}{3}$ desgastados. Essas são as fases calculadas do desgaste dos pneus, que estimam o tempo de vida útil, orientando os condutores quando os pneus devem ser trocados, evitando acidentes automotivos por motivos do desgaste da banda de rodagem. Cada roda possui um transdutor que, contabiliza o número de revoluções das rodas, enviando para uma base no interior do veículo que contém a fórmula empírica para fazer o cálculo da vida útil dos pneus. A fórmula empírica desenvolvida pelos pesquisadores está descrita na Equação 2.1:

$$R_{eff} = \frac{\textit{distância percorrida}}{2 \times \pi \times N_{rev}} \quad (2.1)$$

Onde:

R_{eff} é o raio de rolagem efetivo do pneu;

N_{rev} é o número de revoluções do pneu na distância percorrida.

De acordo com o trabalho, o sistema é composto por uma base de comunicação interna sem fio de fácil acesso pelo motorista, cada roda possui um sensor onde as leituras dos números de revoluções dos pneus são feitas instantaneamente e a distância percorrida é obtida por sistema GPS (Sistema de Posicionamento Global), dando todo o direcionamento e informações de trajetos, velocidade e a distância efetivamente percorrida.

Os autores apresentam as condições da banda de rodagem quando os pneus estão novos e após sofrerem os desgastes dos blocos do desenho dos pneus, nas quatro etapas de desgastes citadas e apresentadas, conforme Figura 13.

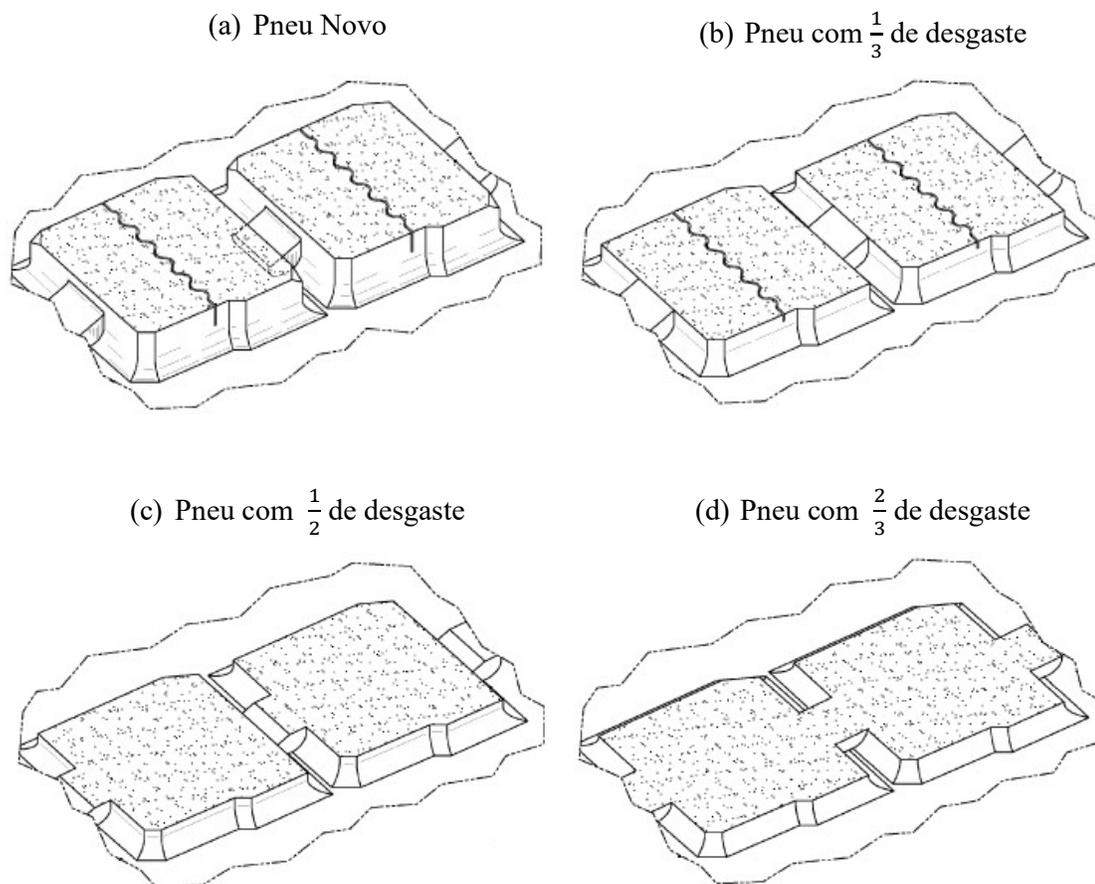


Figura 13: Desgaste dos blocos dos pneus (Luk et al., 2017).

No presente trabalho foi utilizado um sistema eletrônico para o cálculo do desgaste dos pneus com informações em tempo real do desgaste e o tempo exato da troca dos pneus. Este desgaste é dividido em quatro etapas, como apresentado anteriormente. Uma similaridade com o modelo proposto neste trabalho é a realização dos experimentos em campo. No entanto, no trabalho de Luk et al., as informações do desgaste dos pneus são transmitidas instantaneamente, entretanto, este sistema eletrônico não promove a predição da vida útil dos pneus, ao contrário da metodologia de testes proposta neste trabalho, que são mandatórias medições intermediárias para o cálculo de desgaste dos pneus e realiza a predição da vida útil e quando será o momento da troca dos pneus com informações prévias.

2.3.2 Métodos de Elementos Finitos para Previsão de Desgaste de Pneus

Para aproximar melhor o modelo e a realidade, Li et al., (2011) estudaram de forma analítica e numérica os fatores que mais contribuem para o desgaste de pneus em serviço. Segundo os autores, as condições de operação, a estrutura e composição do pneu e o meio ambiente influenciam na taxa de desgaste.

Os autores usaram definições de elementos finitos para, de forma aproximada, representar o contato pneu/solo, visto que de acordo com a teoria do atrito, o contato pneu/pavimento consome certa energia e pode ser mensurado assim, sendo possível quantificar o desgaste com relação a perda de energia.

Como os parâmetros possuem magnitudes e unidades diferentes e são numerosos. Com isso, os autores propuseram a ideia de sensibilidade de parâmetros, que consiste em um coeficiente de proporcionalidade entre os parâmetros, de acordo com a Equação 2.2:

$$k_q|_{q_o} = \frac{\Delta H/H_o}{\Delta q/q_o} \quad (2.2)$$

Onde:

q_o é o valor original do parâmetro;

Δq é a quantidade variável de parâmetro;

H_o é o valor original da quantidade de desgaste;

ΔH é a quantidade variável de desgaste.

Assim, os autores chegaram a valores de aproximação entre os parâmetros que influenciam o desgaste dos pneus, de acordo com a Tabela 1. Onde temos os valores da segunda e terceira coluna que se referem ao valor do coeficiente de proporcionalidade e seu valor absoluto, respectivamente. Segundo os autores, quanto menor o valor, maior será sua contribuição para o aumento do desgaste. No caso da ordem, os números indicam os fatores que terão maior influência no desgaste.

Um dos fatores muito importantes que influenciam diretamente no desgaste dos pneus é o nível de aderência dos pavimentos. Diferentemente do trabalho realizado por Li et al., a metodologia de testes proposta neste trabalho, não considerou os valores de atrito dos pavimentos nas projeções de desgaste e vida útil dos pneus.

Tabela 1: Parâmetros de sensibilidade do desgaste do pneu.

Parâmetros	$ k_q q_0 $	$ k_q q_0 $	Ordens
Pressão do pneu	-0.34757	0.34757	5
Temperatura ambiente	0.44423	0.44423	4
Velocidade	1.0233	1.0233	2
Massa suspensa	0.95291	0.95291	3
Massa não suspensa	0.12777	0.12777	7
Rigidez da suspensão	0.0129	0.0129	10
Amortecimento da suspensão	-0.03219	0.03219	8
Ângulo de escorregamento lateral	1.41376	1.41376	1
Rigidez da banda	-0.00012724	0.00012724	12
Amortecimento da banda	0.000144422	0.000144422	11
Rigidez do costado	-0.0000884224	0.0000884224	13
Amortecimento do costado	0.0000050214	0.0000050214	14
Aspereza da pista	0.02477	0.02477	9

Segundo os autores, o aumento da velocidade vertical e a temperatura ambiente são fatores que agravam o desgaste dos pneus, com isso a rugosidade do pavimento é também um fator agravante no desgaste.

Ainda na área de elementos finitos para previsão de desgaste de pneus, Wei et al., (2018) utilizaram uma análise de elementos finitos para analisar a tensão e deformação de cada parte do pneu, bem como a relação de deformação que podem ser usadas como base para a análise da fadiga térmica em pneus de uso comercial (caminhões e ônibus). Esse estudo tem como objetivo ser uma referência para melhoria e desenvolvimento de novos produtos.

Com a chegada dos computadores e sua evolução, assim como a aplicação de elementos finitos em sistemas mecânicos, a análise de diferentes aplicações e o comportamento dos componentes estruturais dos pneus puderam ser estudados mais a fundo. Nos anos 70, o método de elementos finitos foi utilizado utilizando-se da aproximação do elemento triangular de deformação e os resultados de tensão do pneu sob carga vertical foram próximos dos valores

medidos. Já nos anos 80, também utilizou deformação constante do triângulo para analisar a inflação do pneu radial. Inúmeras análises foram realizadas nas últimas décadas utilizando o método de análise de elementos finitos para o estudo da deformação dos componentes dos pneus.

Os autores realizaram modelagens utilizando uma grande variedade de componentes, como: diferentes tipos de banda de rodagem, espessura de malha de aço bem como grandes variações de tensão de deformação nos pneus. O método de elementos finitos permite diferentes modelagens de pneus variando tipos de componentes, pistas, e veículos, por isso, é uma importante ferramenta utilizada na indústria pneumática no desenvolvimento de novos produtos.

Os autores concluíram que, as modelagens realizadas com os diferentes tipos de componentes estruturais do pneu, estabeleceram uma base para uma análise mais aprofundada da fadiga térmica e concluíram que essa análise também desempenha um papel orientador na melhoria da estrutura do pneu.

Diferentemente da metodologia de testes proposta neste trabalho que, tem como objetivo principal a rodagem dos pneus em campo, Wei et al., utilizaram modelagens computacionais com a aplicação de elementos finitos, para a criação de um banco de dados com diferentes componentes de um pneu, diferentes pavimentos e veículos no desenvolvimento e aprimoramento de novos produtos.

No trabalho de caracterização das propriedades de atrito de uma superfície específica criado pelos autores Fuentes et al., (2012), foi possível quantificar a sensibilidade da velocidade das medições em uma pista determinada com a superfície molhada. O índice de atrito é um modelo estatístico de correlação entre a macrotextura e a velocidade constante do teste, também pode ser aplicada a inclinação da regressão linear entre o atrito e a velocidade de escorregamento para a determinação deste índice de atrito internacional.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma avaliação fiel estatística da aplicabilidade dos conceitos de macrotextura típica de pistas e rodovias. Para tal, os autores aplicaram conceitos estatísticos e equações para determinação dos índices de atrito de rodovias.

No entanto, os resultados deste estudo mostraram que o conceito proposto no modelo de índice de atrito, não era aplicável para altos níveis de macrotextura, porque o atrito medido nos pavimentos permanecia constante mesmo com a mudança das velocidades de escorregamento. Os autores afirmam que esta não aplicabilidade do modelo proposto para níveis altos de macrotextura, são explicadas pelo erro usado na regressão linear. Bem como,

altas velocidades para a condição de alto atrito, apresentaram extrema sensibilidade para o modelo teórico.

Os resultados dos modelos teóricos apresentaram correlação com os resultados medidos de macrotextura utilizando métodos específicos em normas internacionais. No entanto, o modelo limita a aplicabilidade em níveis relativamente altos de macrotextura. Um modelo semelhante ao proposto por Fuentes et al., é o modelo criado por Li et al., apresentado anteriormente, que utiliza o nível de aderência do solo para quantificar o desgaste do pneu. Ambos os modelos criados pelos autores, são diferentes da metodologia proposta deste trabalho, pois tem como objetivo a rodagem dos pneus em ruas e rodovias, um teste fiel a condução de um motorista.

Estudos foram feitos para identificar como as empresas comerciais, montadoras de veículos e fabricantes de pneus realizam testes de durabilidade, projeção de desgaste e vida útil dos pneus. Os fabricantes de pneus utilizam muitas simulações computacionais, aplicando o método de elementos finitos, para fazer as projeções e análises do desgaste da banda de rodagem (Becker e Seifert, 1997). Dessa forma, é possível realizar as simulações utilizando vários tipos de pavimentos, condições ambientais e diferentes tipos de banda de rodagem. É possível também alterar as características técnicas dos veículos, diferentes tipos de pavimentos, sem ao menos a fabricação de pneus protótipos. Esses tipos de testes são mais rápidos e com menor custo as empresas solicitantes dos testes (Cho e Jung, 2006).

O autores Becker e Seifert, afirmam que os pneus passam por dezenas de testes antes de serem comercializados. Um dos testes mais caros, são os testes de desgaste e vida útil do pneu, onde os pneus devem rodar entre 20000 a 40000 km. O objetivo do Método de Elementos Finitos é reduzir o alto custo da realização dos testes em campo e melhorar a análise do processo de desgaste com diferentes tipos de pavimentos e condições de carga. O estado constante de rolamento dos pneus descritos pelos autores são: cinemática de rolamento e configurações variacionais.

Foram realizados testes em campo de quatro pneus idênticos montados em um veículo. Nesses testes foram percorridos 30000 km com velocidade aproximada de 160 km/h em condições conhecidas. Este teste de desgaste promove a perda de peso ou massa do pneu devido a diminuição da profundidade dos sulcos da banda de rodagem. Os resultados são sempre separados entre o eixo trativo e o não trativo. O eixo dos pneus que promoveram a tração mostrou um forte desgaste, especialmente no centro do pneu. O eixo não trativo, apresentou maior vida útil comparado ao trativo, e desgaste mais uniforme.

Simulações foram feitas, assumindo o solo como uma superfície plana e rígida. Os cálculos foram feitos em várias etapas, utilizando duas variações de construção do pneu. Uma verificação intermediária importante é a comparação da área de contato do pneu calculada com a medida, chamada de *footprint* ou pegada.

Os autores concluíram que os resultados obtidos por meios da análise de elementos finitos e testes realizados em campo, apresentaram boa correlação. No entanto, as simulações mostraram valores mais conservativos.

Imagens da pegada do pneu ao solo são apresentadas na Figura 14. Uma comparação entre a pegada medida e a calculada foi realizada. Os desenhos apresentam correlação, sua característica mais retangular é proveniente da sua construção, que tem como objetivo um desgaste mais uniforme, característico dos pneus não trativos.

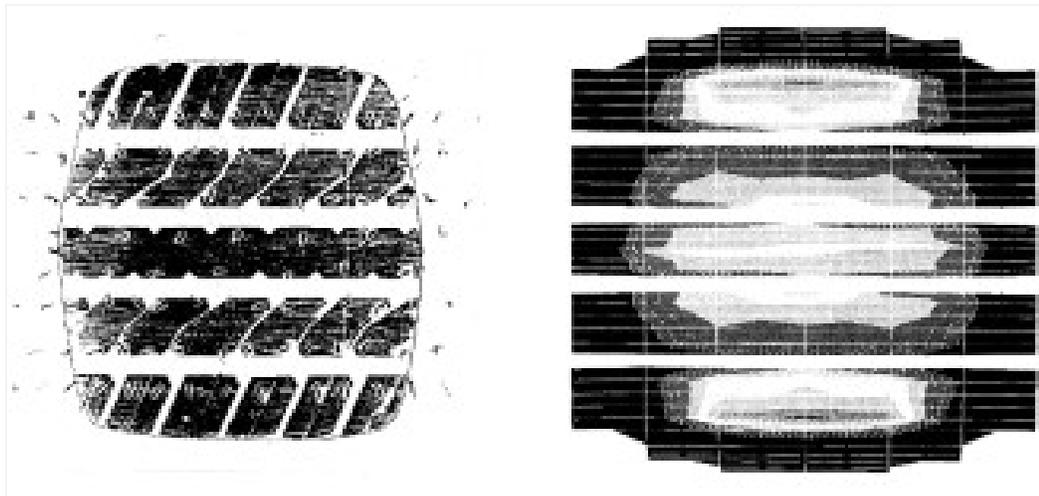


Figura 14: *Footprint* medido e calculado (Becker e Seifert, 1997).

Comparando a metodologia de teste aplicada no trabalho de Becker e Seifert, com a metodologia utilizada pela empresa comercial em testes de durabilidade de pneus, existem similaridades entre as metodologias. A rodagem dos pneus ocorre até 40000 km percorridos, a análise do desgaste dos pneus ocorre separadamente entre o eixo trativo e o não trativo e a rodagem realizada em campo. Assim, existem similaridades nos objetivos dos testes realizados no trabalho de Becker e Seifert com os da metodologia proposta neste trabalho. Os objetivos são a busca pela redução dos custos e tempo de realização dos testes com redução da quilometragem percorrida. Os autores utilizaram de simulações de elementos finitos para redução de tempo e custos de teste, ao contrário da proposta deste trabalho, que prezou pelo

teste em campo, mas intercalando as medições a cada 3 mil km, reduzindo assim a distância percorrida pelo veículo, reduzindo tempo de teste e custos envolvidos.

Segundo Silva e Cunha et. al., (2012), durante a execução do projeto, decisões podem ser tomadas antes da fase da produção dos protótipos, reduzindo assim tempo e custo do projeto, permitindo assim a melhora do produto. As simulações virtuais ajudam os projetistas durante o projeto conceitual e detalhado para apoiar suas decisões.

Os autores utilizaram programas computacionais para realizar as simulações. Diferentes configurações foram avaliadas para dois veículos diferentes, sendo um deles com dois eixos e o outro com quatro eixos. Para o veículo de dois eixos, foram considerados parâmetros de um veículo comercial leve e para o veículo de quatro eixos, foram utilizadas características de um veículo pesado de passageiros. Valores típicos de massa, inércia, distribuição de massa e distância dos eixos ao centro de gravidade são dados de entrada para o modelo. O desgaste dos pneus é inevitável e depende do trabalho de fricção desenvolvido no contato pneu-pavimento. Este trabalho apresentou uma proposta para estimar o desgaste dos pneus durante manobras longitudinais e de curvas. Uma análise quantitativa foi feita em seus estudos e foi aplicada a fórmula mágica dos pneus, segundo Bakker et al., (1989).

As conclusões foram apresentadas e para o veículo com dois eixos de direção, existe uma posição ideal de montagem do eixo no chassi. O veículo com quatro eixos, ficou clara a relação ótima do ângulo de direção entre os eixos de direção para veículos com dois eixos de direção. Com isso, os autores concluíram que, a especificação adequada dos ângulos de direção pode impedir fenômenos de desgaste precoce dos pneus, pelo fato de evitar altos valores de forças de atrito durante as manobras de curvas.

Ainda nos estudos relacionados a aderência entre o contato do pneu com o solo, os autores quantificam o desgaste dos pneus através da interação pneu-pavimento. Ao contrário do proposto neste trabalho, que não considera a aderência do pavimento na projeção do desgaste dos pneus. No entanto, o foco do trabalho proposto por Bakker et al., é em simulações computacionais, diferentemente da metodologia proposta neste trabalho, a realização de experimentos em campo para a estimativa da vida útil dos pneus.

Em seu trabalho, Ghoreishy (2008), apresenta uma revisão das publicações realizadas durante as duas últimas décadas sobre a modelagem de pneus utilizando o método de elementos finitos. Assim como outros autores, Ghoreishy afirma que as simulações virtuais ajudam os

engenheiros durante o projeto conceitual, dando a possibilidade de melhorar o desempenho do produto com menor custo, antes mesmo dos testes em campo ou na fase de prototipagem.

O autor também afirma que existem diferentes métodos desenvolvidos até agora para resolver problemas de rolagem dos pneus. Isto deve-se principalmente à estrutura complexa dos pneus, também à natureza não linear da deformação, bem como às cargas complexas aplicadas no pneu em funcionamento. Estudos mostraram que em geral existem duas abordagens. Na primeira, a cinemática e a modelagem de elementos finitos, como por exemplo, levando em conta o tipo de estrutura como a Arbitrariedade Lagrangiana Euleriana ou ALE. Já a segunda abordagem está focada nos aspectos aplicados a simulação, com a introdução de características conhecidas e que podem ser alteradas, como: temperatura, cálculo da resistência ao rolamento e interação pneu-pavimento. O autor apresentou uma revisão completa de estudos utilizando simulações no processo de desenvolvimento de pneus para melhorar seu desempenho, podendo variar dezenas de aspectos físicos, químicos e ambientais com diferentes tipos de pavimentos e configurações de veículos. Ele completa citando que o pneu é um produto muito complexo que compreende diferentes materiais com diferentes propriedades físicas e mecânicas, e suas simulações por computador ainda são tarefas desafiadoras para as indústrias automotiva e de pneus.

Concluindo sua apresentação da revisão de trabalhos utilizando modelos matemáticos para modelagem do pneu com o objetivo de melhorar seu desempenho desejado, o autor afirma que é de extrema importância a aplicação da simulação, modelagem e utilização de códigos computacionais e de alguns resultados práticos, para ajudar os projetistas e engenheiros na definição de conceitos para obter o melhor produto. Estes ensaios práticos citados pelo autor, corroboram com os testes em campo e metodologia proposta deste trabalho.

O autor apresenta na **Figura 15** a pegada de um pneu genérico ao solo quando estático e ao esterçar. Quando o ombro do pneu sofre uma pressão maior que a parte interna, o desgaste em curvas é maior nos ombros. Isto pode ocorrer até mesmo quando o veículo estiver em linha reta ou quando sua geometria não está configurada conforme o fabricante.

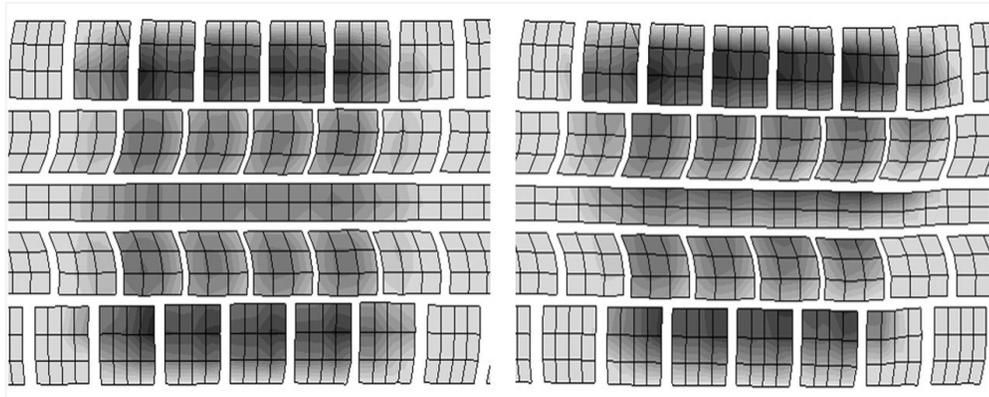


Figura 15: *Footprint* estático e ao esterçar (Ghoreishy 2008).

Para Yang et. al., (2016) os pneus em funcionamento durante seu processo de rolagem exercem esforços na estrutura do pavimento. Esses esforços são os responsáveis pelo desgaste da banda de rodagem de um pneu. Os autores afirmam que a força que o pneu aplica ao solo durante seu processo de rolagem, não pode ser medida em alta velocidade devido sua distribuição espacial. Em seu trabalho, os autores fornecem um estudo da interação entre a rolagem do pneu e o pavimento, considerando uma superfície rígida. O método de elementos finitos é usado para fazer tal previsão, onde é aplicada a análise do estado estacionário usando uma abordagem Euleriana Lagrangeana, na qual uma rotação de corpo rígido é descrita na maneira Euleriana e a deformação é descrita na maneira Lagrangeana. Simulações foram feitas para verificar a influência do contato pneu-pavimento quando o pneu se encontra em serviço sob várias condições de trabalho. Os resultados demonstraram que três direções de tensão de contato são observadas: as tensões verticais, longitudinais e transversais. Elas existem simultaneamente sob a condição de estado estacionário.

O padrão de distribuição espacial previsto para tensão de contato do pneu pode ser usado como referência para modelagem de carga de pneu, em um modelo de pavimento conhecido. O autor apresenta simulações realizadas em três direções do sistema de coordenadas e a tensão de contato dos pneus sob o estado de rolamento livre, frenagem e tração em estado estacionário, como apresentados na Figura 16.

Estas simulações foram realizadas em pneus de veículos pesados/caminhões, na qual a carga por eixo excessivamente alta causa um excesso de alta tensão de contato no ombro do pneu, pois o pneu tende a defletir o costado promovendo maior esforço aos ombros que, diminui o contato do centro do pneu com o solo. Os autores destacam a correção da pressão interna dos

pneus, maior pressão interna pode melhorar a distribuição da tensão de contato do pneu efetivamente e pode melhorar o trabalho desempenhado de um pneu sobrecarregado.

O trabalho de Yang et. al., realizou simulações computacionais com o objetivo de estudar os pontos de maior tensão nos pneus em diferentes velocidades de trabalho no sistema de coordenadas tridimensionais. Com o objetivo de identificar o ponto crítico ou ponto de maior tensão, que por consequência será o ponto de maior desgaste no pneu. No entanto, os autores consideraram o pavimento como uma superfície rígida para melhor modelagem do sistema, diferentemente dos testes realizados em campo, como proposto neste trabalho.

As **Figura 16** (a), (b) e (c), apresentam a tensão tridimensional de contato do pneu sob o estado de rolamento livre com velocidade de 120 km/h. Com as mesmas condições de velocidades as Figura 16 (d), (e) e (f), apresentam as tensões do pneu no estado de frenagem completa. As Figura 16 (g), (h) e (i), apresentam as tensões do pneu no estado de tração completa.

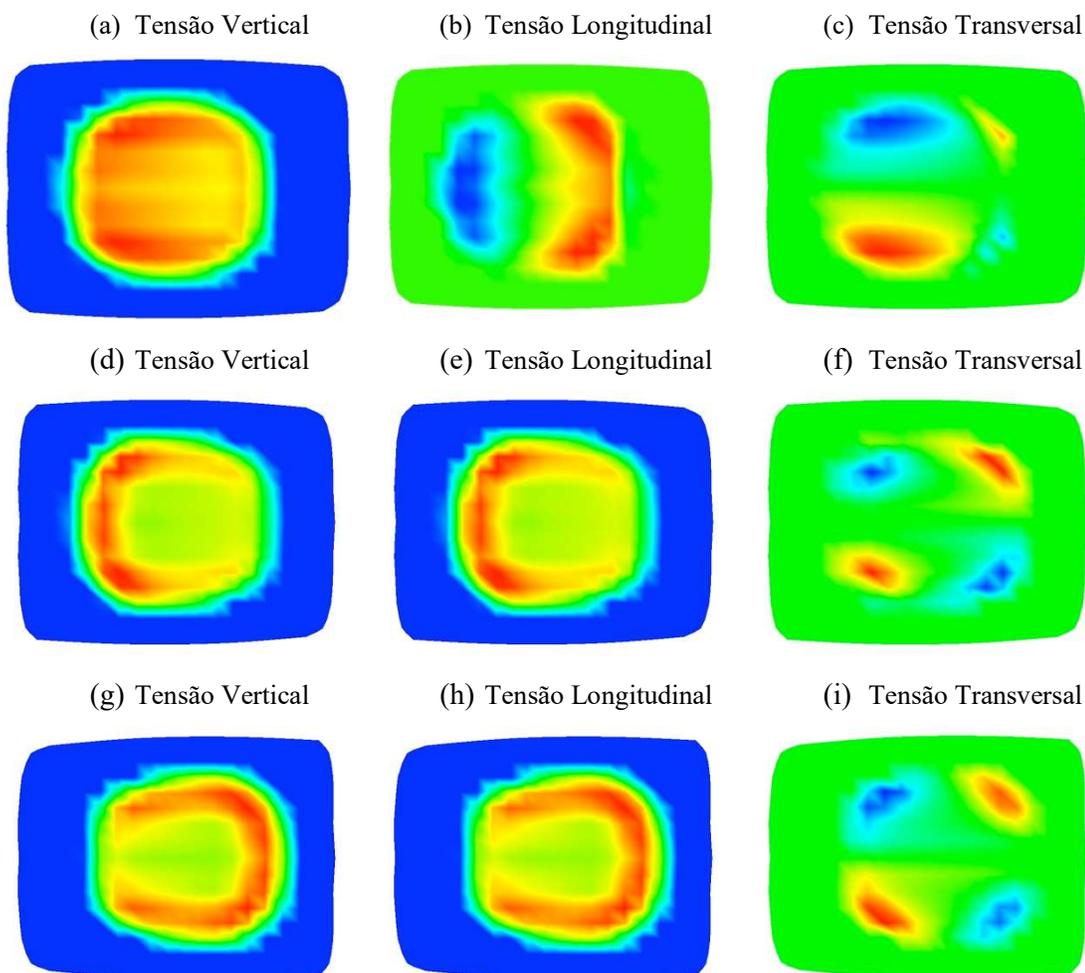


Figura 16: Modelagem de pneu para diferentes condições (Yang et. al., 2016).

Cho e Jung (2006) realizaram um trabalho para estudar o desgaste da banda de rodagem dos pneus, utilizando os métodos dos elementos finitos a fim de compararem com os testes de desgates realizados em laboratórios.

O desempenho de desgaste dos pneus é uma característica muito importante que afeta diretamente a vida útil do pneu. O aumento de tal desempenho, é exigida constantemente, principalmente nos dias atuais onde medidas e leis ambientais regulamentam cada vez mais a diminuição de poluentes emitidos na atmosfera. Sendo o pneu um personagem importante nessa trama, a indústria automotiva busca cada vez mais pneus que durem e contribuam para o aumento da eficiência energética dos automóveis. A introdução do método de elementos finitos na simulação de testes de desgaste de pneus tem como objetivo a redução de custo, já que esse é um teste caro e que exige grandes períodos de testes em campo, além da possibilidade de simular o comportamento do pneu podendo alterar propriedades do mesmo, tipos de pavimento, condições ambientais e condições dos veículos, sem mesmo produzir um protótipo. Em sua simulação e testes realizados em laboratório, os autores utilizaram três diferentes tipos de banda de rodagem. Uma das amostras foi usada como controle, para determinar a taxa de desgaste dos pneus e as demais amostras foram usadas para verificar o procedimento de predição de desgaste, comparando com a de taxa de desgaste determinada pela primeira amostra.

Em sua conclusão, os autores Cho e Jung descrevem que a taxa de desgaste do pneu foi determinada através de dezenas de simulações realizadas e comparadas com os testes feitos em laboratório. As taxas de desgaste de ensaios são assumidas por várias equações constitutivas e cada taxa de desgaste de teste é integrada ao longo do tempo para produzir o desgaste acumulado total. Essa taxa usada nas simulações, foi a que apresentou melhor correlação. Diferentes condições de cargas foram aplicadas nas simulações. Os resultados do desgaste previsto pelo método de elementos finitos, mostraram boa correlação com os resultados dos testes em ambientes fechados.

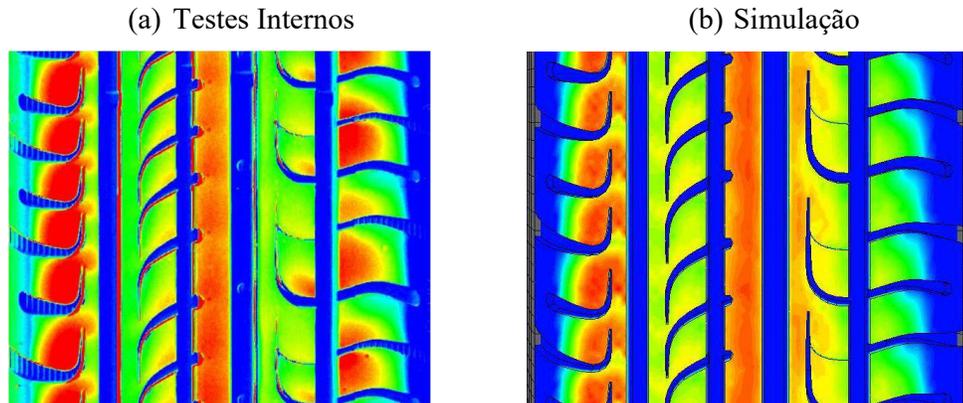


Figura 17: Comparação entre testes internos e simulações (Cho e Jung, 2006).

Para M. Gunaratne, et. al., (2000) a textura do pavimento é a grande responsável pelo desgaste dos pneus e contribui significativamente para atrito pneu-solo. Simulações foram realizadas em laboratório, características de frequência da textura dos pavimentos são obtidos decompondo as medidas de perfis obtidas do pavimento e utilizando transformada rápida de Fourier (FFT), técnica e construção de gráficos de densidade espectral de potência (PSD). Esses métodos são usados para obter as propriedades de textura do pavimento relacionadas à micro e macro textura da superfície. Com isso, foi possível identificar a taxa de desgaste dos pneus em piso seco e molhado.

Os autores desenvolveram um simulador para medir o desgaste dos pneus, bem como níveis de atrito seco e molhado em um número de amostras de pavimentos com diferentes tamanhos de agregados. Correlações razoáveis foram obtidas entre o atrito do pneu no pavimento e parâmetros de textura de perfil, como as diferentes macrotextura e microtextura, obtidas via PSD.

Os autores concluíram que as taxas de desgaste dos pneus são vistas diretamente proporcional à microtextura e inversamente proporcional a macrotextura. Portanto, os resultados indicam a importância dos parâmetros do perfil de textura do pavimento sobre o desgaste de pneus.

2.3.3 Métodos Estatísticos para Previsão de Desgaste de Pneus

Hultmann (2011) em sua tese de mestrado, apresentou funções da confiabilidade e métodos matemáticos para comparar a durabilidade de diferentes tipos de pneus e fabricantes. O autor utilizou-se de métodos estatísticos para atingir o objetivo proposto, como por exemplo o método de máxima verossimilhança para execução da estimativa dos parâmetros de uma distribuição de probabilidade. Os dados foram obtidos da quilometragem de ônibus coletivos urbanos do sistema municipal de transporte da cidade de Curitiba no estado do Paraná. Com os dados obtidos, o autor realizou as análises estatísticas para comparar a tendência de desgaste nas diferentes marcas utilizadas no trabalho. Em seu trabalho, foram obtidas as estatísticas descritivas relativas a cada modelo de pneus em cada uma de suas vidas, já que foram consideradas as recapagens dos pneus. Em seguida, foi efetuada a comparação entre as funções de confiabilidade. Com isso, foi possível o autor indicar a melhor marca para a aplicação utilizada nos testes.

Haviasas (2005) em seu trabalho apresentou uma metodologia de análise de confiabilidade, aplicada na análise da confiabilidade dos pneus de caminhões rodoviários de longa distância. Estudos foram feitos para analisar a perda da vida útil dos pneus utilizando distribuições de probabilidade, que foram comparadas em seguida para identificar a que melhor se aplicaria ao estudo. Os pneus usados em seu trabalho foram pneus sucateados provenientes de várias frotas. A metodologia aplicada e o estudo proposto possibilitam as empresas a identificarem os modos de falhas dos pneus, visando a prevenção e uma possível redução dos custos para as mesmas. Os pneus são analisados para identificar qual a melhor distribuição melhor se aplica as amostras estudadas, ou seja, mensurar cada tipo de falha. O autor conclui que, a distribuição de Weibull é a função que melhor se aplica na modelagem para identificar os modos de falhas mais frequentes dos pneus.

Myung (2002) em seu artigo apresentou um tutorial sobre estimativa de parâmetros utilizando o modelo matemático de máxima verossimilhança. O autor afirma que esta ferramenta é indispensável para estimativa de parâmetros estatísticos, principalmente para modelagem de elementos não lineares. Myung faz uma comparação entre os modelos de máxima verossimilhança e mínimos quadrados. Para melhor encontrar os parâmetros ótimos, uma análise Heurística deve ser seguida, mesmo que os valores iniciais sejam escolhidos

aleatoriamente. A função log-verossimilhança deve representar um pico para que seja máxima, é possível observar esse comportamento calculando as derivadas secundárias das log-verossimilhanças, os resultados devem ser menos que zero.

O Autor conclui que modelos mais complexos com muitos parâmetros, ajustam-se melhores do que modelos mais simples com poucos parâmetros. Na comparação realizada entre os métodos de mínimos quadrados e máxima verossimilhança, os resultados encontrados foram melhores ajustados com a utilização do método de máxima verossimilhança, pois foi aplicado um modelo exponencial no método.

3 TESTE DE DURABILIDADE DE UMA EMPRESA COMERCIAL

Nesta secção será apresentada a metodologia experimental utilizada por uma empresa comercial (EC), mostrando os procedimentos dos testes e o modo de medição da profundidade dos sulcos. Também serão apresentados os resultados fornecidos pela EC e a engenharia reversa realizada para determinar o método utilizado para prever a vida útil do pneu.

Durante a pesquisa para identificar como as empresas comerciais e fabricantes de pneus realizam testes de durabilidade, estimativa de desgaste e vida útil dos pneus, foi possível identificar dois métodos bem distintos de rodagem. O primeiro método é chamado na indústria pneumática de *captive* (em inglês) ou testes controlados (TWTESTES, 2017; IDIADA, 2020). Os pneus são testados em vias abertas, com cargas predefinidas, calibração dos pneus realizadas todos os dias antes da rodagem e rota conhecida, mesmo sendo em rodovias, estradas ou centros urbanos. Se faz necessário a obrigatoriedade de rodar apenas no circuito predeterminado, a fim de eliminar influências externas. O segundo método identificado é conhecido como *focus* (em inglês) ou testes de campo. Os pneus são montados em veículos de frota, como por exemplo táxis, fazendo com que o percurso não seja um fator controlado, o que poderá influenciar no desgaste excessivo ou irregular dos pneus. Outro ponto que influencia no desgaste dos pneus no método *focus* é a carga variante de acordo com o número de passageiros dentro do táxi.

Para os testes controlados ou *captive*, a rota pode ser determinada pelo executor dos testes e deve ser aberta, como por exemplo: rodovias e cidades de uso comum. Pode ser qualquer uma pista usada pelo fornecedor de pneus, uma vez que satisfaça os requisitos do solicitante, tais como exemplo: vias urbanas e estradas ou somente vias urbanas ou até mesmo somente estradas. O percentual de vias urbanas e estradas, deve ser combinado previamente com o solicitante do teste. O tempo de rodagem dos testes deve ser de no máximo 9 semanas para 40000 km acumulados, considerando rodagem dos pneus do período de 16h por dia, o que é muito tempo para apenas um teste, sem falar nos custos de combustível e hora homem.

Para ambos os testes de *captive* e *focus*, se o veículo é de produção, então deve ser selecionado para o teste de desgaste o mesmo veículo para o qual os pneus serão fornecidos. Se o veículo não está em produção no momento do teste, o veículo a ser utilizado deve ser representativo do veículo de intenção de produção, do ponto de vista de *design* de chassis, ou outro veículo indicado pelo solicitante do teste. É necessário executar o teste com no mínimo

dois veículos em paralelo para capturar quaisquer alterações nas rodovias públicas e para ter melhores dados de comparação.

Somente para os testes controlados, diferentemente dos testes de campo, incluem três condições de lastro para automóveis de passageiros ou conforme a solicitação do requisitante do teste. A primeira apenas com o motorista e tanque de combustível cheio, a segunda com 50% da capacidade de carga do veículo incluindo o motorista e a terceira 100% da capacidade de carga do veículo, também incluindo o motorista. Os pneus são inspecionados visualmente e calibrados diariamente conforme orientação do solicitante dos testes. A calibração é feita sempre antes de qualquer rodagem, ou seja, sempre com os pneus frios, conforme recomendação dos fabricantes de pneus. Os pilotos de testes devem alternar os veículos durante o ensaio a cada 100 km rodados, para eliminar qualquer influência aerodinâmica, e também os pilotos alternam-se entre os veículos a cada 250 km, para eliminar qualquer influência dos pilotos. Os pneus devem ser montados sempre nas rodas originais do veículo de teste ou rodas recomendadas pelo solicitante do teste, e o balanceamento dos conjuntos de pneus e rodas deve ser feito estaticamente, fora do veículo. A geometria do veículo deve ser ajustada para os valores nominais de acordo com desenhos ou para os valores de tolerância recomendados pela montadora, a fim de eliminar desgaste irregular dos pneus provenientes do desalinhamento da suspensão do veículo. O alinhamento do eixo deve ser verificado em intervalos de 5000 km.

Os desvios relativos aos requisitos do procedimento, devem ter sido acordados previamente com o requisitante do teste. Tais exigências devem ser especificadas em desenhos de componentes, certificados de teste e relatórios. As características meteorológicas do dia, tais como a temperatura ambiente e do solo, sol ou chuva devem ser anotadas nos relatórios diários. A rotação dos pneus não é permitida neste teste, ou seja, rodízio dos pneus. Os pneus irão manter a sua posição no veículo durante todo o teste.

Para todo tipo de teste, na realização dos ensaios geralmente são utilizados dois tipos de pneus: um pneu de referência e um pneu proposto. O pneu proposto é o pneu desenvolvido pelo fabricante que se deseja verificar a sua durabilidade em comparação ao pneu de referência, que pode ser desenvolvido por um fabricante concorrente. O pneu de referência ou pneu de controle como também é conhecido na indústria automotiva, tem a função e o papel de ser o limite mínimo para aprovação do pneu proposto, ou seja, o pneu proposto deve atingir uma quilometragem igual ou maior ao pneu de referência. O pneu controle é montado no primeiro veículo e o pneu proposto equipa o segundo veículo.

Os critérios de aprovação devem ser definidos pelo solicitante do teste. Cada montadora tem seu critério e valor mínimo de quilometragem projetada. O valor mínimo exigido pelas

montadoras é de 40000 km projetados ou equivalente a referência. A avaliação fiável da quilometragem projetada do desgaste do pneu, é possível após a banda de rodagem ter um desgaste de mais de 70%. Relatórios das medições de profundidade dos sulcos e do estado dos pneus, devem ser fornecidos ao solicitante do teste (TWTESTES, 2017; IDIADA, 2019).

3.1 Metodologia Experimental dos Testes Controlados (*Captive*)

Os testes de durabilidade realizados pela EC foram feitos fora do campo de provas, em rota controlada e vias abertas. O motorista dirigiu o percurso e toda distância solicitada pelo requisitante do teste como um condutor normal, que faz o uso do seu veículo de maneira simplória. Cargas foram adicionadas aos veículos, conforme procedimento dos testes controlados apresentados anteriormente (TWTESTES, 2017; IDIADA, 2019).

Neste ensaio o pneu referência tinha a especificação 185/65R15 e foi instalado no veículo 1, enquanto que o pneu proposto foi um pneu 195/55R16 e foi instalado no veículo 2. É comum o pneu referência ter suas especificações técnicas diferentes do pneu proposto. A pressão utilizada nos pneus de referência e propostos foi a recomendada pelo fabricante dos veículos, 30 psi na dianteira e 29 psi na traseira. A pressão dos pneus é a inflação recomendada pelo fabricante do veículo, que em alguns casos pode ser encontrada na tampa do combustível, nas portas do motorista ou passageiro, ou até mesmo no pára-sol de alguns veículos.

Os veículos utilizados nos experimentos são veículos comerciais, fabricados no Brasil e de tração dianteira, que são muito mais comuns devido à redução de peso do veículo e por consequência possuem um menor consumo de combustível, menor complexidade de montagem na linha de produção, já que o motor e a transmissão são montados no sentido transversal do veículo e menor custo devido ao menor uso de peças como o cardã e eixo trativo. Os veículos de tração traseira estão mais concentrados nos veículos esportivos e de alto luxo, pois têm um comportamento sobresterçante, ou seja, o veículo tem uma característica que ajuda a fazer curvas em altas velocidades, pois o contorno em curvas é melhorado (Gillespie, 1992).

Os veículos utilizados nos testes, têm como opcionais diferentes medidas de pneus e rodas. Assim, as rodas utilizadas nos ensaios são as rodas originais dos veículos, para maior confiabilidade dos resultados dos experimentos realizados em campo. A variação da largura das rodas influencia na pegada do pneu ao solo, o *footprint*, podendo assim alterar os resultados finais dos testes.

Os pneus mantiveram suas posições nos veículos durante todo o teste, ou seja, não foi realizado o rodízio para assegurar o valor mais crítico nos testes de rodagem de desgaste. No entanto, o rodízio dos pneus entre os veículos foi realizado, com o objetivo de eliminar qualquer influência do veículo. Todos os fabricantes de pneus recomendam o rodízio dos pneus da dianteira e da traseira a cada 10000 km percorridos, com o objetivo de aumentar a vida útil dos pneus, pois os pneus montados no eixo de tração sofrem maior desgaste da sua banda de rodagem devido aos esforços sofridos decorrentes do torque do motor. Para este caso, a rodagem mínima percorrida pelos pneus para certificação dos testes foi de 30000 km, o que representa 75% da distância solicitada pelo requisitante do teste e projetar 40000 km de vida útil, conforme procedimento (TWTESTES, 2017).

Neste experimento a EC realizou os testes em campo e medições de profundidade dos sulcos dos pneus a cada 5000 km rodados até alcançar uma distância final de 30000 km percorridos, com isso, foram realizadas sete medições de profundidade dos sulcos durante todo o ensaio.

Como critério de segurança é definido que os sulcos da banda de rodagem não podem ser menores que 1,6 mm de altura. Isso na prática é mostrado pelo indicador de desgaste de rodagem, chamado de TWI, presente na banda de rodagem de todos os pneus. Sua função é a de indicar o momento exato para substituição dos pneus quando estes já não mais oferecem condições de segurança (INMETRO, 2008).

A primeira medição foi realizada quando o pneu estava novo, ou seja, 0 km. A cada medição realizada, uma planilha de dados com as medições de profundidade dos sulcos dos pneus foi preenchida, e o cálculo da projeção da vida útil dos pneus nas quatro posições foi realizada.

Cada uma das medições de desgaste dos pneus é realizada em quatro linhas espaçadas de 90 graus na direção circunferencial do pneu, cada qual contendo cinco pontos de medição distribuídos lateralmente na banda de rodagem, conforme apresentadas abaixo as Figura 18 e Figura 19 (TWTESTES, 2017; IDIADA 2019).



Figura 18: Medição do pneu realizada a cada 90 graus (Arquivo pessoal).

Na **Figura 19** são mostrados os pontos de medição do pneu localizados lateralmente ao longo sua banda de rodagem, no entanto, a quantidade de pontos laterais pode variar devido ao tamanho e a especificação de cada pneu. O pneu usado nos ensaios tem cinco pontos de medições de profundidade do sulco, onde foram coletados os dados e apresentados neste trabalho. No entanto, foram usados somente os pontos centrais, que apresentam valores mais constantes para a projeção da vida útil dos pneus.

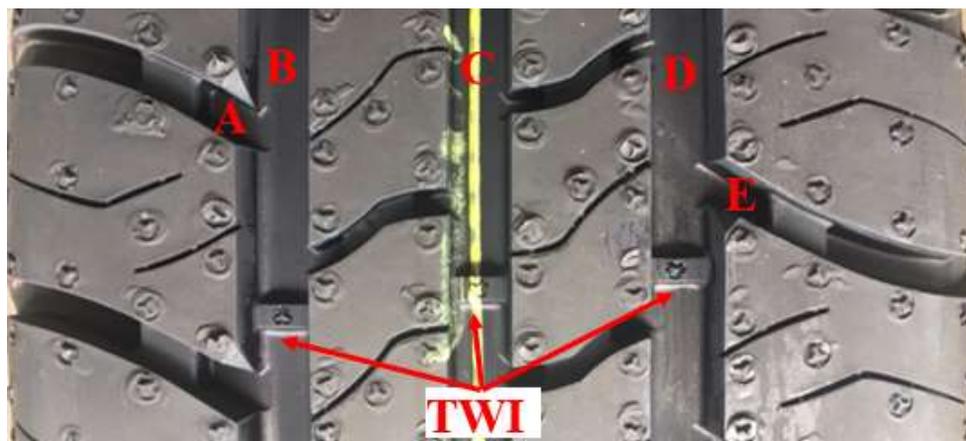


Figura 19: Pontos de medição dos sulcos (Arquivo pessoal).

O equipamento utilizado nas medições de profundidade dos sulcos dos pneus é um profundímetro digital para sulcos de pneus, conforme a **Figura 20**. Especificações do profundímetro digital são: faixa de medição 0 – 30 mm ou 0 – 1,2", resolução 0,01 mm ou 0,0005", exatidão +/- 0,03 mm e velocidade de medição < 1,5 m/s (Mitutoyo, 2011).



Figura 20: Profundímetro digital (Arquivo pessoal).

3.2 Resultado Experimental dos Testes Controlados (*Captive*)

Após algumas semanas de testes em campo, muitos quilômetros percorridos e milhares de litros de combustíveis gastos na rodagem dos pneus, nos resultados apresentados estão as medições coletadas da profundidade dos sulcos dos pneus, nos quatro pontos circunferências dos pneus e nos cinco pontos ao longo da banda de rodagem. É possível identificar o ponto de maior desgaste, a posição do pneu montado no veículo e caso tenha-se um desgaste desuniforme da banda de rodagem do pneu, é possível identificar se o veículo apresenta um erro de projeto de direção ou suspensão, visto que o veículo foi alinhado, configurado e calibrado conforme os procedimentos indicados pelo fabricante do mesmo durante todo o teste.

A Tabela 2 apresenta as medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência com as características 185/65R15 quando novos, antes de iniciar os ensaios e a Tabela 3 apresenta as medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos com as características 195/55R16 também quando novos, antes de iniciar os ensaios e assim sucessivamente até atingir a quilometragem final de 30000 km percorridos para ambos os pneus, a Tabela 4 apresenta os pneus de referência e a Tabela 5 os pneus propostos ao final do teste.

Tabela 2: Profundidade dos sulcos dos pneus de referência novos ou 0 km

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,8	6,9	7,4	7,0	5,8
90°	5,8	7,1	7,4	7,0	6,0
180°	5,7	7,0	7,4	7,0	5,9
270°	5,7	7,0	7,4	7,0	6,0
Média dos Sulcos	5,8	7,0	7,4	7,0	5,9

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,8	7,0	7,4	7,1	6,0
90°	5,7	7,0	7,4	7,1	6,0
180°	5,8	7,0	7,5	7,1	6,1
270°	5,8	7,0	7,4	7,0	6,0
Média dos Sulcos	5,8	7,0	7,4	7,1	6,0

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,8	7,0	7,4	7,1	5,8
90°	5,7	7,0	7,4	7,0	6,0
180°	5,7	6,9	7,3	7,0	6,0
270°	5,8	7,0	7,4	7,0	5,9
Média dos Sulcos	5,8	7,0	7,4	7,0	5,9

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,7	7,0	7,3	7,0	5,9
90°	5,7	7,0	7,3	7,0	5,9
180°	5,7	7,0	7,3	7,0	6,0
270°	5,7	7,0	7,3	6,9	6,0
Média dos Sulcos	5,7	7,0	7,3	7,0	6,0

Tabela 3: Profundidade dos sulcos dos pneus propostos novos ou 0 km.

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,6	7,0	7,3	7,1	5,8
90°	5,6	7,0	7,3	7,0	5,9
180°	5,7	7,0	7,3	7,0	5,8
270°	5,7	7,0	7,2	7,1	5,8
Média dos Sulcos	5,7	7,0	7,3	7,1	5,8

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,6	7,0	7,4	7,0	5,8
90°	5,5	7,1	7,3	7,0	5,8
180°	5,7	7,1	7,3	7,1	5,8
270°	5,7	7,0	7,3	7,2	5,8
Média dos Sulcos	5,6	7,1	7,3	7,1	5,8

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,7	7,0	7,4	7,0	5,8
90°	5,7	7,0	7,3	7,0	5,8
180°	5,7	6,9	7,3	7,0	5,8
270°	5,7	6,9	7,4	7,0	5,8
Média dos Sulcos	5,7	7,0	7,4	7,0	5,8

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,7	7,0	7,3	7,0	5,8
90°	5,7	7,1	7,3	7,0	5,9
180°	5,7	7,0	7,3	7,0	5,8
270°	5,7	7,0	7,3	7,0	5,8
Média dos Sulcos	5,7	7,0	7,3	7,0	5,8

Tabela 4: Profundidade dos sulcos dos pneus de referência após 30000 km percorridos.

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	2,9	2,9	3,0	3,1	2,1
90°	2,7	3,0	2,8	3,0	2,1
180°	2,9	2,7	2,5	3,0	2,0
270°	3,1	2,8	2,5	2,9	2,1
Média dos Sulcos	2,9	2,9	2,7	3,0	2,1
Desgaste dos Sulcos	2,9	4,1	4,7	4,0	3,8
Média do desgaste	3,9				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	3,9				
km / mm	7700				
Quilometragem projetada [km]	38499				
% desgaste	78%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	2,9	3,6	3,4	3,8	2,8
90°	2,9	3,5	3,3	3,7	2,8
180°	3,0	3,5	3,1	3,4	2,6
270°	3,0	3,5	3,2	3,7	2,7
Média dos Sulcos	3,0	3,5	3,3	3,7	2,7
Desgaste dos Sulcos	2,8	3,5	4,1	3,4	3,3
Média do desgaste	3,4				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,7				
Média do desgaste [mm]	3,4				
km / mm	8832				
Quilometragem projetada [km]	45044				
% desgaste	67%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,9	4,4	5,0	5,3	4,4
90°	4,2	4,6	5,1	5,0	4,7
180°	3,8	4,1	4,8	5,0	4,4
270°	4,1	4,5	5,2	5,1	4,1
Média dos Sulcos	4,0	4,4	5,0	5,1	4,4
Desgaste dos Sulcos	1,8	2,6	2,4	1,9	1,5
Média do desgaste	2,0				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	2,0				
km / mm	15015				
Quilometragem projetada [km]	75073				
% desgaste	40%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,1	3,9	4,3	4,9	4,7
90°	4,1	4,4	4,6	5,0	4,6
180°	4,0	4,4	4,5	5,0	4,9
270°	4,0	3,9	4,1	4,7	4,8
Média dos Sulcos	4,1	4,2	4,4	4,9	4,8
Desgaste dos Sulcos	1,6	2,8	2,9	2,1	1,2
Média do desgaste	2,1				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	2,1				
km / mm	14300				
Mileage projected [km]	71498				
% worn	42%				

Tabela 5: Profundidade dos sulcos dos pneus propostos após 30000 km percorridos.

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	2,2	2,4	1,7	2,2	1,9
90°	2,0	2,1	1,7	2,2	1,9
180°	2,1	2,4	1,8	2,1	1,9
270°	2,0	2,5	2,0	2,5	1,9
Média dos Sulcos	2,1	2,4	1,8	2,3	1,9
Desgaste dos Sulcos	3,6	4,6	5,5	4,8	3,9
Média do desgaste	4,5				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	4,5				
km / mm	6673				
Quilometragem projetada [km]	33366				
% desgaste	90%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	2,2	2,5	2,1	2,5	2,3
90°	2,2	2,4	1,9	2,3	2,2
180°	2,3	2,6	2,0	2,6	2,3
270°	2,3	2,5	1,9	2,4	2,2
Média dos Sulcos	2,3	2,5	2,0	2,5	2,3
Desgaste dos Sulcos	3,3	4,6	5,3	4,6	3,5
Média do desgaste	4,3				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	4,3				
km / mm	6983				
Quilometragem projetada [km]	34917				
% desgaste	86%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,3	3,5	3,9	4,3	4,3
90°	3,2	3,8	4,0	4,6	4,2
180°	3,1	3,6	3,6	4,4	4,3
270°	3,3	3,6	4,0	4,5	4,4
Média dos Sulcos	3,2	3,6	3,9	4,5	4,3
Desgaste dos Sulcos	2,5	3,4	3,5	2,5	1,5
Média do desgaste	2,7				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	2,7				
km / mm	11122				
Quilometragem projetada [km]	55609				
% desgaste	54%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,7	3,8	4,0	4,5	4,6
90°	3,3	3,5	3,8	4,3	4,5
180°	3,5	3,5	3,8	4,3	4,3
270°	3,7	4,0	4,4	4,7	4,5
Média dos Sulcos	3,6	3,7	4,0	4,5	4,5
Desgaste dos Sulcos	2,1	3,3	3,3	2,5	1,3
Média do desgaste	2,5				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	2,5				
km / mm	10810				
Mileage projected [km]	54052				
% worn	50%				

Os resultados das medições realizadas nos ensaios apresentam os valores de desgaste da banda de rodagem, quilometragem projetada, quilômetros rodados por milímetro gasto e percentagem de desgaste somente após a segunda medição realizada, ou seja, ao final de 5000 km percorridos, pois quando novo, o pneu não apresenta desgaste para a realização dos cálculos de projeção de quilometragem.

Durante os experimentos em campo realizados pela EC em testes de durabilidade de pneus, o veículo que estava equipado com os pneus propostos sofreu uma perfuração, o pneu

traseiro direito (TD) foi trocado após 1971 km percorridos. O teste é finalizado quando os pneus dianteiros alcançam o TWI ou após a rodagem da quilometragem solicitada, por esse motivo, a troca do pneu traseiro não teve influência nos resultados finais dos testes em campo. Após o veículo ter rodado 5000 km, a segunda medição dos sulcos dos pneus foi realizada. Os resultados apresentados nesta medição demonstram um desgaste semelhante entre os pneus dianteiros, ambos os pneus sofreram um desgaste de 16% de profundidade dos sulcos após os 5000 km percorridos, ao contrário dos pneus traseiros que não apresentam desgaste similares, devido o pneu TD ter sido trocado antes da segunda medição por ter sofrido um dano. O pneu traseiro esquerdo (TE) mostrou um desgaste de 6% e o pneu TD um desgaste de 2%. Conseqüentemente, os resultados das medições posteriores do pneu TD também apresentam um desgaste inferior ao pneu TE por ter sido trocado.

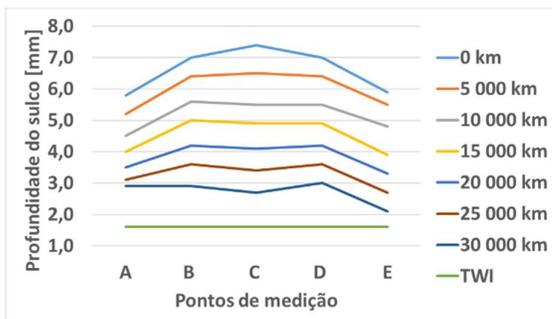
As medições de profundidade dos sulcos dos ombros dos pneus, apresentam valores de profundidade inferiores comparados com os valores do centro da banda de rodagem. A parte central do pneu tem a função de escoar a água do pavimento molhado para a parte traseira do pneu, por esse motivo os sulcos centrais são mais profundos. Os sulcos dos ombros são menores e por consequência os blocos são mais rígidos, devido a responsabilidade no esforço sofrido em curvas, o que ajuda o veículo a manter a trajetória quando em movimento curvilíneo.

Como esperado, pelas medições realizadas é possível verificar que os pneus traseiros sofreram desgastes inferiores comparados aos pneus dianteiros. Isso se deve aos veículos utilizados neste experimento possuírem tração dianteira. Conseqüentemente a quilometragem projetada dos pneus traseiros será significativamente superior aos pneus dianteiros.

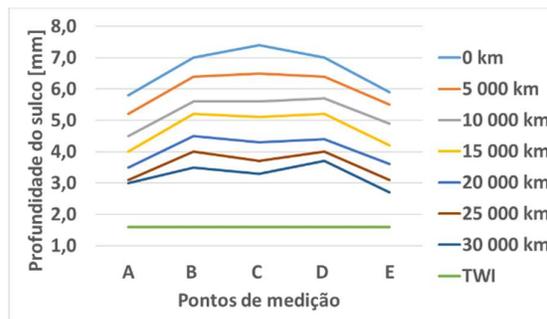
As medições de profundidade dos sulcos dos pneus realizadas no experimento em campo, são apresentados graficamente conforme Figura 21 para os pneus de referência. Nos pneus traseiros é possível notar um desgaste maior da banda de rodagem nas extremidades dos pneus, o ombro esquerdo do pneu esquerdo e ombro direita do pneu direito. Um ângulo excessivo de cambagem positiva nas rodas traseiras pode ter sido a causa desse desgaste irregular. Os pneus dianteiros apresentaram um desgaste mais uniforme comparados com os traseiros.

As medições apresentadas, contemplam apenas as primeiras e últimas medições, as intermediárias no APÊNDICE A.

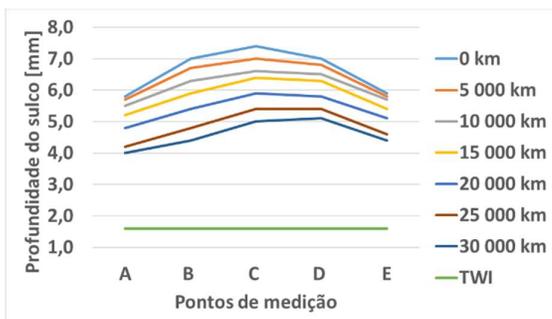
(a) Dianteiro Esquerdo (DE)



(b) Dianteiro Direito (DD)



(c) Traseiro Esquerdo (TE)



(d) Traseiro Direito (TD)

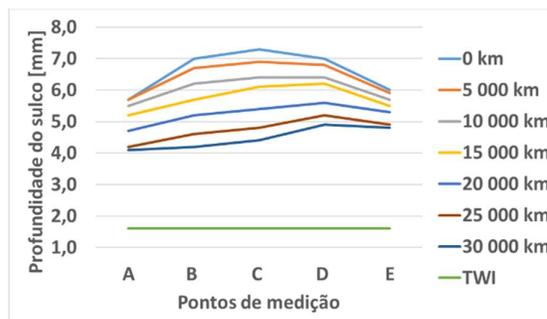
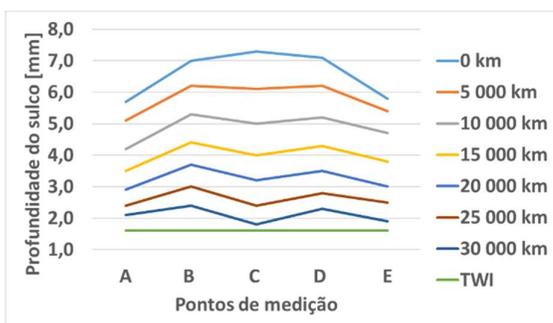


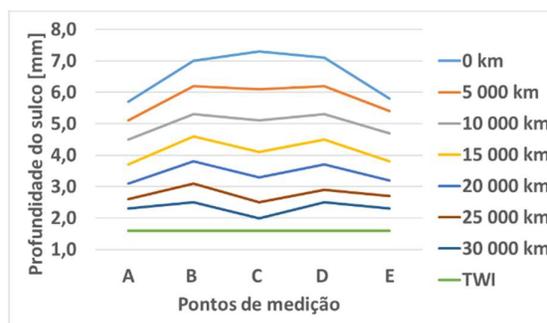
Figura 21: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência.

Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos realizadas nos ensaios em campo, são apresentadas na Figura 22. Assim como os pneus de referência, os pneus propostos apresentaram desgaste uniforme dos pneus dianteiros e os pneus traseiros maior desgaste nos ombros, o que pode indicar um erro de projeto, visto que os dois veículos apresentaram o mesmo desgaste irregular, provenientes da cambagem positiva nas rodas traseiras.

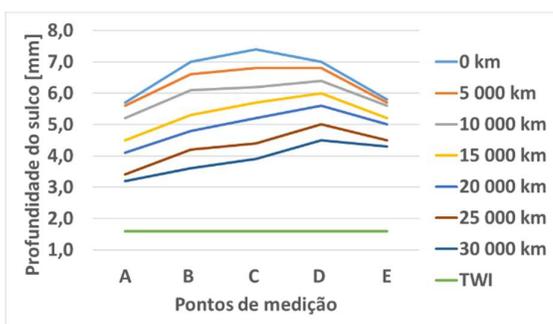
(a) Dianteiro Esquerdo (DE)



(b) Dianteiro Direito (DD)



(c) Traseiro Esquerdo (TE)



(d) Traseiro Direito (TD)

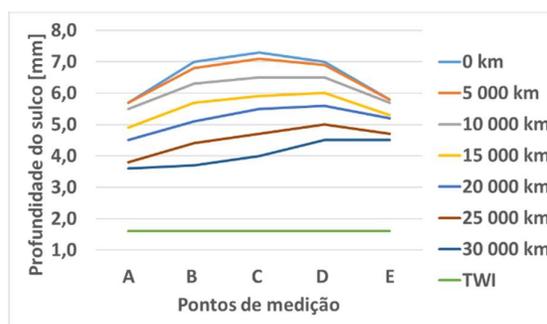


Figura 22: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos.

Pelos gráficos apresentados na Figura 21 e Figura 22, respectivamente, é possível observar que tanto os pneus de controle quanto os pneus propostos sofreram um desgaste maior na posição traseira esquerda, quando comparados aos pneus da traseira direita de ambos veículos. Isto pode ocorrer, por consequência do desalinhamento da cambagem traseira do veículo.

A Tabela 4 apresenta os valores projetados da vida útil dos pneus de referência e a Tabela 5 os valores dos pneus propostos, após percorrerem a distância de 30000 km nos experimentos realizados em campo pela EC. Os resultados percentuais de desgaste da banda de rodagem de ambos os pneus, de referência e propostos montados na posição dianteira esquerda (DE), apresentam um desgaste superior ao pneu da posição dianteira direita (DD) a partir de 10000 km percorridos. Por consequência a projeção da vida útil dos pneus (DE), apresentam valores inferiores ao lado direito. Isto pode ocorrer, por consequência do desalinhamento da cambagem dianteira do veículo. O mesmo acontece com o pneu traseiro direito (TD), que sofre

um desgaste superior ao pneu montado na posição traseira esquerda (TE). Isso só é possível identificar no pneu referência, já que o pneu TD da amostra proposta foi trocado de forma prematura devido a uma perfuração durante os ensaios.

A Tabela 6 apresenta a projeção da vida útil dos pneus de referência e os pneus propostos ao final dos testes, utilizando a metodologia de projeção da EC após percorrerem 30000 km nos testes em campo de durabilidade. É possível observar pelos dados finais de projeção, que o pneu proposto não atingiu os valores de quilometragem do pneu de referência, o que ocasionou a solicitação de melhoria do composto da banda de rodagem por conta do solicitante do teste. Como visto anteriormente, o pneu proposto deve projetar no mínimo 40000 km ou a mesma quilometragem do pneu de referência.

Tabela 6: Projeção da vida útil dos pneus após 30000 km.

Posição	Projeção da vida útil do pneu referência (km) 185/65R15	Projeção da vida útil do pneu proposto (km) 195/55R16
DE	38499	33366
DD	45044	34917
TE	75073	55609
TD	71498	54056

3.3 Metodologia Experimental dos Testes de Campo (*Focus*)

A contrário da EC em testes de durabilidade, os ensaios realizados em campo têm muitos fatores externos que não são controlados. Neste caso, os pneus foram montados em quatro veículos (táxis) do mesmo modelo e a rodagem dos pneus foi realizada conforme demanda de trabalho dos veículos, ou seja, a rota não foi controlada como nos testes de *captive*. Não é possível determinar o percentual de rodagem na cidade, nem mesmo para o uso em rodovias. Também a carga do veículo não foi controlada devido ao número de passageiros que varia durante as viagens. O motorista dirigiu até o final do teste como um condutor normal, que faz o uso do seu veículo de maneira simplória, em cidade e rodovias (Procedimento Interno, 2000).

Este ensaio não contemplou um pneu de referência, para testes não controlados, normalmente são montados no mínimo quatro veículos com o mesmo pneu afim de eliminar variáveis externas. Esses pneus tinham a especificação 195/65R15 e fabricação brasileira. Também é possível utilizar pneus de referência e propostos, quando se comparam diferentes pneus, o que não ocorreu neste teste. A pressão utilizada nos pneus foi a recomendada pelo fabricante dos veículos, 35 psi na dianteira e na traseira.

Os veículos utilizados nos experimentos são veículos comerciais, fabricados no Brasil e de tração dianteira. No entanto, dos quatro veículos utilizados nos testes, três veículos são equipados com cilindro de gás GNV (Gás Natural Veicular) montados no porta-malas, alterando o peso original dos veículos e tinham capacidade de cinco lugares, incluindo o motorista. No caso do veículo que não contemplou o cilindro de gás natural é equipado com mais dois bancos, num total de sete lugares, incluindo o motorista. É recomendável quatro veículos similares, com o objetivo de diminuir variáveis externas no desgaste dos pneus, pois o peso do veículo influencia no desgaste dos pneus.

Os pneus mantiveram suas posições nos veículos durante todo o teste, não foi realizado o rodízio para assegurar o valor mais crítico nos testes de rodagem de desgaste, assim como nos testes controlados. Neste experimento foram realizadas medições de profundidade dos sulcos dos pneus a cada 3000 km até alcançar 12000 km rodados, a primeira medição foi realizada com os pneus novos, 0 km. A cada medição realizada, uma planilha de dados com as medições de profundidade dos sulcos dos pneus também foi preenchida.

A rodagem foi realizada até 90% da profundidade dos sulcos dos pneus, para em seguida fazer uma comparação entre a quilometragem percorrida e a quilometragem projetada pelo modelo proposto neste trabalho. Os testes foram interrompidos para não haver maior desgaste da banda de rodagem e ultrapassar o TWI, pois não é possível saber o momento exato do desgaste da banda de rodagem até alcançar o TWI, por isso, os experimentos foram interrompidos na profundidade próxima ao mesmo (Procedimento Interno, 2000).

As medições de profundidade dos sulcos dos pneus, foram realizadas da mesma forma que os testes de *captive*, em quatro linhas espaçadas de 90 graus na direção circunferencial do pneu, cada qual contendo cinco pontos de medição distribuídos lateralmente na banda de rodagem (Procedimento Interno, 2000; TWTESTES 2017; IDIADA 2020). O equipamento utilizado para as medições de profundidade dos sulcos dos pneus dos testes em campo, também foi o mesmo utilizado nas medições dos testes controlados, conforme a Figura 20.

A **Figura 23** apresenta um exemplo dos veículos utilizados nos testes. Foram quatro veículos modelo Spin da marca Chevrolet®.



Figura 23: Exemplo de veículo utilizado nos testes (Arquivo pessoal).

3.4 Resultado Experimental dos Testes de Campo (*Focus*)

Após aproximadamente nove meses de testes em campo, os resultados apresentam as profundidades dos sulcos dos pneus coletados nas medições durante a rodagem até atingir a distância de 12000 km percorridos. É possível identificar o ponto de maior desgaste, a posição do pneu montado no veículo e também identificar o veículo que realizou os testes com maior carga e qual deles é equipado com cilindro de gás natural, devido ao acréscimo de peso na traseira, os pneus traseiros apresentam maior desgaste quando comparados ao veículo sem o cilindro de gás natural.

Os resultados apresentados a seguir, são referentes apenas a um dos quatro veículos utilizados nos testes (veículo 1), com as características de cinco lugares e equipado com um cilindro de gás natural no porta-malas de 15 m³. Este veículo percorreu a distância total de 57354 km durante todo o teste, sua rodagem foi realizada em rodovias e cidades, não foi possível identificar o percentual de rodagem em rodovias, cidades ou estradas não pavimentadas, o veículo percorreu diversos tipos de pavimentos.

O peso do veículo sem motorista, com $\frac{1}{2}$ tanque de gás natural e $\frac{1}{4}$ do tanque de álcool foi de 1380 kg. O veículo foi pesado em uma superfície plana, utilizando quatro balanças

idênticas para não haver variação na altura entre as partes dianteira e traseira, as balanças têm a precisão de ± 10 kg e calibração RBC (Rede Brasileira de Calibração).

A Tabela 7 apresenta as medições de profundidade dos sulcos dos pneus, com as características 195/65R15 quando novos, antes de iniciar os ensaios e sucessivamente até atingir a quilometragem de 12000 km rodados:

Tabela 7: Profundidade dos sulcos dos pneus novos ou 0 km.

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,4	7,8	7,8	7,8	5,4
90°	5,5	7,6	7,8	7,6	5,6
180°	5,4	7,4	7,8	7,5	5,6
270°	5,6	7,5	7,7	7,6	5,6
Média dos Sulcos	5,5	7,6	7,8	7,6	5,6

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,5	7,7	7,7	7,4	5,5
90°	5,5	7,3	7,8	7,5	5,6
180°	5,5	7,5	7,7	7,4	5,6
270°	5,6	7,6	7,8	7,6	5,6
Média dos Sulcos	5,5	7,5	7,8	7,5	5,6

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,6	7,6	7,8	7,5	5,6
90°	5,6	7,4	7,8	7,5	5,7
180°	5,6	7,3	7,9	7,6	5,7
270°	5,4	7,6	7,8	7,5	5,5
Média dos Sulcos	5,6	7,5	7,8	7,5	5,6

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,5	7,5	7,7	7,5	5,5
90°	5,6	7,5	7,8	7,6	5,6
180°	5,5	7,5	7,8	7,6	5,6
270°	5,6	7,6	7,9	7,8	5,7
Média dos Sulcos	5,6	7,5	7,8	7,6	5,6

Tabela 8: Profundidade dos sulcos dos pneus após 12000 km percorridos.

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	6,3	6,3	6,3	4,3
90°	4,5	6,2	6,2	6,3	4,4
180°	4,3	6,3	6,3	6,2	4,6
270°	4,4	6,2	6,2	6,3	4,5
Média dos Sulcos	4,4	6,3	6,3	6,3	4,5

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	6,1	6,0	6,2	4,4
90°	4,2	6,1	6,1	6,2	4,5
180°	4,4	6,2	6,0	6,1	4,6
270°	4,5	6,1	6,0	6,2	4,4
Média dos Sulcos	4,4	6,1	6,0	6,2	4,5

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	6,4	6,8	6,8	4,8
90°	4,4	6,4	6,7	7,0	4,8
180°	4,5	6,5	6,7	6,9	4,8
270°	4,5	6,5	6,7	6,9	4,8
Média dos Sulcos	4,5	6,5	6,7	6,9	4,8

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	6,5	6,5	6,6	4,7
90°	4,7	6,5	6,5	6,6	4,7
180°	4,7	6,4	6,3	6,5	4,8
270°	4,6	6,6	6,5	6,6	4,8
Média dos Sulcos	4,6	6,5	6,5	6,6	4,8

As medições apresentadas acima, contemplam apenas as primeiras e últimas medições, as intermediárias encontram-se no APÊNDICE B.

Como apresentado anteriormente, foram utilizados quatro veículos neste experimento, no entanto, os resultados das medições de profundidade dos sulcos dos pneus dos veículos 2, 3 e 4, se encontram no APÊNDICE C.

A **Figura 24** apresenta um dos pneus em estado novo, ou seja, antes da realização dos ensaios e durante a preparação dos testes:



Figura 24: Pneu no estado novo (Arquivo pessoal).

Os dezesseis pneus que equiparam os quatro veículos têm as mesmas características técnicas de construção, desenho da banda de rodagem e compostos, podemos afirmar que os pneus são iguais. A **Figura 24** apresenta apenas um pneu novo (0 km) como exemplo de todos os pneus montados nos veículos.

As medições de profundidade dos sulcos que foram apresentadas anteriormente são até 12000 km percorridos, no entanto, a **Figura 25** apresenta os quatro pneus do veículo 1 ao final dos testes, ou seja, após a distância de 57354 km percorridos:

(a) Pneu dianteiro esquerdo (DE)



(b) Pneu dianteiro direito (DD)



(c) Pneu traseiro esquerdo (TE)



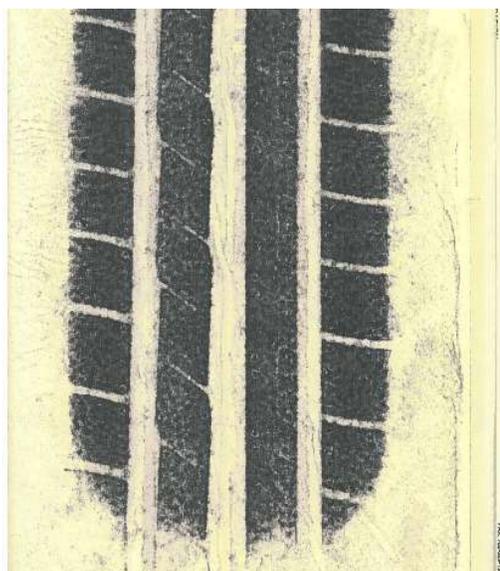
(d) Pneu traseiro direito (TD)



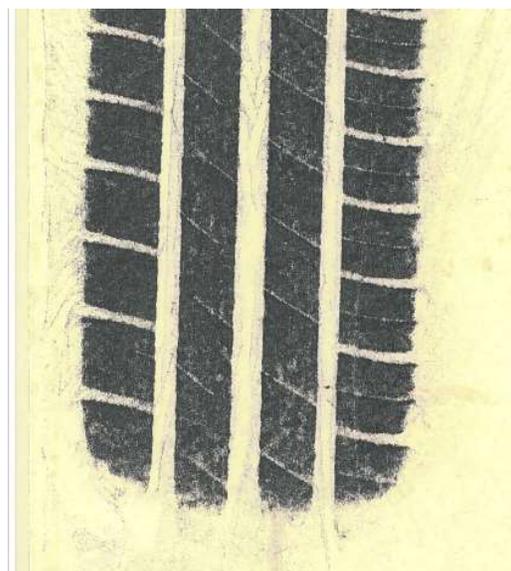
Figura 25: Pneus após a distância de 57354 km percorridos (Arquivo pessoal).

A Figura 26 apresenta a pegada ao solo do pneu dianteiro direito (DD) no início dos ensaios, durante e até o término dos testes. Os *footprints* foram coletados apenas de um dos quatro veículos utilizados nos testes para demonstrar o desgaste dos pneus. Os pneus rodaram os mesmos 57354 km, como apresentados na figura anterior.

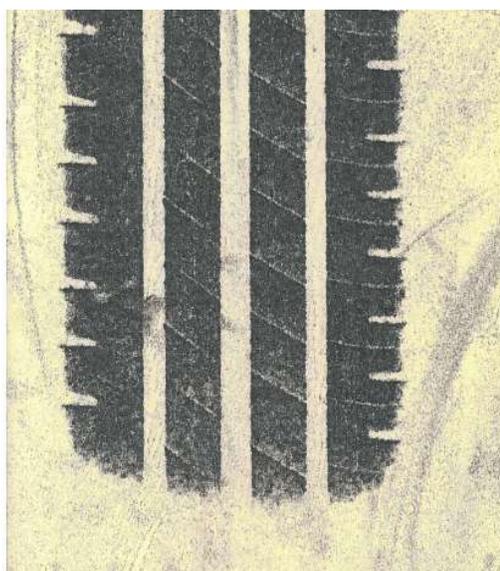
(a) Pneu dianteiro direito (DD) – 0 km



(b) Pneu dianteiro direito (DD) – 12000 km



(c) Pneu dianteiro direito (DD) - 31000 km



(d) Pneu dianteiro direito (DD) - 57000 km

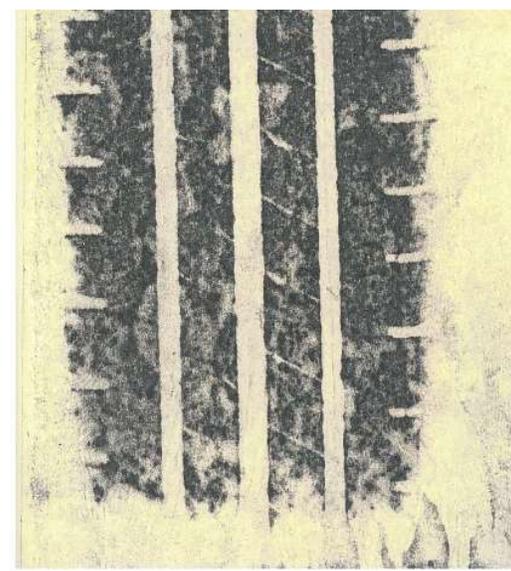
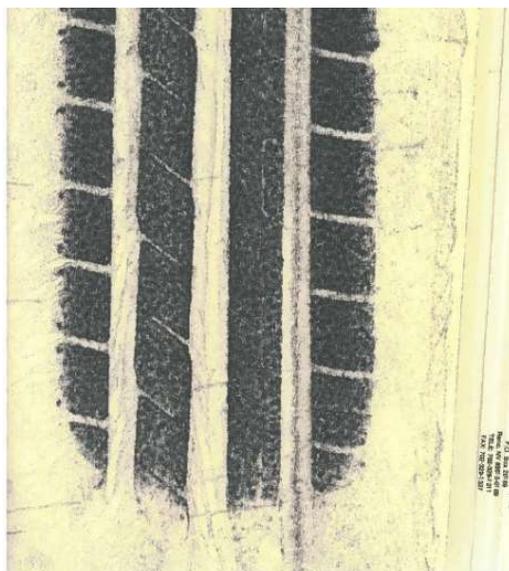


Figura 26: Pegadas do Pneu Dianteiro Direito (DD) ao Solo (Arquivo pessoal).

A **Figura 27** apresenta a pegada ao solo do pneu traseiro direito (TD). Os *footprints* também foram coletados apenas de um dos quatro veículos utilizados nos testes com o mesmo objetivo para demonstrar o desgaste dos pneus. Os pneus rodaram os mesmos 57354 km, como apresentado anteriormente.

(a) Pneu traseiro direito (TD) – 0 km



(b) Pneu traseiro direito (TD) – 12000 km



(c) Pneu traseiro direito (TD) - 31000 km



(d) Pneu traseiro direito (TD) - 57000 km

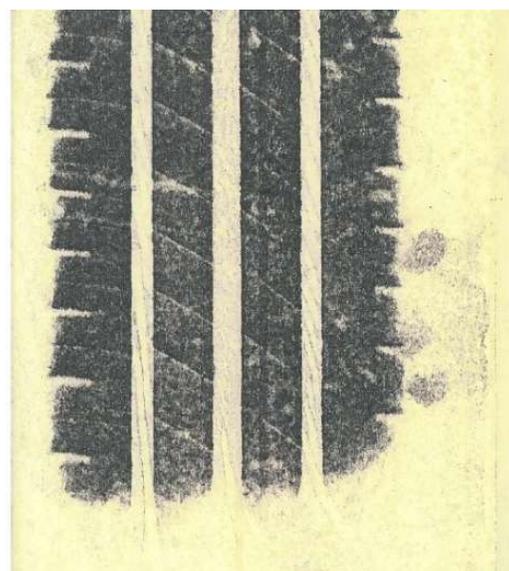


Figura 27: Pegadas do Pneu Traseiro Direito (TD) ao Solo (Arquivo pessoal).

Como apresentado anteriormente, a Figura 24 (a) apresenta o pneu no estado novo é possível observar que todos os sulcos e arestas da banda de rodagem são bem notáveis e evidentes. Estes sulcos e arestas têm a função de escoar a água e ajudar na tração em pavimentos severos, como a areia e a lama.

Os sulcos e as arestas do pneu fecham no decorrer da vida útil dos pneus, o que provoca o fenômeno da aquaplanagem em pneus gastos no período de chuva. Por isso, a importância da troca dos pneus quando o TWI é alcançado, o que indica a hora correta da substituição dos pneus por motivos de segurança. A Figura 26 (a) apresenta o *footprint* do pneu novo com os sulcos e arestas bem destacados na pegada do pneu, já a Figura 26 (d) apresentada os sulcos mais fechados e as arestas menos evidentes.

Nas imagens das pegadas dos pneus, também é possível notar que os pneus apresentam uma pegada mais arredonda e definida quando novos, o contrário ao final do ensaio, onde é notada uma pegada mais quadrada da banda de rodagem. A Figura 26 (a) e (d) apresentam claramente essa mudança estrutural do pneu devido ao desgaste da banda de rodagem. O desgaste dos pneus também podem ser apresentados graficamente conforme a Figura 28.

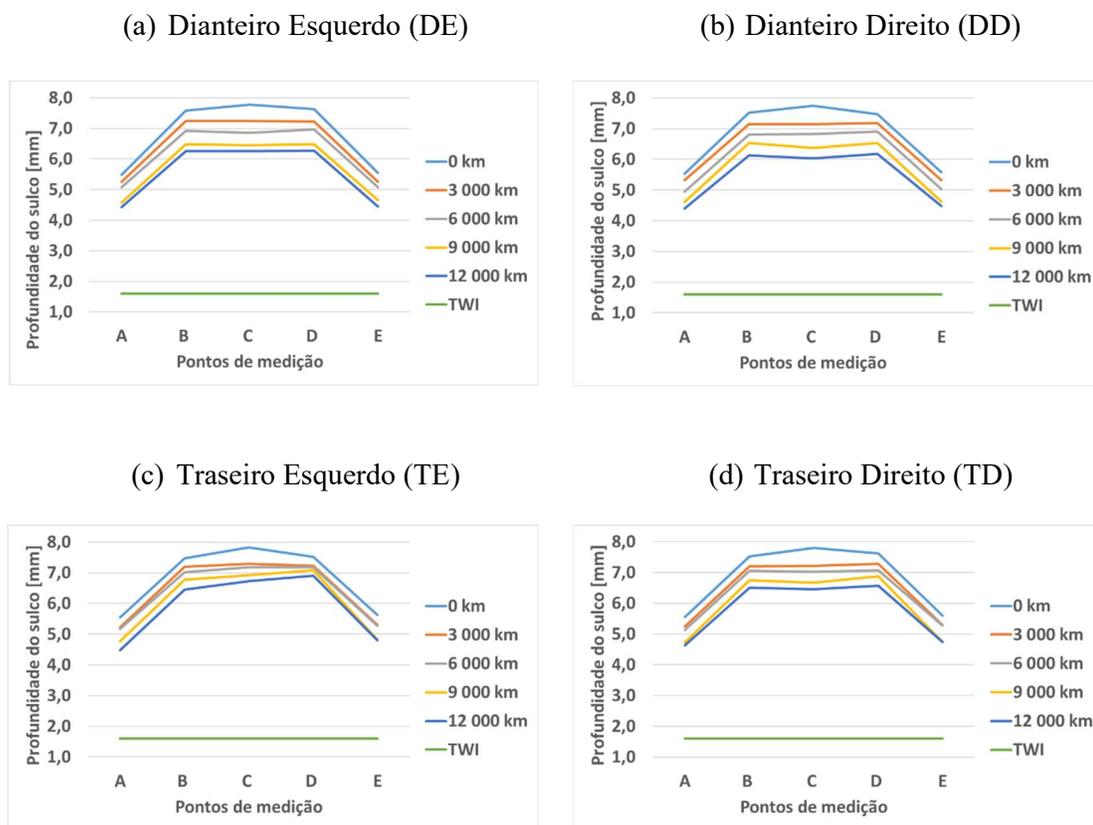


Figura 28: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus do carro 1.

A Figura 28 apresenta graficamente o desgaste dos pneus. Os pneus dianteiros apresentaram um desgaste maior que os pneus traseiros, devido aos veículos utilizados neste experimento possuírem tração dianteira, onde o maior peso do veículo se concentra. Neste experimento, a diferença de desgaste entre dianteira e traseira foi reduzida, pois o veículo é equipado com um cilindro de gás no porta-malas e por ser um veículo de táxi, a grande maioria dos passageiros viajam nos bancos traseiros.

Analisando os gráficos de desgaste dos pneus dos quatro veículos utilizados nos ensaios, foi possível notar que os pneus dianteiros de todos os veículos apresentaram um desgaste mais uniforme quando comparados aos pneus traseiros, que apresentaram um desgaste irregular, conforme a Figura 28 (c) e (d), onde o ombro externo dos pneus sofreram maior desgaste que o ombro interno. Como este fenômeno ocorreu em todos os veículos, podemos afirmar que este desgaste é proveniente da regulagem da suspensão traseira, que apresenta uma regulagem positiva de cambagem. A Figura 29 (a) ilustra a cambagem positiva dos veículos e a Figura 29 (b) ilustra a cambagem negativa da suspensão de um veículo.

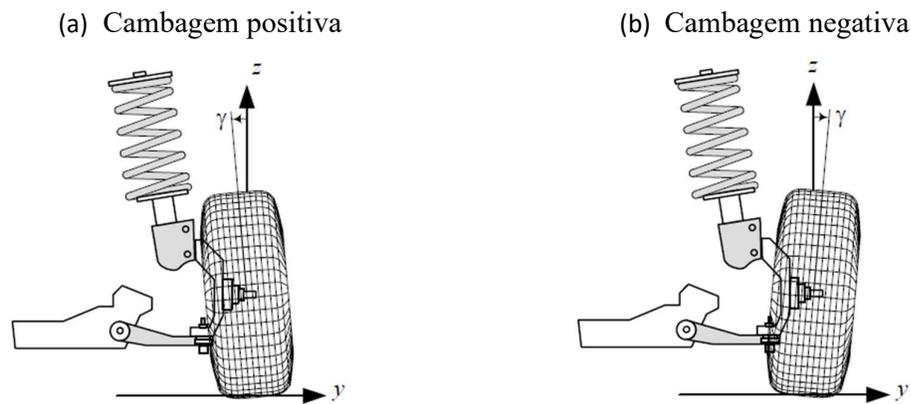


Figura 29: Um exemplo de cambagem positiva e negativa de um carro (Jazar, 2008).

Uma característica do teste de campo (*focus test*) é a utilização de uma rota não controlada. Os pneus são montados em veículos de frotas que percorrem diferentes percursos, assim como foi realizado neste teste, onde foram utilizados quatro veículos similares com diferentes motoristas e rotas. O objetivo principal em utilizar mais de um veículo é a eliminação de fatores externos não controlados que possam influenciar nos resultados finais dos testes.

Os quatro veículos iniciaram e finalizaram os testes nos mesmos dias. No entanto, os veículos percorreram distâncias diferentes, pois como se tratam de taxistas, a distância percorrida por cada veículo foi conforme a demanda de trabalho, sendo assim, diferentes

quilometragens foram encontradas entre os quatro veículos. Como por exemplo, o carro 1 percorreu 57354 km, o carro 2 percorreu 47130 km, o carro 3 a distância de 46926 km e por último o carro 4 a distância de 49796 km.

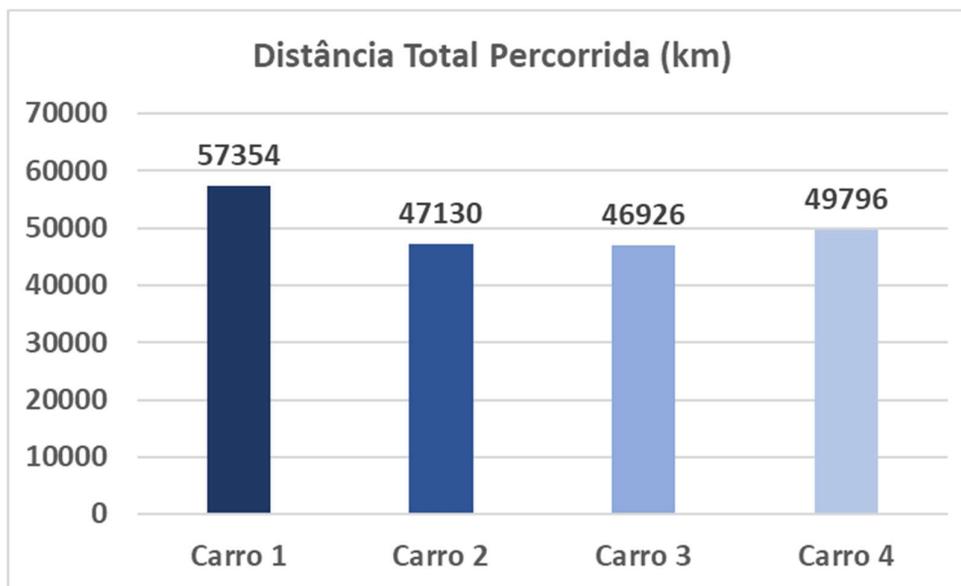


Figura 30: Distância total percorrida

Ainda com diferentes quilometragens percorridas, todos os carros rodaram os pneus até os sulcos se aproximarem do TWI. Mesmo com a maior quilometragem percorrida, o carro 1 chegou ao final do teste com os sulcos mais profundos que os outros veículos e o desgaste dos pneus foram mais uniformes.

Como falado anteriormente, o objetivo é rodar mais de um veículo para eliminar fatores externos como por exemplo, motoristas, veículos e diferentes rodovias. Com a análise de desgaste dos pneus dos quatro veículos e a distância total percorrida, os dados dos veículos 2, 3 e 4 foram descartados e os resultados inutilizados para a estimativa da vida útil dos pneus testados. Um dos motivos do desgaste excessivo dos pneus é a forma de condução dos motoristas, onde não se preocuparam com o modo de dirigir, nos momentos de partidas e frenagens abruptas e também em curvas com velocidades excessivas, são fenômenos que influenciam diretamente no desgaste irregular e rápido dos pneus, assim como a incorreta calibragem e sua baixa frequência, diferente da recomendada pelos fabricantes.

Como por exemplo, o fabricante do veículo recomenda a pressão de 35 psi dos pneus nas quatro posições. O motorista do carro 3 percebeu que o veículo ficou desconfortável e

alterou a pressão dos quatro pneus para 32 psi sem informar o requisitante do teste. Quando os pneus rodam com baixa pressão, ocorre um desgaste excessivo dos ombros, o que afeta diretamente a vida útil dos pneus, foi o que ocorreu com todos os pneus do carro 3. O mesmo ocorreu com o carro 4 que também reduziu a pressão dos pneus. O motorista do carro 2 esqueceu de calibrar os pneus, o que provocou também desgaste excessivo e principalmente nos ombros, assim como nos carros 3 e 4.

Diferentemente do motorista do carro 1 que, calibrava todos os pneus uma vez por semana sempre quando estavam frios, ou seja, antes de iniciar a rodagem, pois a temperatura interna dos pneus altera sua pressão interna. Realizou uma condução de direção de forma preventiva e segura, sem partidas e frenagens abruptas, curvas de forma suave abaixo do limite de aderência dos pneus e seguiu todas as recomendações do requisitante do teste.

Desta forma, foi possível afirmar que os pneus dos carros 2, 3 e 4, sofreram desgastes excessivos e a vida útil dos pneus foi comprometida. Sendo assim, todos os resultados desses pneus foram desconsiderados.

No início dos testes, todos os quatro motoristas receberam o mesmo treinamento e orientação, o modo de condução do veículo é um dos fatores mais importantes na influência do desgaste dos pneus. Neste treinamento, também foi abordada a importância da calibragem dos pneus semanalmente e sempre antes de iniciar a rodagem. Assim como, o alinhamento dos veículos e balanceamento dos pneus a cada 10000 km percorridos. O cuidado com pavimentos severos para evitar danos aos pneus e evitar curvas com velocidades excessivas também foi ensinado durante este treinamento. Quanto maior o cuidado com os pneus, maior será sua vida.

O teste foi finalizado com a profundidade dos sulcos próximo do TWI, como apresentado anteriormente, não é possível saber o exato momento que a altura do TWI é alcançada. A menor profundidade do pneu DD do carro 1 foi de 2,9 mm, o que seria possível rodar esse pneu até 1,6 mm. O pneu em questão, teve um desgaste de 12203 km por mm gasto.

Como apresentado anteriormente na Figura 30, o veículo 1 ao final do teste percorreu 57354 km, com isso, o pneu DD poderia ter acumulado maior quilometragem, pois ainda restaram 1,3 mm de elastômero para atingir o TWI. Sendo assim, seria possível acrescentar 15864 km na vida útil do pneu.

Utilizando o ajuste exponencial e o método de máxima verossimilhança que, tem como objetivo maximizar o acerto para estimar a vida útil do pneu, o resultado encontrado foi de 75530 km, com intervalo de confiança entre 70410 e 81570 km. Esse intervalo de confiança é um intervalo de possibilidades prováveis estimadas de um parâmetro de interesse de uma população, ou seja, em vez de estimar apenas um parâmetro único possível, é dada uma

amplitude de estimativas prováveis (Montgomery, 2009; Meeker,1998). A região de aceitação ou intervalo de confiança para alcançar os resultados nesta análise foi de 95%. Com o resultado encontrado, podemos afirmar que o modelo proposto apresenta maior eficiência na projeção da vida útil de pneus, pois obtivemos um resultado com erro aproximado de apenas 3%, conforme apresentado na Figura 31. Ao contrário do método utilizado pela EC, que projetou o pneu em 42870 km com erro aproximado de 41%.

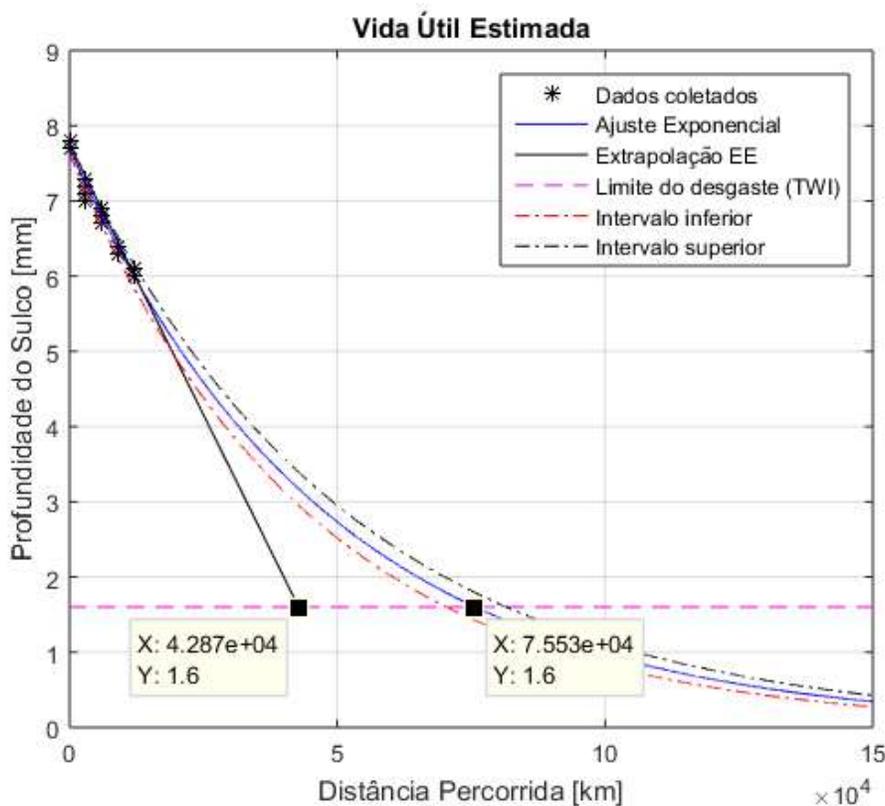


Figura 31: Comparação do Método Proposto e da Extrapolação Utilizado pela EC.

Com os dados de desgaste de pneus coletados pela empresa comercial em mãos, foi possível certificar que o desgaste dos pneus é não linear, assim como tudo no pneu é não linear, ou seja, suas forças laterais, como modeladas por Pacjeka, as forças longitudinais e as forças de arrasto, sendo assim, é razoável presumir que o desgaste também seja não linear (Zeviani et al., 2013).

A estimativa da vida útil de pneus poder realizada tanto por retas, funções logarítmicas, exponenciais e trigonométrica. No entanto, para encontrar esses parâmetros desconhecidos, abordou-se o método exponencial, um dos melhores métodos para estimar um valor fora de uma população conhecida (Montgomery et al., 2013).

O cálculo de quilômetro por milímetro é obtido utilizando a Equação 3.1 (Procedimento Interno, 2000; TWTESTES, 2017; IDIADA, 2019):

$$km/mm = \frac{\text{distância percorrida}}{PI - PF} \quad (3.1)$$

Onde:

km/mm: distância percorrida por milímetro de elastômero gasto

distância percorrida: distância final do veículo

PI: profundidade inicial do sulco

PF: profundidade final do sulco

3.5 Determinação do Método de Estimativa da Vida Útil do Pneu Utilizado por uma Empresa Comercial

A hipótese é de que a empresa comercial de rodagem e durabilidade utilize o método de extrapolação linear para estimar a vida útil dos pneus. Acredita-se que a extrapolação linear utilizada pela EC, considera apenas o primeiro instante de medição (em 0 km) e o último instante de medição. Para comprovar isso, inicialmente implementou-se o método de extrapolação linear, aplicando-o nos resultados dos experimentos e comparou-se com a vida útil informada pela EC.

Uma reta pode ser definida como a menor distância entre dois pontos distintos. Na geometria analítica a equação da reta pode ser definida passando por dois pontos distintos no plano cartesiano. A equação da reta expressa uma função em que x e y são as coordenadas dos pontos pertencentes à reta, A é o coeficiente angular da reta e B o coeficiente linear. Essa é a forma reduzida da equação da reta expressa em função de x e y , onde as duas variáveis possuem uma relação de dependência (Venturi, 2015).

A Equação 3.2, é a equação da reta que apresenta os dois parâmetros utilizados no cálculo: quilometragem para x e profundidade do sulco para y (Venturi, 2015).

$$y = A \cdot x + B \quad (3.2)$$

onde:

y – Variável dependente;

A - Coeficiente angular da reta (inclinação da reta);

x – Variável independente;

B - Coeficiente linear da reta (intercepto).

As Equações 3.3 e 3.4, indicam, respectivamente, o coeficiente angular e linear da reta. Para tal, a reta foi definida pelos pontos 0 (x_1, y_0) e 1 (x_0, y_1) , (Venturi, 2015).

$$A = \left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right) = \operatorname{tg} \theta \quad (3.3)$$

$$B = y_0 - \left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right) \cdot x_0 \quad (3.4)$$

onde:

x_0, x_1, y_0, y_1 - são pontos conhecidos da reta;

θ - Ângulo entre a reta e o eixo das abscissas.

A é graficamente a tangente do ângulo θ , apresentado na Figura 32, em relação ao eixo das abscissas x , e o coeficiente linear B representa o valor numérico por onde a reta passa no eixo das ordenadas y . Todo ponto da reta é dado por um par ordenado que satisfaz sua equação e todo par ordenado que satisfaz sua equação é um ponto da reta. A Figura 32 apresenta todos os parâmetros da reta no plano cartesiano (Venturi, 2015).

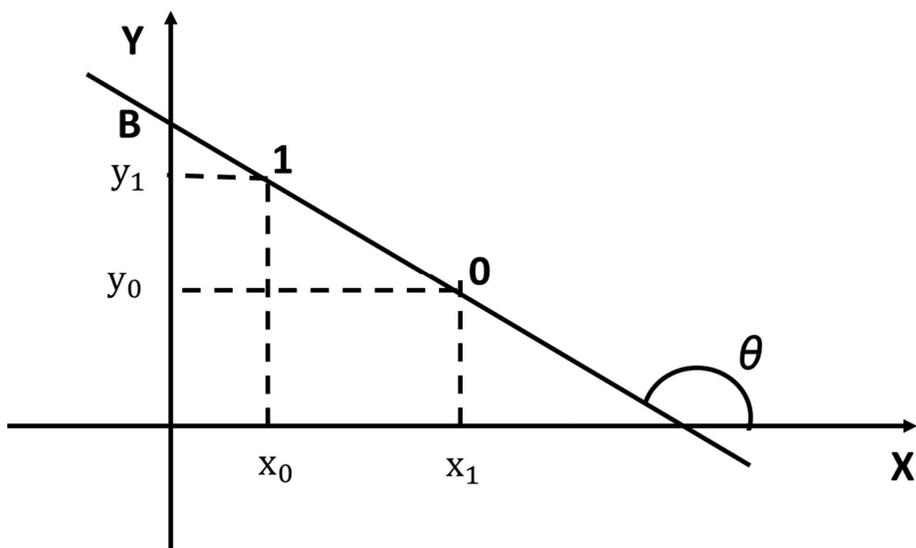


Figura 32: Equação da reta (Adaptado de Venturi, 2015).

Na Tabela 9 são apresentadas comparações entre as projeções da vida útil dos pneus fornecidos pela EC e as projeções obtidas pela extrapolação linear, para cada distância percorrida. A extrapolação linear foi feita através da equação da reta (Equação 3.2). São apresentados os resultados dos pneus nas quatro posições do veículo: dianteiro esquerdo (DE), dianteiro direito (DD), traseiro esquerdo (TE) e traseiro direito (TD). Comparando os resultados da EC com os valores calculados, pode-se observar que os valores são semelhantes, com isso, podemos afirmar que o método utilizado nas projeções é uma extraporação linear.

Tabela 9: Comparação dos resultados da EC e cálculo da equação da reta.

Dianteiro Esquerdo (DE)			Dianteiro Direito (DD)		
Distância percorrida (km)	Projeção vida útil EE (km)	Projeção calculada (km)	Distância percorrida (km)	Projeção vida útil EE (km)	Projeção calculada (km)
4982	41516,0	41516,7	4982	42347,0	42347,0
10008	35743,0	35742,9	10008	36458,0	36457,7
14952	35600,0	35600,0	14952	40134,0	40134,3
19995	35705,0	35705,4	19995	39221,0	39221,0
24988	37861,0	37860,6	24988	41109,0	41109,3
30029	38499,0	38498,7	30029	45044,0	45043,5

Traseiro Esquerdo (TE)			Traseiro Direito (TD)		
Distância percorrida (km)	Projeção vida útil EE (km)	Projeção calculada (km)	Distância percorrida (km)	Projeção vida útil EE (km)	Projeção calculada (km)
4982	124550,0	124550,0	4982	124550,0	124550,0
10008	100080,0	100080,0	10008	83400,0	83400,0
14952	93450,0	93450,0	14952	83067,0	83066,7
19995	83313,0	83312,5	19995	71411,0	71410,7
24988	73494,0	73494,1	24988	65758,0	65757,9
30029	75073,0	75072,5	30029	71498,0	71497,6

A Tabela 10 apresenta os parâmetros da equação da reta utilizada para fazer a extrapolação linear para cada medição de profundidade dos sulcos.

Tabela 10: Dados da equação da reta nos cálculos das projeções.

Profundidade	A	B	y
6,6	-	-	-
6	-1,20E-04	6,6	1,6
5,2	-1,40E-04	6,6	1,6
4,5	-1,40E-04	6,6	1,6
3,8	-1,40E-04	6,6	1,6
3,3	-1,32E-04	6,6	1,6
2,7	-1,30E-04	6,6	1,6

(a) Dados equação da reta do pneu DE

Profundidade	A	B	y
6,7	-	-	-
6,1	-1,20E-04	6,7	1,6
5,3	-1,40E-04	6,7	1,6
4,8	-1,27E-04	6,7	1,6
4,1	-1,30E-04	6,7	1,6
3,6	-1,24E-04	6,7	1,6
3,3	-1,13E-04	6,7	1,6

(b) Dados equação da reta do pneu DD

Profundidade	A	B	y
6,6	-	-	-
6,4	-4,01E-05	6,6	1,6
6,1	-5,00E-05	6,6	1,6
5,8	-5,35E-05	6,6	1,6
5,4	-6,00E-05	6,6	1,6
4,9	-6,80E-05	6,6	1,6
4,6	-6,66E-05	6,6	1,6

(c) Dados equação da reta do pneu TE

Profundidade	A	B	y
6,6	-	-	-
6,4	-4,01E-05	6,6	1,6
6	-6,00E-05	6,6	1,6
5,7	-6,02E-05	6,6	1,6
5,2	-7,00E-05	6,6	1,6
4,7	-7,60E-05	6,6	1,6
4,5	-6,99E-05	6,6	1,6

(d) Dados equação da reta do pneu TD

Com a análise dos resultados do experimento realizado por uma empresa comercial, foi possível comprovar que a mesma realizara este cálculo utilizando extrapolação linear.

4 MATERIAS E MÉTODOS

O modelo proposto neste trabalho tem como objetivo diminuir o tempo de realização dos testes em campo, reduzir os custos do teste, tais como: a quantidade de combustível gasto durante a rodagem, hora-homem na condução dos veículos e até mesmo na locação dos veículos utilizados nos testes. Outro objetivo é aperfeiçoar esses cálculos de projeção utilizando um modelo mais adequado para o cálculo de vida útil dos pneus, um modelo que pode ser aplicado em um material não linear, como os pneus.

A proposta traz como objetivo otimizar o processo de análise, minimizar erros inerentes nos cálculos de vida útil e diminuir a distância rodada nos testes, trazendo benefícios para o solicitante, como maior precisão e confiabilidade nos resultados.

Assim como nos testes da EC, é proposto neste trabalho que as medições dos sulcos dos pneus sejam realizadas em localizações circunferenciais, a cada 90 graus além de medições distribuídas lateralmente na banda de rodagem. Após a mensuração inicial do pneu novo, medidas intermediárias serão realizadas a cada 3000 km feitas cinco medições, totalizando 12000 km rodados, diferentemente da EC e montadoras que fazem as medições a cada 5000 km percorridos, com uma distância mínima percorrida de 40000 km ou 70% da vida útil do pneu (TWTESTES, 2017; IDIADA, 2019).

Diferente da EC, este trabalho propõe que os pneus de referência e propostos sejam pesados no início e no final dos testes. No decorrer dos ensaios, após milhares de voltas dos pneus em contato com o solo, os pneus desgastam sua banda de rodagem perdendo assim sua massa. A comparação de massa perdida entre os pneus, ou seja, o pneu que perde maior massa percentual quando comparado ao seu concorrente, tem menor resistência ao desgaste e este critério pode ser decisivo na escolha dos clientes mais exigentes.

Os pneus mais pesados, com maior massa inicial, apresentam maior desgaste da banda de rodagem e por consequência disto terá perdido maior massa ao final dos testes (Jazar, 2008).

Os pneus mais pesados também apresentam maior resistência ao rolamento, faz-se necessário maior uso de combustível para o deslocamento do veículo. O pneu com maior massa no costado é um pneu com características de menor conforto, pois apresenta menor amortecimento ao passar pelos obstáculos (Gillespie, 1992).

4.1 Métodos de Ajuste de Curvas

Neste capítulo serão abordadas as diferentes formas de ajuste de curvas para desgaste dos pneus, além dos modelos estatísticos utilizados para a estimativa de parâmetros no cálculo da vida útil do pneu. Este cálculo é realizado tendo em vista a precisão desejada na análise, a determinação das estimativas dos parâmetros característicos presentes nos cálculos e dos intervalos de confiança para os parâmetros desconhecidos.

4.1.1 Regressão Linear Simples

Análise de regressão linear simples é um método ou técnica estatística para melhor ajustar uma equação para dados adquiridos, para cada valor de x observa-se o valor correspondente de y . O esquema apresentado na Figura 33 exemplifica as etapas que compõem o método da regressão linear onde, uma população composta por muitos elementos que se relacionam entre si através de duas variáveis, dão origem a uma equação que representa, matematicamente, os dados. Através desta população é possível criar uma amostra com o número de elementos inferiores a população. É a partir desta amostra que será criada a fórmula que vai relacionar as duas grandezas (x, y), esta fórmula é chamada de fórmula da regressão linear, conforme o esquema apresentado (Charnet et al., 2008).

Abaixo um esquema ilustrativo de regressão linear simples:

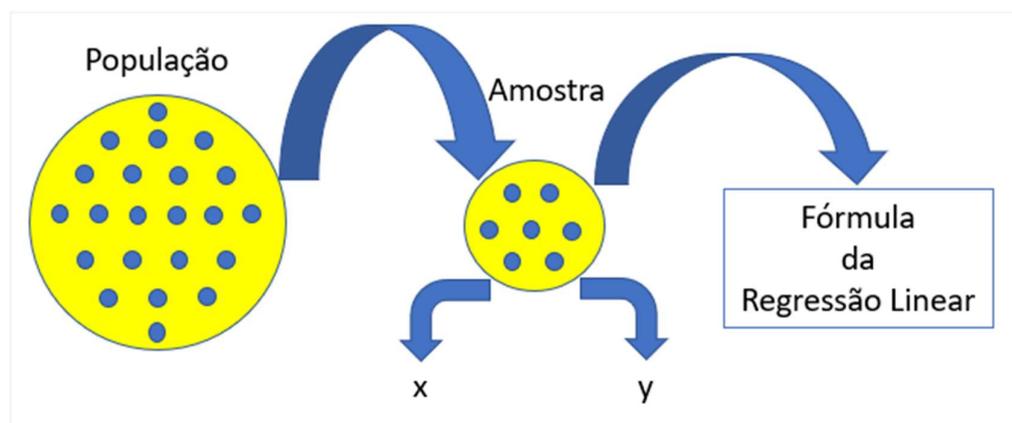


Figura 33: Esquema ilustrativo da regressão Linear (Adaptado de Charnet et al., 2008).

Com a Equação 4.1 é possível estimar uma reta aproximada que representará a tendência desses pontos, conforme proposto pelo cientista alemão por Karl Gauss (1777 - 1855), representado da seguinte forma (Charnet et al., 2008):

$$y = a \cdot x + b + \epsilon \quad (4.1)$$

onde:

y – Variável dependente;

a – Coeficiente angular (inclinação da reta);

x – Variável independente;

b – Intercepto;

ϵ – Erro.

Como apresentado anteriormente, o parâmetro b é chamado intercepto ou coeficiente linear e representa o ponto em que a reta corta o eixo y , quando x é igual a 0. Já o parâmetro a representa a inclinação da reta regressora, chamado de coeficiente de regressão ou coeficiente angular. O erro aleatório ϵ , onde se procuram incluir todas as influências no comportamento da variável y que não podem ser explicadas linearmente pelo comportamento da variável x . $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$, (Charnet et al., 2008).

O parâmetro b chamado de intercepto ou coeficiente linear é determinado pela Equação 4.2 (Charnet et al., 2008):

$$b = \bar{y} - a \cdot \bar{x} \quad (4.2)$$

onde:

\bar{x} – Média dos dados no eixo x ;

\bar{y} – Média dos dados no eixo y ;

Para definir a média dos valores de \bar{x} e \bar{y} , basta dividir o somatório dos valores de x e y pelo número de amostras n , conforme as Equações 4.3 e 4.4 (Charnet et al., 2008):

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (4.3)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y}{n} \quad (4.4)$$

A inclinação da reta ou coeficiente angular é determinado pela Equação 4.5 (Charnet et al., 2008):

$$a = \frac{\sum x_i y_i - n \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sum x^2 - n \cdot \bar{x}^2} \quad (4.5)$$

onde:

n – Número de elementos da amostra;

x_i – Dados adquiridos no eixo x ;

y_i – Dados adquiridos no eixo y ;

Logo, com os valores dos parâmetros a e b calculados utilizando as Equações 4.2 e 4.5, estes valores serão substituídos na Equação 4.1 para determinar a equação da reta, com o objetivo de estimar valores fora da população conhecida (Charnet et al., 2008).

Na Figura 34 é apresentado um exemplo, no qual os dados adquiridos em azul são definidos por um par ordenado (x, y) que apresentam dependência positiva, quanto maior o valor de x , maior será o valor de y , o inverso para dependência negativa e ausência de dependência para reta horizontal.

Embora a reta não passe exatamente em todos os pontos, há uma grande tendência de que os pontos estejam dispersos em torno de uma linha reta. Este modelo matemático é chamado de regressão linear simples, porque tem apenas uma variável independente, conforme apresentado na Equação 4.1 (Montgomery et al., 2013).

A distância entre os pontos dispersos e a reta estimada é denominado desvio vertical. O método mais usual para estimar os parâmetros a e b é o método dos mínimos quadrados proposto por Karl Gauss (Séc. XIX), onde por meio da minimização da soma dos quadrados dos desvios, se obtêm os parâmetros da equação (Montgomery et al., 2013).

Abaixo um exemplo de uma reta aproximadora através do método de regressão linear simples. Onde, o eixo x é a distância percorrida em quilômetros e no eixo y , a profundidade dos sulcos dos pneus em milímetros. Através da reta aproximadora, é possível estimar a quilometragem de um pneu quando o mesmo alcançar a altura do TWI (1,6 mm).

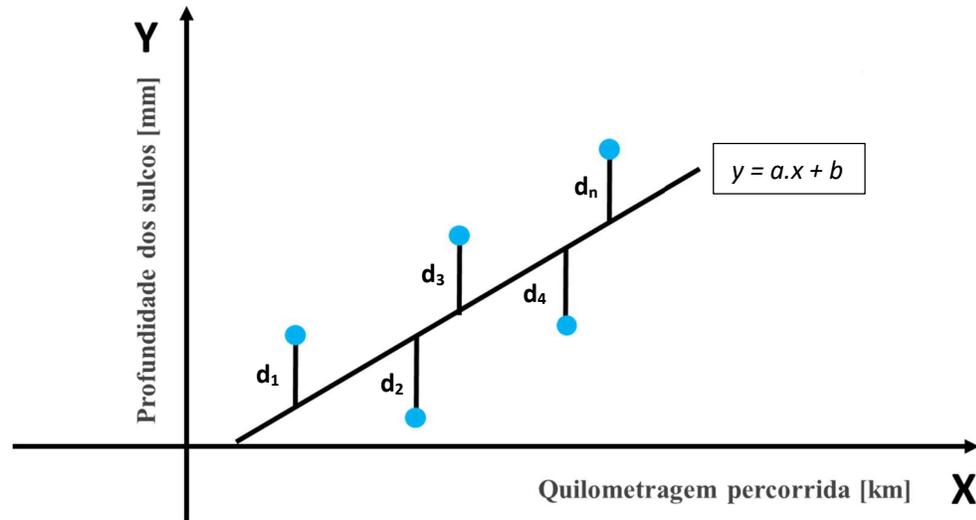


Figura 34: Diagrama de dispersão (Adaptado de Montgomery et al., 2013).

Por exemplo, os pontos em azul demonstrados na Figura 34, podem ser considerados os dados coletados por uma empresa comercial de experimento de desgaste de pneus, que podem ser ajustados em uma reta, estimando melhor o tempo de vida útil do pneu. Os dados em azul são conhecidos, para estimar valores fora desta população conhecida é possível aplicar o método da regressão linear, que estimará valores aproximados para a elaboração da reta aproximadora.

A regressão pode ser feita tanto por retas, funções logarítmicas, exponenciais e trigonométrica. Para encontrar esses parâmetros desconhecidos, abordou-se o método de mínimos quadrados na seção 4.1.2.

4.1.2 Método de Mínimos Quadrados

O método de mínimos quadrados é um método estatístico que permite encontrar uma função matemática que melhor se ajusta ao conjunto de pontos. Dado um conjunto de pontos tabelados, obtidos através de um experimento é possível obter a melhor reta que ajusta esses pontos pelo método dos mínimos quadrados, ou seja, este ajuste é chamado de regressão linear (Meeker et al., 2014).

Os pontos em azul da Figura 34 apresentados na seção anterior, são os dados tabelados, a reta é aproximadora e os valores d_1, d_2, d_3, d_4 e d_n , são as distâncias entre os valores tabelados e a reta. O somatório de todas essas distâncias ao quadrado, tem como objetivo minimizar a soma. As distâncias são elevadas ao quadrado para que os pontos superiores e inferiores não sejam anulados, ou seja, para que sejam grandezas positivas.

A função M é o somatório das distâncias entre os pontos tabelados e reta. A regressão linear tem como objetivo minimizar esta função M , apresentada na Equação 4.6 (Meeker et al., 2014):

$$M = d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2 \quad (4.6)$$

Sejam n pontos tabelados (x_k, y_k) , $k = 1, 2, \dots, n$, o objetivo é aproximar os pontos conhecidos através da reta $r(x) = ax + b$. Ou seja, determinar a reta aproximadora ou curva de ajuste linear. Determinar a reta é determinar as incógnitas a e b , pois os valores de x e y são conhecidos.

Definir uma função M , que depende das variáveis: a e b (Meeker et al., 2014).

$$M(a, b) = \sum_{k=1}^n [d_k]^2 = \sum_{k=1}^n [y_k - r(x_k)]^2 = \sum_{k=1}^n [y_k - a - bx_k]^2 \quad (4.7)$$

onde:

$d_k = [y_k - r(x_k)]^2 = \text{Valor tabelado} - \text{valor calculado pela reta};$

$y_k - \text{Valor tabelado};$

$x_k - \text{Valor calculado pela reta};$

$r(x_k) = a - bx_k - \text{Reta}.$

Com isso, obtem-se uma função que depende de duas variáveis, a e b . Manipulando a função $M(a, b)$, o objetivo é minimizar esta função. Para minimizar a função deve-se encontrar o ponto onde a primeira derivada da função é 0:

$$f'(x) = 0 \quad (4.8)$$

Manipulando as Equações 4.9 e 4.10, os pontos encontrados serão os valores de a e b , que são os pontos mínimos destas funções de duas variáveis (Meeker et al., 2014):

$$\frac{\partial M}{\partial a} = 2 \sum_{k=1}^n (y_k - a - bx_k)(-1) = 0 \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial b} = 2 \sum_{k=1}^n (y_k - a - bx_k)(-x_k) = 0 \quad (4.10)$$

Manipulando algebricamente as Equações 4.11 e 4.12 (Meeker et al., 2014):

$$\sum_{k=1}^n (-y_k + a + bx_k) = 0 \quad (4.11)$$

$$\sum_{k=1}^n (-x_k y_k + ax_k + bx_k^2) = 0 \quad (4.12)$$

Manipulando algebricamente as Equações 4.13 e 4.14 e distribuindo as somatórias para cada termo das equações (Meeker et al., 2014):

$$\sum_{k=1}^n (-y_k) + \sum_{k=1}^n a + \sum_{k=1}^n bx_k = 0 \quad (4.13)$$

$$\sum_{k=1}^n (-x_k y_k) + \sum_{k=1}^n a \cdot x_k + \sum_{k=1}^n bx_k^2 = 0 \quad (4.14)$$

Manipulando algebricamente as Equações 4.15 e 4.16, obtem-se (Meeker et al., 2014):

$$\sum_{k=1}^n a + \sum_{k=1}^n bx_k = \sum_{k=1}^n y_k \quad (4.15)$$

$$\sum_{k=1}^n ax_k + \sum_{k=1}^n bx_k^2 = \sum_{k=1}^n y_k x_k \quad (4.16)$$

Analisando as Equações 4.17 e 4.18 é possível observar que as constantes a e b não dependem do fator k, ou seja, manipulando as equações é possível isolar estas constantes (Meeker et al., 2014):

$$a \sum_{k=1}^n 1 + b \sum_{k=1}^n x_k = \sum_{k=1}^n y_k \quad (4.17)$$

$$a \sum_{k=1}^n x_k + b \sum_{k=1}^n x_k^2 = \sum_{k=1}^n y_k x_k \quad (4.18)$$

Observando as Equações 4.17 e 4.18, as constantes a e b estão em evidência. Os valores das somatórias são conhecidos ou podem ser calculados. Com isso, tem-se um sistema linear, cujo os elementos da matriz principal são as somatórias e o vetor independente a e b. Com isso, escrevendo o sistema de forma normal, conforme a Equação 4.19 (Meeker et al., 2014):

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n 1 & \sum_{k=1}^n x_k \\ \sum_{k=1}^n x_k & \sum_{k=1}^n x_k^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n y_k \\ \sum_{k=1}^n y_k x_k \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

As etapas algébricas para obter o sistema normal apresentado, são sempre os mesmos. Sendo assim, para encontrar a melhor aproximação linear, inicia-se sempre o processo a partir do sistema normal. Utilizando este sistema normal, é possível encontrar a função aproximadora para qualquer tipo de função, mesmo não sendo uma reta, como por exemplo, exponencial.

O erro quadrático é uma da qualidade da aproximação da reta, que é definida pela equação 4.20 (Meeker et al., 2014):

$$EQ(y, r) = \sqrt{\sum_{k=1}^n [y_k - r(x_k)]^2} \quad (4.20)$$

O objetivo do erro quadrático é calcular a diferença entre o valor tabelado e a reta, agora já conhecida através dos valores de a e b encontrados.

Quanto mais o valor do erro quadrático for próximo de zero, melhor é a aproximação.

onde:

EQ – Erro quadrático;

y_k – Valor tabelado;

$r(x_k)$ – Reta.

Neste trabalho foi utilizada a regressão linear para diferentes funções, tais como, funções lineares e exponenciais, ambas aplicadas no método de mínimos quadrados quando utilizado o sistema normal demonstrado anteriormente.

O método de mínimos quadrados é uma técnica para determinar os parâmetros de uma reta desconhecida, minimizando a soma dos quadrados dos resíduos (desvios verticais), conforme a Equação 4.21 (Montgomery et al., 2013).

$$\hat{q}_{ml} = \operatorname{argmin}_{q \in Q} \sum_{i=1}^n [y_j - f(x_j, q)]^2 \quad (4.21)$$

Aplicando o método para as funções lineares, tem-se a equação da reta estimada dada pela Equação 4.22. Sendo γ_0 e γ_1 parâmetros constantes e ε o erro normal segundo a Equação 4.23 (Montgomery et al., 2013).

$$Y = \gamma_0 + \gamma_1 x + \varepsilon \quad (4.22)$$

$$\varepsilon \sim N(0; \sigma^2) \quad (4.23)$$

Para estimarmos o parâmetro $\hat{\sigma}^2$ aplicamos a Equação 4.24, onde n é o número de observações, e p é o número de parâmetros. Como neste trabalho estuda-se apenas dois parâmetros, a profundidade dos sulcos dos pneus e sua quilometragem percorrida, o número de parâmetros p será sempre igual a 2 (Montgomery et al., 2013).

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SQ_E}{n - p} \quad (4.24)$$

A soma dos quadrados dos resíduos é dada pela Equação 4.25 (Montgomery et al., 2013):

$$SQ_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.25)$$

onde:

\hat{y}_i – Média da população.

A partir de agora, como o objetivo é minimizar a diferença entre a equação da reta e dos pontos adquiridos, define-se a equação L chamada estimador de mínimos quadrados. Essa equação faz a somatória dos erros de cada ponto adquirido. Porém para evitar a soma de números negativos, usa-se a soma dos erros ao quadrado, o que dá nome ao método; Este é o método de minimizar a diferença do erro ao quadrado (Montgomery et al., 2013).

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \gamma_0 - \gamma_1 x_i)^2 \quad (4.26)$$

Para efetuar a minimização de maneira analítica, iguala-se a primeira derivada a zero, conforme as Equações 4.27 e 4.28 (Montgomery et al., 2013).

$$\frac{\partial L}{\partial \gamma_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \gamma_0 - \gamma_1 x_i) = 0 \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \gamma_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \gamma_0 - \gamma_1 x_i) x_i = 0 \quad (4.28)$$

Manipulando algebricamente as equações 4.27 e 4.28, obtém-se os estimadores de coeficientes linear e angular $\hat{\gamma}_0$ e $\hat{\gamma}_1$, conforme as equações 4.29 e 4.30 (Montgomery et al., 2013).

$$\hat{\gamma}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{\hat{\gamma}_1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.29)$$

$$\hat{\gamma}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (4.30)$$

Os intervalos de confiança são estabelecidos conforme o nível de confiança escolhido e determina a precisão do método de mínimos quadrados. Os fatores determinados podem influenciar no seu tamanho. Quanto maior o número de amostras, melhor a estimativa dos parâmetros do intervalo de confiança. O grau de incerteza do intervalo é dado pela definição 100 (1 - α)% para a inclinação e interseção dos valores estimados. Onde α é o erro e o valor encontrado é a região de aceitação, conforme a Equações 4.31 e 4.32 (Montgomery et al., 2013).

$$\hat{y}_0 \pm t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)} \quad (4.31)$$

$$\hat{y}_1 \pm t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)} \sqrt{\left(\frac{\hat{\sigma}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)} \quad (4.32)$$

Com:

$t_{\left(\frac{\alpha}{2}, n-2\right)}$ - Distribuição normal **t** de Student.

Nesta secção foi abordado método estatístico de mínimos quadrados. Na secção 4.1.3 é abordado o método estatístico da máxima verossimilhança, com objetivo buscar parâmetros que maximizem a função de verossimilhança.

4.1.3 Método da Máxima Verossimilhança

Máxima verossimilhança vem de verossímil, que significa aparência da verdade ou plausibilidade. O método de máxima verossimilhança foi criado por Sir Ronald Aylmer Fisher (1890 - 1962). O emprego da função de máxima verossimilhança aplicada por Fisher (1912), envolve a maximização da probabilidade θ dos dados observados (Hogg et al., 2015).

O método da máxima verossimilhança é uma função da probabilidade condicional. Uma vez conhecida a amostra aleatória Y em relação aos valores de x , temos como objetivo encontrar os valores desconhecidos de q e σ^2 , que são parâmetros do modelo (Zeviani et al., 2013). Os valores aleatórios de Y como sendo o desgaste dos pneus em relação a distância percorrida conhecida, variável x . A máxima verossimilhança é o princípio da inferência estatística, princípio esse que consiste naqueles métodos usados para tomar decisões ou tirar conclusões acerca de uma população, onde são coletadas as informações necessárias para a amostra analisada. Inferência estatística pode ser dividida em duas áreas: estimativa de parâmetros e testes de hipóteses. Este capítulo aborda o método de estimativa de parâmetros, é um dos melhores métodos para obter um estimador de parâmetro. O estimador será o valor do parâmetro que maximize a função verossimilhança (Montgomery, 2009).

Aplicando-se o método da máxima verossimilhança, busca-se maximizar a função de verossimilhança (Equação 4.33), diferente do método dos mínimos quadrados, que busca minimizar a soma dos quadrados dos desvios verticais (Montgomery, 2009).

$$\hat{q}_{MLE} = \operatorname{argmax}_{q \in \mathcal{Q}} L_Y(q) \quad (4.33)$$

Com:

$$L_Y(q) = \prod_{i=1}^n f_Y(x_i, y_i, q) \quad (4.34)$$

Os dados analisados neste trabalho, não apresentam tipos de falhas ou dados suspensos ($s = 0$), sendo assim, o número de dados sempre será igual ao número de dados observados, ou seja, n será sempre igual a r conforme a Equação 4.35 (Montgomery, 2009).

$$n = r + s \quad (4.35)$$

Para estimarmos os parâmetros da função de verossimilhança, temos como objetivo maximizar a função $L(q, \sigma^2)$, conforme a Equação 4.36. Com o σ^2 sendo obtido utilizando a Equação 4.24 apresentada na secção 4.1.2 (Montgomery, 2009).

$$L(q, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[y_i - \hat{y}_i]^2}{2\sigma^2}} \quad (4.36)$$

Também é possível estimarmos os parâmetros da função de verossimilhança através da Equação 4.37 (Montgomery, 2009).

$$L(q, \sigma^2) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} e^{-\sum_{i=1}^n \frac{[y_i - \hat{y}_i]^2}{2\sigma^2}} \quad (4.37)$$

Com:

$$\varepsilon = y_i - \hat{y}_i - \text{Erro.}$$

O máximo da função de verossimilhança é o máximo da função $\ln(L)$, conforme a Equação 4.38 (Montgomery, 2009).

$$\ln L = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_i^n [y_i - \hat{y}_i]^2 \quad (4.38)$$

Para estimativa utilizando o método da máxima verossimilhança, se faz necessário obter os parâmetros γ_0 e γ_1 , também chamados de estimadores de verossimilhança (Montgomery, 2009).

$$\hat{\gamma}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{\hat{\gamma}_1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.39)$$

$$\hat{\gamma}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (4.40)$$

O intervalo de confiança é um tipo de estimativa por intervalo de um parâmetro populacional, introduzido inicialmente na estatística por Jerzy Neyman, no artigo "*On the problem of confidence intervals*" (Neyman, 1935). O objetivo de acrescentar o intervalo de confiança em torno da população para garantir que dentro desta amplitude contenha o verdadeiro valor do parâmetro (Montgomery, 2009). O intervalo de confiança aplicado para o conjunto de dados deste trabalho de máxima verossimilhança para variáveis dentro do intervalo é de $[0 \text{ a } \infty]$, conforme a Equação 4.41 (Montgomery, 2009).

$$\hat{\theta}/W \leq \theta \leq \hat{\theta} \cdot W \quad (4.41)$$

Com:

$$W = \exp \left(\frac{z_{(1-\frac{\alpha}{2})} \sqrt{\text{VAR}(\theta)}}{\hat{\theta}} \right) \quad (4.42)$$

Para garantir que o valor estimado seja acertivo e está dentro de um intervalo de confiança íntegro, utiliza-se a função de densidade de probabilidade (pdf). Esta função tem como objetivo assegurar que os valores estimados por meio do modelo estatístico da máxima verossimilhança esteja dentro do intervalo esperado (Montgomery, 2009).

$$pdf: f(x, \lambda) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (4.43)$$

Com:

λ – Parâmetros inferiores e superiores do intervalo de confiança.

Covariância é uma matriz simétrica de duas variáveis aleatórias. A matriz de covariância, conforme a Equação 4.44 ou Equação 4.45 apresenta a variação que duas ou mais variáveis dentro de um espaço probabilístico e seu grau de correlação (Montgomery, 2009).

$$\begin{bmatrix} \text{VAR}(\theta_1) & \text{COV}(\theta_2; \theta_1) & \text{COV}(\theta_1; \theta_n) \\ \text{COV}(\theta_2; \theta_1) & \text{VAR}(\theta_2) & \text{COV}(\theta_2; \theta_n) \\ \text{COV}(\theta_n; \theta_1) & \text{COV}(\theta_n; \theta_2) & \text{VAR}(\theta_n) \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_1^2} & -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} & -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_1 \partial \theta_n} \\ -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_2 \partial \theta_1} & -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_2^2} & -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_2 \partial \theta_n} \\ -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_n \partial \theta_1} & -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_n \partial \theta_2} & -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_n^2} \end{bmatrix}^{-1} \quad (4.45)$$

4.1.4 Determinação do Número de Amostras no Experimento

A determinação do número mínimo de amostras necessárias para realizar os experimentos em campo provoca grandes discussões, pois sempre existe uma polêmica de redução dos custos para a realização dos testes. A redução de custos dos ensaios e a determinação do número mínimo de amostras caminham em sentidos opostos. Contudo, a partir de um grau de confiança determinado, é possível determinar o número mínimo de amostras necessárias para os experimentos, bem como garantir a precisão dos resultados estimados.

A Figura 35 representa esquematicamente a relação do tamanho da amostra com o erro amostral. O erro amostral é inevitável. No entanto, é possível diminuí-lo conforme aumentamos o número de amostras. Quanto maior o número de amostras, menor será o erro amostral.

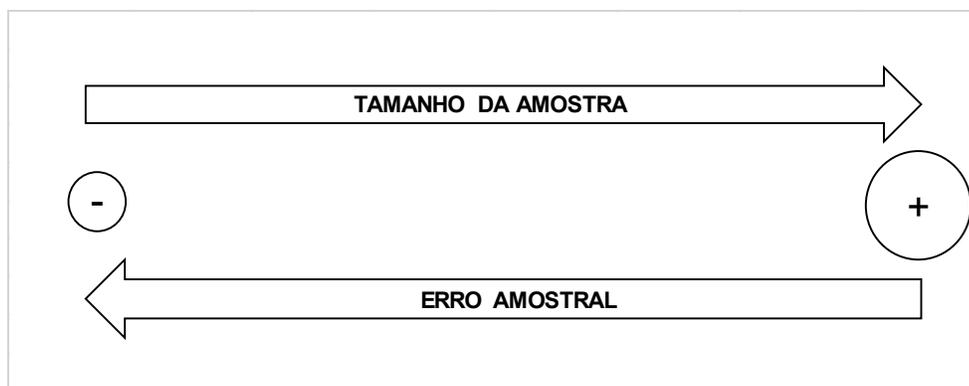


Figura 35: Relação entre o tamanho da amostra e o erro amostral (Arquivo pessoal).

O tamanho de uma amostra é fundamental, porque amostras desnecessariamente grandes acarretam desperdício de tempo e de dinheiro e amostras excessivamente pequenas

podem levar a resultados não confiáveis. É possível determinar o número de amostras n , com um nível de confiança de $100(1-\alpha) \%$ para o estimador do parâmetro desconhecido μ . A margem de erro ou erro máximo de estimativa ε , identifica a diferença máxima entre a média amostral \bar{X} e a verdadeira média populacional μ . Deste modo é possível encontrar o erro com a fórmula $\varepsilon = \bar{X} - \mu$.

A equação que determina o número mínimo de amostras nos ensaios é conhecida e o nível de confiança é de extrema importância e determinante nos cálculos, o erro será igual ou menor que $Z_{(\alpha/2)} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ com $100(1-\alpha) \%$ de confiança ou equivalente (Meeker et al., 1998).

$$n = [Z_{(\alpha/2)}]^2 \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2} \quad (4.46)$$

onde:

n – Número de indivíduos na amostra;

$Z_{(\alpha/2)}$ – Valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado;

σ – Desvio-padrão populacional;

ε – Erro máximo estimado;

α – Erro amostral.

Com a Equação 4.46 para determinação do número mínimo de amostras necessárias nos experimentos, a expressão n pode ser incrementada se o nível de confiança $100(1-\alpha) \%$ for aumentado e pode diminuir com o aumento de ε . Em alguns experimentos uma alta precisão dos resultados é exigida, podendo o número de amostras ser muito elevado caso o valor de n não seja tão grande. É possível também diminuir n aumentando o erro estimado ou diminuindo o nível de confiança.

Os valores de confiança mais utilizados e os valores de Z correspondentes são encontrados na Tabela 11 (Meeker et al., 1998).

Tabela 11: Valores críticos associados ao grau de confiança na amostra (Meeker et al., 1998).

Grau de Confiança	α	Valor Crítico $Z_{\alpha/2}$
90%	0,10	1,645
95%	0,05	1,96
99%	0,01	2,575

4.2 Implementação da Metodologia Proposta

Nesta secção serão apresentados os algoritmos implementados no software para estimativa da vida útil de um pneu.

4.2.1 Implementação do Algoritmo de Mínimos Quadrados

Para melhor compreensão do algoritmo implementado no software, a Figura 36 apresenta o fluxo com a programação de cada uma das etapas do modelo estatístico proposto. O fluxograma apresenta todas as etapas na estimativa da vida útil de um pneu testado em campo, utilizando o modelo estatístico de mínimos quadrados.

Uma planilha contendo os dados coletados em campo com as profundidades dos sulcos dos pneus é carregada na interface criada para este trabalho. Com isso, é possível analisar individualmente qualquer dos quatro pneus no veículo, pois apenas os dados do pneu selecionado entrarão no cálculo no modelo proposto. Posteriormente os dados coletados são usados para obter a estimativa dos parâmetros de mínimos quadrados, utilizando uma função desenvolvida para posterior minimização utilizando a função *fminsearch* do software. Com os parâmetros obtidos utilizando a função, estima-se a curva aproximadora, para posteriormente obter a variância σ^2 e o intervalo de confiança. O intervalo de confiança, quantifica quão próximo ou distante está a curva aproximadora dos dados coletados dentro desta amplitude de possibilidades.

Posteriormente é computada a covariância utilizando os mesmos parâmetros de variância obtidos anteriormente, pelo fato da covariância ser o inverso da variância. Com todas as variáveis estabelecidas, obtém-se a distância projetada do pneu do pneu selecionado até o TWI (1,6mm).

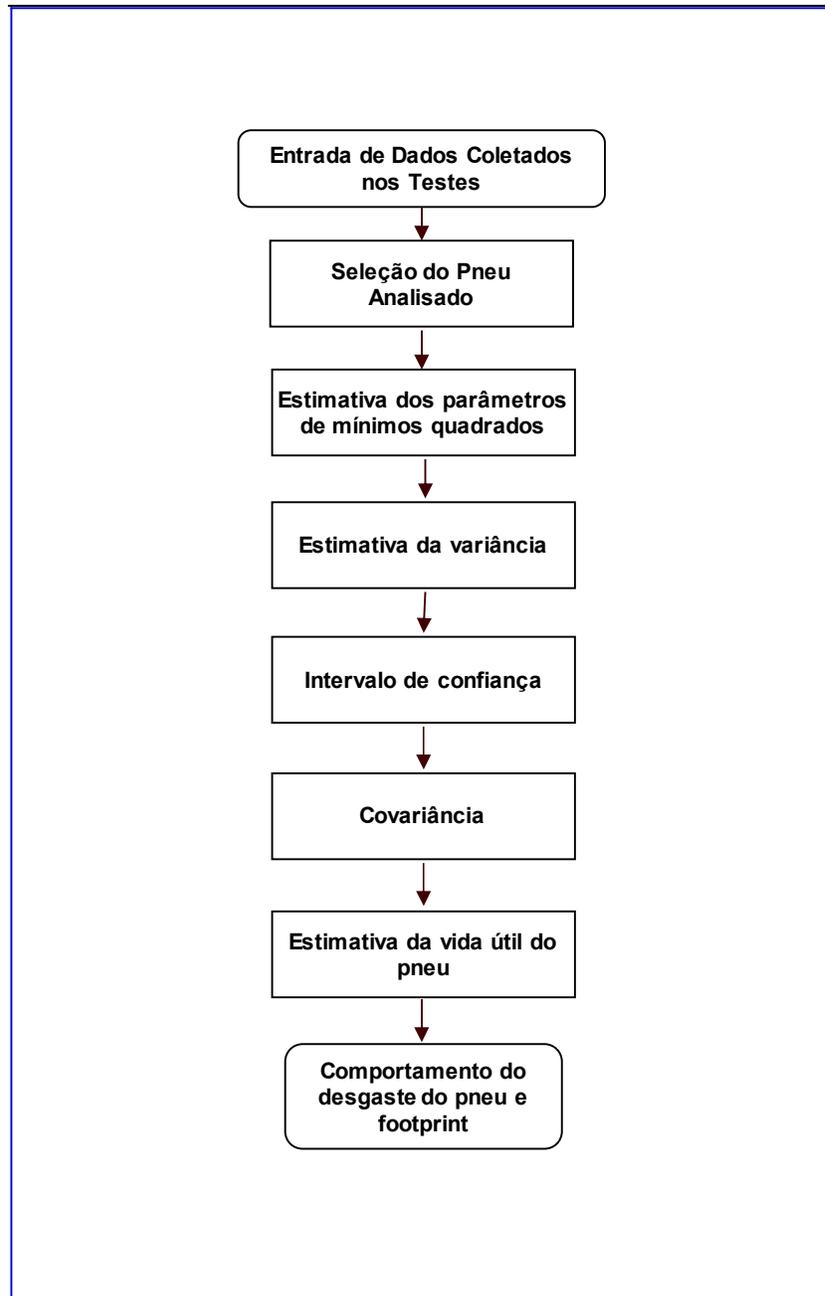


Figura 36: Fluxograma do modelo estatístico de Mínimos Quadrados.

O fluxograma da Figura 36, apresentou todas as etapas na estimativa da vida útil de um pneu testado em campo utilizando o modelo estatístico de mínimos quadrados.

4.2.2 Implementação do Algoritmo de Máxima Verossimilhança

Para melhor compreensão do algoritmo implementado no software, assim como na secção anterior, a Figura 37 apresenta o fluxo com a programação de cada uma das etapas do modelo estatístico proposto de máxima verossimilhança.

Da mesma forma que no método de mínimos quadrados, uma planilha contendo os dados coletados em campo com as profundidades dos sulcos dos pneus é carregada na interface criada para este trabalho. Com isso, é possível analisar individualmente qualquer dos quatro pneus no veículo, pois apenas os dados do pneu selecionado entrarão no cálculo no modelo proposto. Posteriormente os dados coletados são usados para obter a estimativa dos parâmetros de máxima verossimilhança, utilizando uma função desenvolvida para posterior maximização utilizando a função *fminsearch* do software. Com os parâmetro obtidos utilizando a função, estima-se a curva aproximadora, para posteriormente obter a variância σ^2 , a covariância e o intervalo de confiança. O intervalo de confiança, quantifica quão próximo ou distante está a curva aproximadora dos dados coletados dentro desta amplitude de possibilidades. Com todas as variáveis estabelecidas, obtém-se a distância projetada do pneu do pneu selecionado até o TWI (1,6mm).

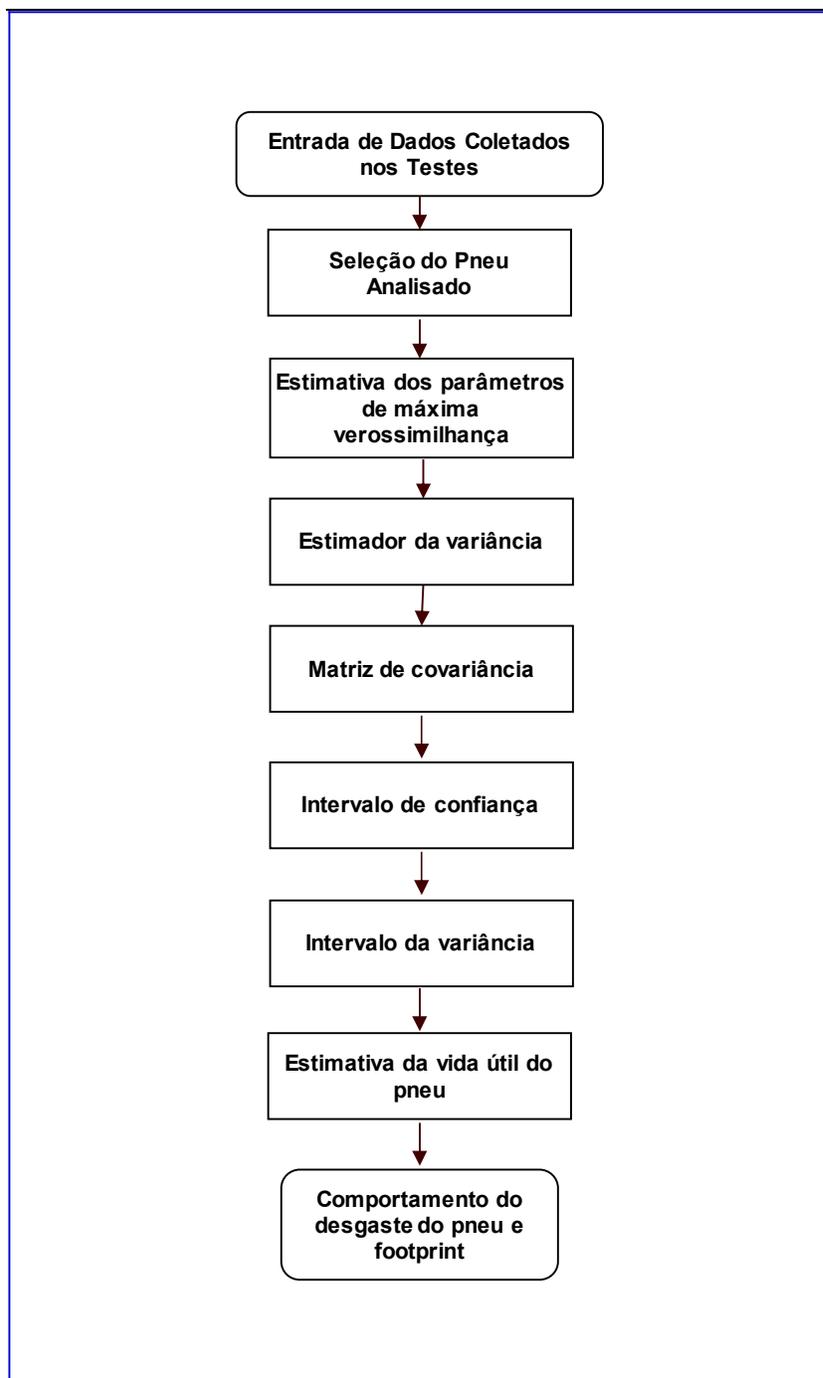


Figura 37: Fluxograma do modelo estatístico de Máxima Verossimilhança.

O fluxograma da Figura 37, apresentou todas as etapas na estimativa da vida útil de um pneu testado em campo utilizando o modelo estatístico de máxima verossimilhança.

4.2.3 Implementação da Metodologia de Teste Aplicada

A metodologia proposta neste trabalho foi realizada de forma sistemática. Uma planilha de dados foi alimentada com as profundidades dos sulcos dos pneus em milímetros (mm) nas quatro posições do veículo durante todos os testes. No entanto, somente a estimativa da vida útil dos pneus dianteiros foram considerados para critérios de aprovação, devido o carro utilizado ter tração dianteira e maior carga no eixo dianteiro, o desgaste dos pneus dianteiros foram maiores que os pneus traseiros devidos a esses esforços. Os pneus dianteiros são mais críticos do que os pneus traseiros por consequência destas características do veículo e distribuição de carga.

O procedimento de teste como abordado anteriormente, exige medições a cada 90 graus na direção circunferencial do pneu e lateralmente ao longo da sua banda de rodagem. As medições são realizadas a cada 3000 km, no entanto, a primeira medição é com o pneu novo. Cada distância percorrida tem-se cinco pontos de medição para cada 90 graus do pneu medido, o pneu apresentado tem três sulcos centrais e dois nos ombros interno e externo dos pneus, totalizando cinco medições.

Com isso, a metodologia proposta nesse trabalho diverge da utilizada pela EC no que diz respeito ao intervalo de medições. Enquanto a EC realiza suas medições em intervalos de 5000 km, o que demanda tempo, combustível e homem-hora, nesse trabalho serão realizadas a cada 3000 km como abordado anteriormente.

Para a realização das medições, recomenda-se posicionar os veículos num elevador automotivo para retirar os pneus do solo, para eliminar a deformação dos pneus provenientes do peso do veículo, com o objetivo de eliminar influências externas nas profundidades dos sulcos dos pneus.

As medições apresentadas abaixo, contemplam apenas as primeiras e últimas medições, as intermediárias estão no APÊNDICE D.

As tabelas a seguir apresentam todas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus nas quatro posições montadas nos veículos até a distância de 12000 km rodados.

Tabela 12: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência novos ou 0 km

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,8	6,9	7,4	7,0	5,8
90°	5,8	7,1	7,4	7,0	6,0
180°	5,7	7,0	7,4	7,0	5,9
270°	5,7	7,0	7,4	7,0	6,0
Média dos Sulcos	5,8	7,0	7,4	7,0	5,9

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,8	7,0	7,4	7,1	6,0
90°	5,7	7,0	7,4	7,1	6,0
180°	5,8	7,0	7,5	7,1	6,1
270°	5,8	7,0	7,4	7,0	6,0
Média dos Sulcos	5,8	7,0	7,4	7,1	6,0

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,8	7,0	7,4	7,1	5,8
90°	5,7	7,0	7,4	7,0	6,0
180°	5,7	6,9	7,3	7,0	6,0
270°	5,8	7,0	7,4	7,0	5,9
Média dos Sulcos	5,8	7,0	7,4	7,0	5,9

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,7	7,0	7,3	7,0	5,9
90°	5,7	7,0	7,3	7,0	5,9
180°	5,7	7,0	7,3	7,0	6,0
270°	5,7	7,0	7,3	6,9	6,0
Média dos Sulcos	5,7	7,0	7,3	7,0	6,0

Tabela 13: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos novos ou 0 km.

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,8	6,9	7,4	7,0	5,8
90°	5,8	7,1	7,4	7,0	6,0
180°	5,7	7,0	7,4	7,0	5,9
270°	5,7	7,0	7,4	7,0	6,0
Média dos Sulcos	5,8	7,0	7,4	7,0	5,9

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,8	7,0	7,4	7,1	6,0
90°	5,7	7,0	7,4	7,1	6,0
180°	5,8	7,0	7,5	7,1	6,1
270°	5,8	7,0	7,4	7,0	6,0
Média dos Sulcos	5,8	7,0	7,4	7,1	6,0

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,8	7,0	7,4	7,1	5,8
90°	5,7	7,0	7,4	7,0	6,0
180°	5,7	6,9	7,3	7,0	6,0
270°	5,8	7,0	7,4	7,0	5,9
Média dos Sulcos	5,8	7,0	7,4	7,0	5,9

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,7	7,0	7,3	7,0	5,9
90°	5,7	7,0	7,3	7,0	5,9
180°	5,7	7,0	7,3	7,0	6,0
270°	5,7	7,0	7,3	6,9	6,0
Média dos Sulcos	5,7	7,0	7,3	7,0	6,0

Tabela 14: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência em 12000 km.

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,3	5,3	5,4	5,1	4,4
90°	4,1	5,3	5,3	5,2	4,3
180°	4,2	5,2	5,2	5,1	4,3
270°	4,3	5,3	5,2	5,1	4,3
Média dos Sulcos	4,2	5,3	5,3	5,1	4,3

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	5,4	5,3	5,3	4,1
90°	4,4	5,4	5,3	5,3	4,2
180°	4,5	5,3	5,2	5,3	4,3
270°	4,5	5,4	5,2	5,3	4,2
Média dos Sulcos	4,5	5,4	5,3	5,3	4,2

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,3	6,0	6,5	6,4	5,6
90°	5,3	6,1	6,5	6,4	5,5
180°	5,2	6,0	6,4	6,3	5,5
270°	5,3	6,0	6,5	6,3	5,3
Média dos Sulcos	5,3	6,0	6,5	6,4	5,5

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,4	6,0	6,2	6,4	5,6
90°	5,3	6,1	6,3	6,3	5,5
180°	5,2	6,0	6,2	6,3	5,6
270°	5,3	5,9	6,1	6,3	5,7
Média dos Sulcos	5,3	6,0	6,2	6,3	5,6

Tabela 15: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos em 12000 km.

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,3	5,3	5,4	5,1	4,4
90°	4,1	5,3	5,3	5,2	4,3
180°	4,2	5,2	5,2	5,1	4,3
270°	4,3	5,3	5,2	5,1	4,3
Média dos Sulcos	4,2	5,3	5,3	5,1	4,3

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	5,4	5,3	5,3	4,1
90°	4,4	5,4	5,3	5,3	4,2
180°	4,5	5,3	5,2	5,3	4,3
270°	4,5	5,4	5,2	5,3	4,2
Média dos Sulcos	4,5	5,4	5,3	5,3	4,2

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,3	6,0	6,5	6,4	5,6
90°	5,3	6,1	6,5	6,4	5,5
180°	5,2	6,0	6,4	6,3	5,5
270°	5,3	6,0	6,5	6,3	5,3
Média dos Sulcos	5,3	6,0	6,5	6,4	5,5

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,4	6,0	6,2	6,4	5,6
90°	5,3	6,1	6,3	6,3	5,5
180°	5,2	6,0	6,2	6,3	5,6
270°	5,3	5,9	6,1	6,3	5,7
Média dos Sulcos	5,3	6,0	6,2	6,3	5,6

As medições de profundidade dos sulcos dos pneus realizadas no experimento em campo, são apresentadas graficamente conforme Figura 38 para os pneus de referência.

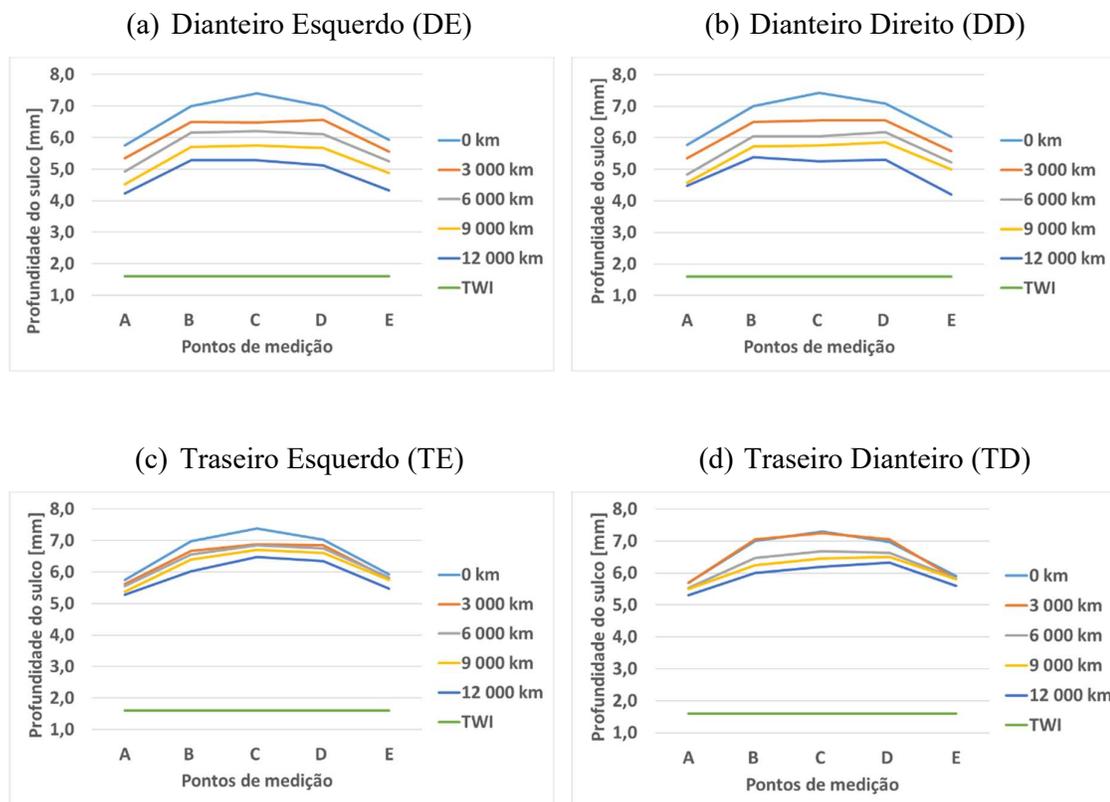


Figura 38: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência.

Com os resultados apresentados na Figura 38 é possível identificar que o pneu na posição TD, mesmo após 3000 km rodados não apresentou desgaste. O pneu que iniciou os testes sofreu um dano e precisou ser trocado, por este motivo, os resultados das medições quando o pneu novo e após a segunda medição são equivalentes, como é facilmente visto na Figura 38 (d).

Já para o pneu proposto, os dados coletados durante o experimento são apresentados graficamente conforme Figura 39.

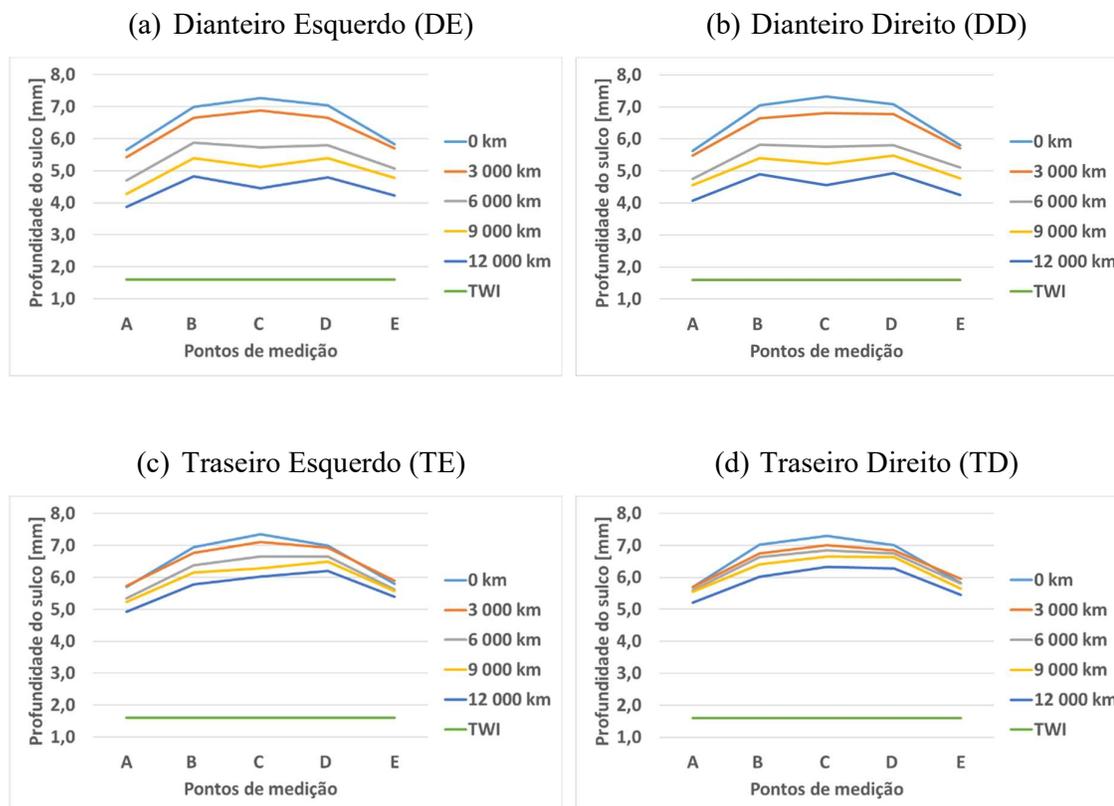


Figura 39: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos.

É possível observar nos gráficos da Figura 39 que o pneu TD apresenta maior desgaste na parte externa do pneu. Este desgaste irregular é proveniente do desalinhamento da suspensão ou até mesmo uma característica do próprio veículo.

Utilizando as medições de profundidade dos sulcos dos pneus realizadas no ensaio e apresentadas anteriormente, também foi possível gerar imagens da pegada do pneu ao solo conhecidas como *footprint* para os pneus de referência e pneus propostos, respectivamente. A Figura 40 e Figura 41, apresentam as pegadas dos pneus ao solo ao final dos ensaios, ou seja, após 30000 km percorridos.

A área em vermelho na Figura 40, apresenta a área de contato da banda de rodagem com o solo que apresenta maior desgaste, onde podemos ver perfeitamente os sulcos dos pneus que sofreram maiores esforços na rodagem.

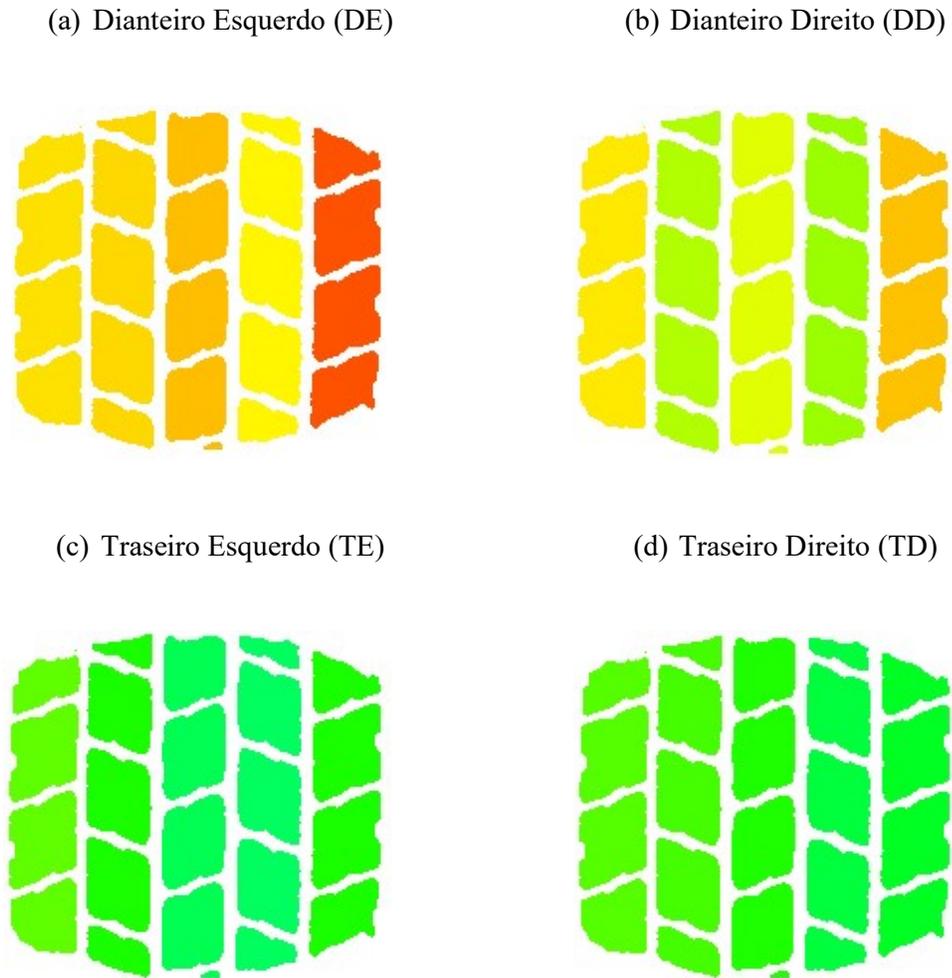


Figura 40: Imagem do *footprint* dos pneus de referência (Arquivo pessoal).

Assim como os pneus de referência, também foi possível gerar as imagens do *footprint* dos pneus propostos ao final do experimento, utilizando os dados coletados nas medições de profundidades dos sulcos dos pneus em diferentes pontos.

Os pneus de referência apresentados anteriormente e os pneus propostos a seguir, a área em vermelho na Figura 41, apresenta a área de contato da banda de rodagem com o solo que apresenta maior desgaste durante os testes.

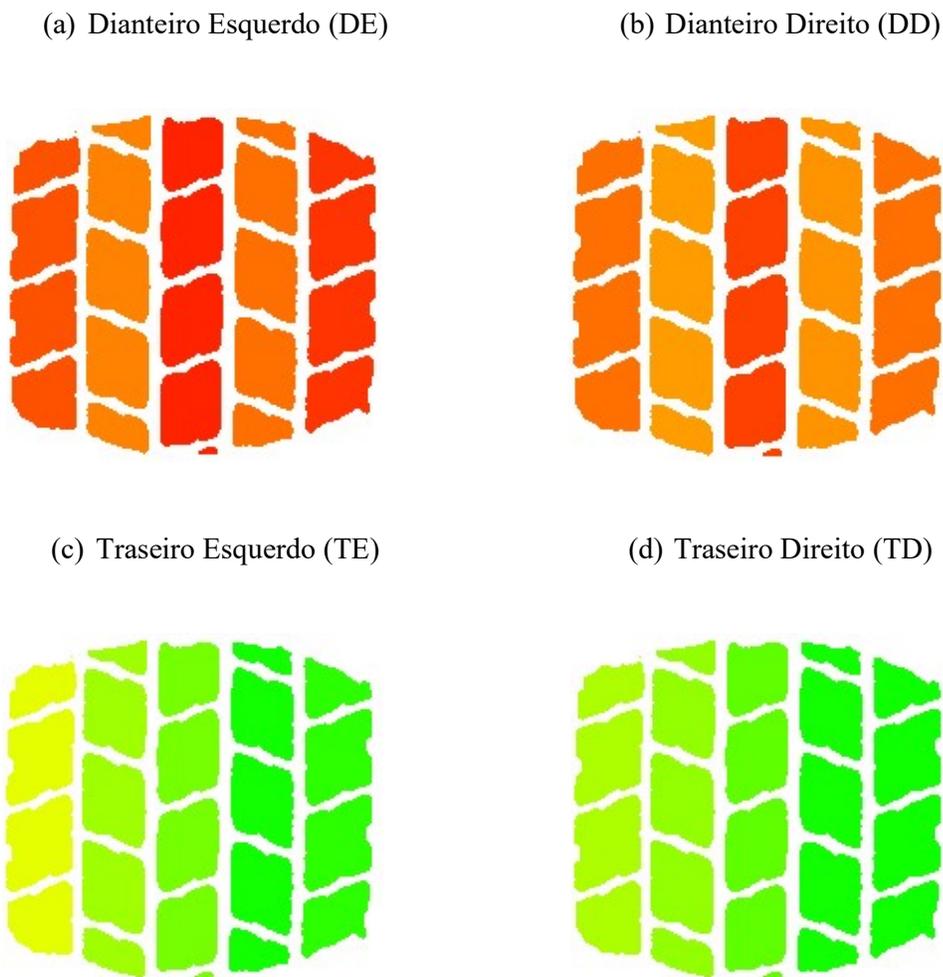


Figura 41: Imagem do footprint dos pneus propostos (Arquivo pessoal).

Para o cálculo de projeção da vida útil dos pneus, foi criada uma interface em um software para facilitar a análise dos dados provenientes da tabela de dados dos ensaios realizados em campo. A Figura 42 apresenta a disposição da interface criada para análise dos dados.

A interface criada no software que possibilita a fácil interação do usuário com os modelos obtidos. A máscara contém um botão chamado importar dados usado para carregar os dados coletados nos experimentos contidos em uma planilha de dados. Os dados são carregados,

mas a projeção gráfica é baseada na média dos quatro pontos circunferenciais e os cinco pontos laterais da banda de rodagem do pneu. O pneu analisado deve ser escolhido, podendo ser qualquer uma das quatro posições do veículo. Em seguida o intervalo de confiança deve ser preenchido, é frequentemente utilizado um intervalo de confiança de 95%. E por último o método analisado deve ser escolhido, podendo ser o método de mínimos quadrados ou máxima verossimilhança. Os cálculos de projeção da vida útil dos pneus são apresentados numericamente e graficamente, facilitando a análise do usuário, que também pode comparar com o modelo de extrapolação usado pela EC e montadoras de veículos. Um botão para gerar gráficos é usado para projetar o gráfico na tela da interface. Essa interface foi projetada para facilitar a comparação e análise dos dados coletados nos experimentos de rodagem de durabilidade dos pneus em campo.

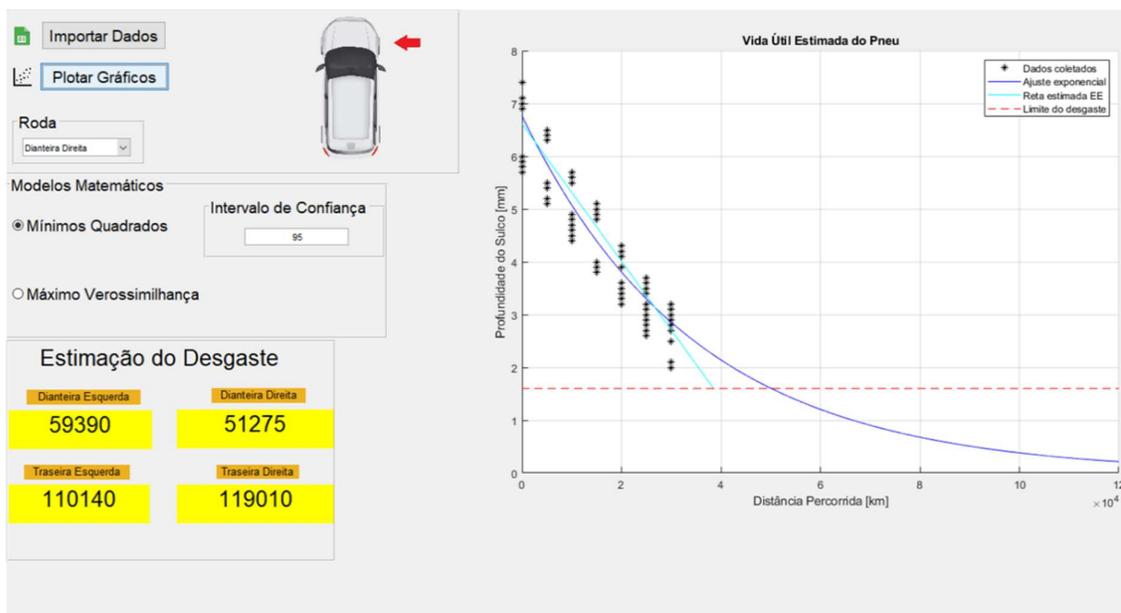


Figura 42: Ambiente criado em um software (Arquivo pessoal).

Os resultados da Figura 43, os pneus dianteiros apresentaram um desgaste maior comparados aos pneus traseiros. O veículo utilizado nos ensaios é de tração dianteira, o motor e os componentes mais pesados estão localizados mais próximos do eixo dianteiro, dessa forma, o CG do veículo é mais próximo do eixo dianteiro, o que implica em maior carga nos pneus, além de toda força de propulsão e transmissão do torque do motor serem transmitidas apenas

para os pneus dianteiros, levando os mesmos a apresentarem desgastes maiores que os pneus traseiros. A Figura 43 apresenta a vida útil de cada pneu do veículo em km.

A projeção da vida útil dos pneus do lado direito, apresentam valores maiores que do lado esquerdo. A montadora de veículos que solicitou os testes foi informada e eles fizeram uma investigação e verificaram que o veículo tem uma característica específica do sistema de suspensão e direção que, promove essa diferença de resultado.

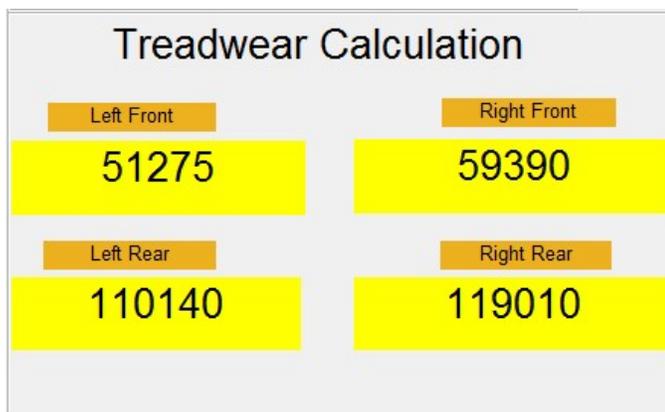


Figura 43: Projeção da vida útil dos pneus de testes (Arquivo pessoal).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inúmeros métodos matemáticos podem ser utilizados para projetar a vida dos pneus, dependendo da precisão desejada podem-se usar modelos de extrapolação lineares ou não-lineares. Contudo, não é aconselhável o uso de extrapolação quando é preciso obter um valor aproximado da função em algum ponto fora do intervalo tabelado, ou seja, quando se quer extrapolar. Isso vale até mesmo quando são utilizados resultados de experimentos, pois esses podem conter erros inerentes ou não previsíveis (Ruggiero, 2000). Portanto, surge a necessidade do uso de modelos mais precisos de ajustes. Os modelos propostos neste trabalho são modelos não lineares, pois considera-se o desgaste do pneu uma característica não linear, assim como as forças modeladas por Pacjeka.

Nesta secção são apresentados ajustes para estimativa da vida útil dos pneus, implementados utilizando um software. Para tal, foi proposto utilizar as seis primeiras medições para prever a quilometragem da sétima medição para os modelos propostos, diferentemente do modelo utilizado pela EC, onde apenas a primeira e a sexta medição são utilizadas para calcular a quilometragem da sétima.

Apenas os dados centrais dos sulcos dos pneus foram utilizados na predição de todos modelos, pois os dados apresentam menor variação de profundidade dos sulcos nos quatro pontos circunferenciais do pneu. Neste capítulo serão utilizados os dados do pneu DD de medida 185/65R15 para comparação dos modelos aqui apresentados.

5.1 Resultados obtidos com a Metodologia Proposta

Os resultados obtidos com a implementação da metodologia apresentada, mostrou grande redução no tempo de teste, na quantidade de litros de combustíveis consumidos e menor número de motorista na condução dos veículos. Com isso, foi possível identificar a redução do custo nos testes, que é uma das propostas deste trabalho e o grande objetivos de muitas empresas.

Para uma rodagem de 40000 km com os ensaios realizados no período de 12h por dia, com a média 800 km por dia, a EC necessita em torno de 50 dias de trabalho para completar o

experimento em campo. Os veículos utilizados nos testes têm um consumo médio de combustível de 13,9 km/l em rodovias (INMETRO, 2019). Após os testes ou 40000 km percorridos os veículos consumiram um total aproximado de 5755 litros de combustível.

Como abordado anteriormente, este trabalho tem como objetivo a redução de tempo de custo dos testes. É possível também com a redução de quilometragem, a rodagem apenas em um turno, eliminando assim uma pessoa e os custos de adicional noturno.

A Tabela 16 apresenta a comparação dos métodos de ajustes de curvas e da extrapolação feita pela EC. Os resultados apresentados demonstram uma redução significativa da quantidade de combustível, quilometragem e por consequência o custo dos testes com a aplicação dos métodos propostos neste trabalho.

Tabela 16: Comparação de consumo de combustível entre os métodos

Método	Quilometragem [km]	Consumo Total de Combustível [l]	Duração [dias]
Extrapolação Linear Utilizada pelas EEs	40000	5755	50
Métodos Propostos de Ajustes de Curvas	12000	1726	15
Redução entre os Métodos	28000	4029	35
Redução entre os Métodos [%]	70%	70%	70%

A aplicação dos métodos propostos neste trabalho, propõe uma redução aproximada de 70% da quilometragem percorrida quando comparados com o método da EC, também os mesmos 70% para a quantidade, em litros, de combustíveis e aproximadamente 70% de redução da duração do teste. Considerando o valor médio da gasolina no estado de São Paulo no mês de abril de 2019, o valor médio vendido nos postos brasileiros é de R\$ 3,967, segundo dados da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2019). A redução de 4029 litros nos testes entre os métodos representa o custo total de R\$ 15.883,04.

Esta comparação do total de litros de combustíveis consumidos e hora-homem na condução dos testes, foi realizada apenas para dois veículos. Muitas vezes são utilizados mais que dois veículos nos testes, elevando ainda mais a eficiência com a metodologia proposta.

Um experimento em campo foi realizado e uma comparação entre o método atual e um dos métodos propostos neste trabalho, máxima verossimilhança. O teste conhecido como

captive ou teste de rota controlada foi executado com dois veículos. O primeiro veículo equipado com os pneus de referência com características 185/65R15 e o segundo veículo com pneus propostos 195/55R16.

As medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência e propostos foram realizadas conforme o procedimento da EC e montadores de veículos, a cada 5000 km percorridos até atingir a distância total de 30000 km e também conforme a metodologia proposta, com medições a cada 3000 km e distância total percorrida de 12000 km.

Ao final do teste a profundidade do sulco do pneu é conhecida. Na última medição (30000 km percorridos) a altura média do sulco mensurada é de 3,2 mm. Com isso, todos modelos deveriam prever para esta altura (3,2 mm) uma quilometragem de 30000 km. O modelo de extrapolação projetou a quilometragem de 26520 km. O modelo proposto com redução de distância percorrida 29340 km com erro de 2,2% e com os dados da EC uma quilometragem de 30830 km com erro de 2,7%. O intervalo de confiança utilizado nesta análise foi de 95%.

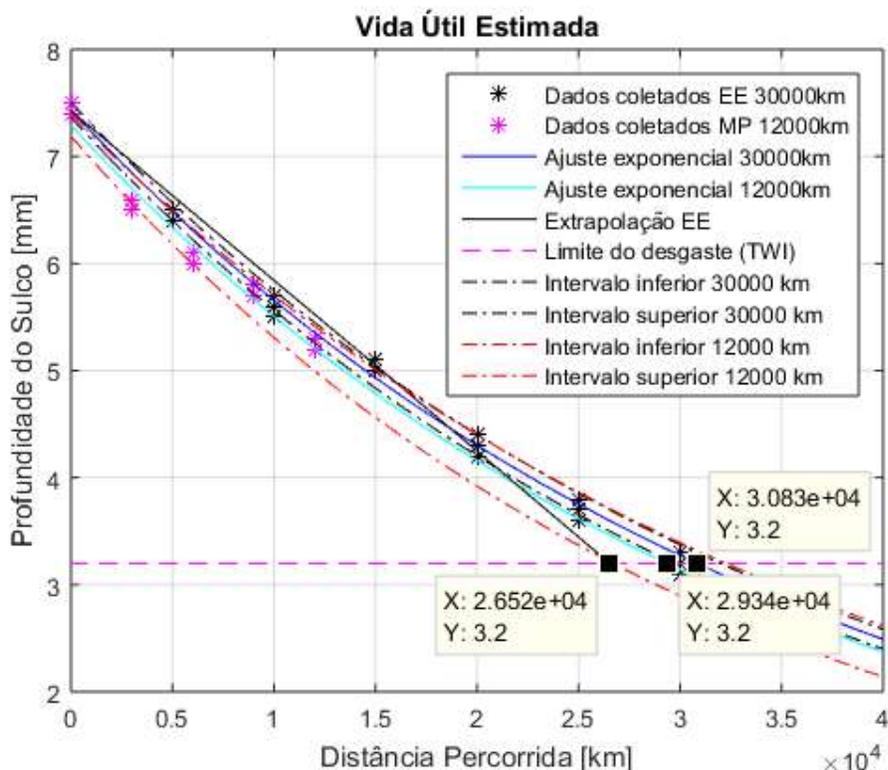


Figura 44: Comparação entre o método atual e métodos propostos.

Como pode ser visto nos resultados apresentados na Figura 44, a quilometragem projetada utilizando o modelo matemático proposto neste trabalho é de 29340 km e a estimativa feita pela EC é de 26520 km. Com base nos resultados apresentados, é possível afirmar que o modelo proposto se mostrou preciso na projeção da vida útil de pneus.

Ao realizar uma correlação entre a curva estimada pelo modelo proposto neste trabalho e a curva dos dados coletados no ensaio, o resultado alcançado de R^2 é de 0,99. Com isso, podemos afirmar que, a curva projetada é similar ao desgaste real de um pneu em campo.

5.2 Ajuste Linear pelo Método dos Mínimos Quadrados

Para verificar a eficácia dos modelos propostos neste trabalho e a extrapolação feita pela EC, foram feitas projeções com os dados medidos pela EC. Ao todo a mesma realizou um total de sete medições de desgaste do pneu, iniciando em 0 km (primeira medição) e terminando com 30000 km percorridos (sétima medição), as medições foram realizadas no intervalo de 5000 km percorridos.

Ao final do teste a profundidade do sulco do pneu é conhecida. Na sétima medição (30000 km percorridos) a altura média do sulco mensurada é de 3,2 mm. Com isso, todos modelos deveriam prever para esta altura (3,2 mm) uma quilometragem de 30000 km.

Na Figura 45 é apresentada a comparação do ajuste linear feita pelo método de mínimos quadrados e da extrapolação feita pela EC. Foi estimado pelo método da EC que o veículo deveria percorrer 28380 km e para o método de ajuste linear, 28860 km com intervalo de confiança de 27700 km e 30070 km. Numericamente, isso representa um erro de 5,4% e 3,8% respectivamente. O intervalo de confiança utilizado nesta análise foi de 95%.

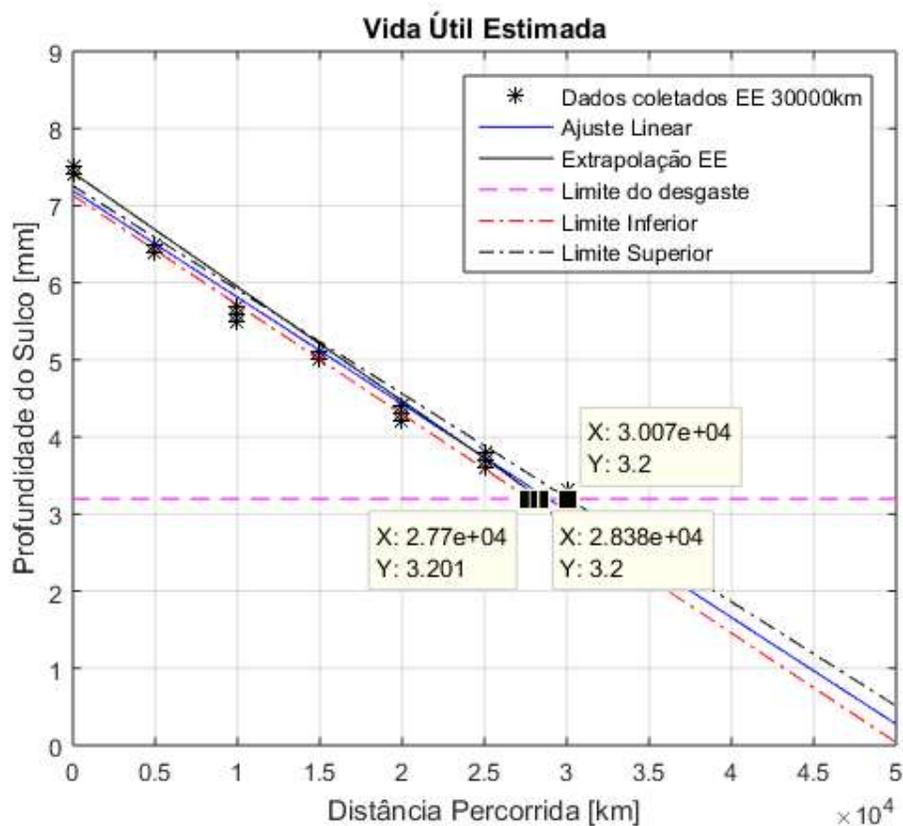


Figura 45: Comparação do Ajuste Linear pelo Método de Mínimos Quadrados e da Extrapolação Utilizada pela EC.

5.3 Ajuste Linear pelo Método da Máxima Verossimilhança

Projeções da vida útil dos pneus também foram realizadas utilizando diferente método. Foi utilizado o ajuste linear pelo método da máxima verossimilhança, os mesmos dados coletados nos testes pela EC foram utilizados para projetar a vida útil dos pneus. Após os pneus percorrerem 30000 km a vida útil foi estimada.

Da mesma forma apresentada anteriormente, ao final do teste a profundidade do sulco do pneu também é conhecida, pois são utilizados os mesmos dados da secção anterior, ou seja, após 30000 km percorridos a altura média do sulco é de 3,2 mm.

Na Figura 46 é apresentada a comparação do ajuste linear feita pelo método de máxima verossimilhança e da extrapolação feita pela EC. Pela estimativa da EC o veículo deveria

percorrer 28380 km e para o ajuste linear 28290 km com intervalo de confiança de 25850 km e 31010 km. Numericamente, isso representa um erro de 5,4% e 5,7% respectivamente.

Comparando o erro do modelo da máxima verossimilhança e mínimos quadrados, é possível observar o incremento do erro, ou seja, uma estimativa menos precisa da quilometragem final do pneu. Isso se deve pelo fato do modelo da máxima verossimilhança ter maior eficiência para ajustes exponenciais, ao contrário do modelo de mínimos quadrados. O intervalo de confiança utilizado nesta análise foi de 95%.

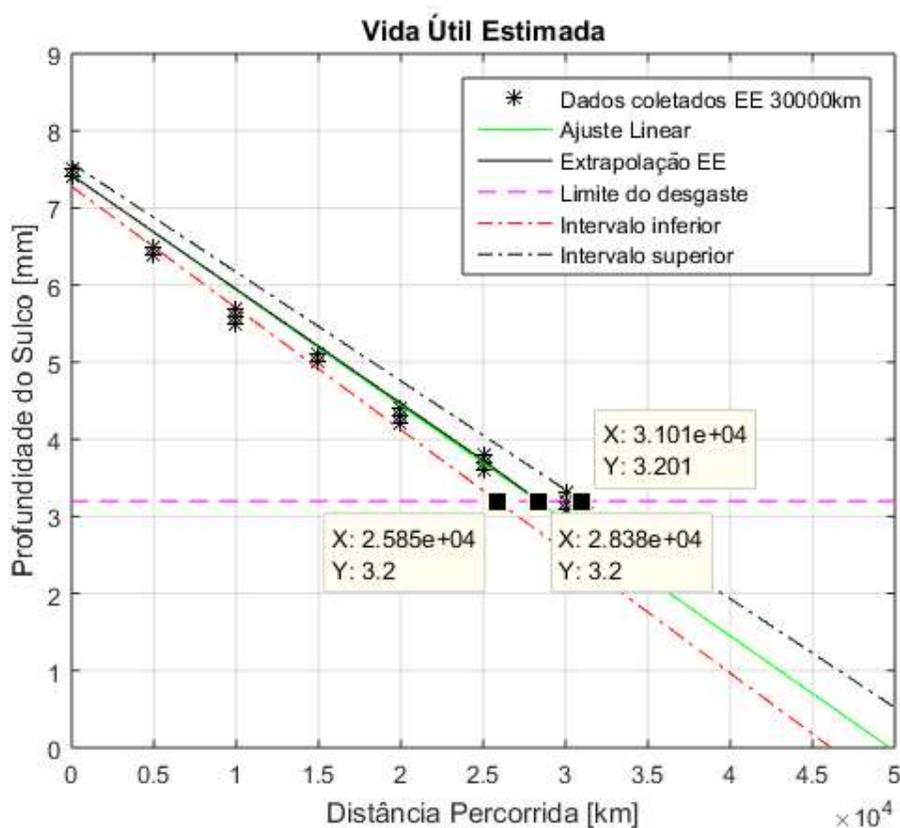


Figura 46: Comparação do Ajuste Linear pelo Método da Máxima Verossimilhança e da Extrapolação Utilizada pela EC.

Os dados apresentados nas projeções anteriores são resultados bem conservadores. No entanto, desfavorem muito o produto podendo comprometer a decisão de compra de um usuário mais exigente, que procura um pneu com maior quilometragem prometida e menor custo.

5.4 Ajuste Exponencial pelo Método dos Mínimos Quadrados

O ajuste exponencial pelo método dos mínimos quadrados também foi utilizado para verificar a assertividade na projeção. Com isso, os mesmos dados anteriores foram utilizados, com a primeira e a sexta medição sendo utilizadas para prever a quilometragem da sétima.

Na Figura 47 é apresentada a comparação do ajuste exponencial feita pelo método de mínimos quadrados e da extrapolação feita pela EC. Pela estimativa da EC o veículo deveria percorrer 28380 km e para o ajuste exponencial 30830 km com intervalo de confiança de 29790 km e 31880 km. Numericamente, isso representa um erro de 5,4% e 2,7% respectivamente. Este método aproximou-se da quilometragem percorrida pelo veículo, o que mostra a eficácia do modelo proposto.

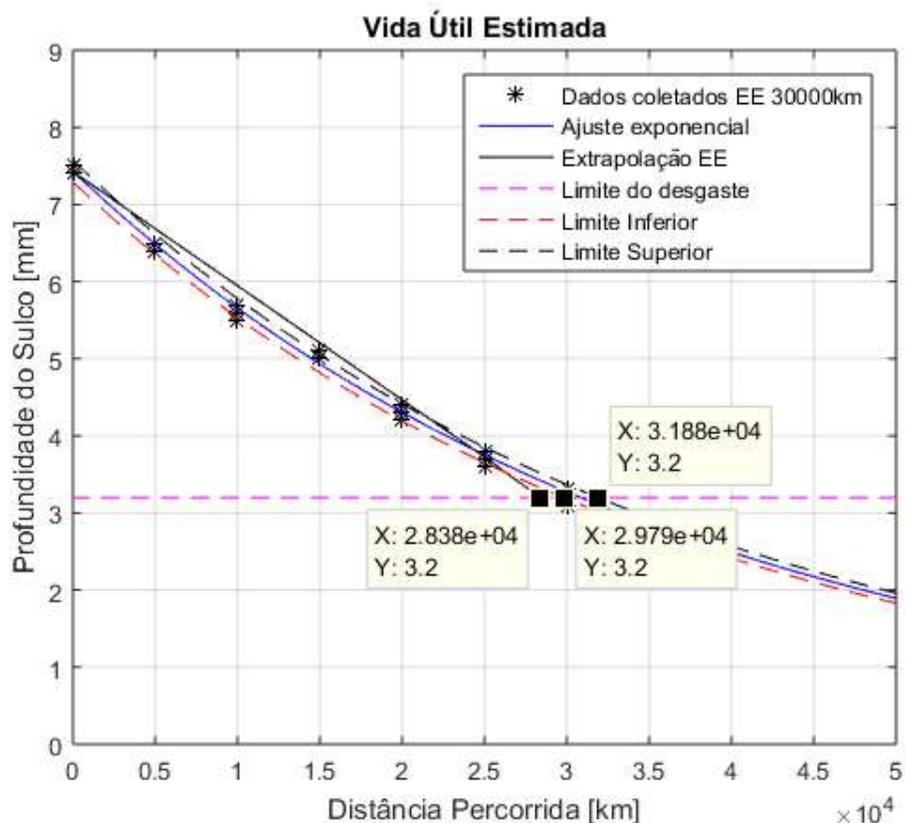


Figura 47: Comparação do Ajuste Exponencial pelo Método de Mínimos Quadrados e da Extrapolação Utilizada pela EC.

5.5 Ajuste Exponencial pelo Método da Máxima Verossimilhança

Com o objetivo de averiguar o ajuste exponencial pelo método da máxima verossimilhança, este foi utilizado para comparação entre os métodos de ajuste exponencial e extrapolação.

Na Figura 48 é apresentada a comparação do ajuste exponencial feita pelo método da máxima verossimilhança e da extrapolação feita pela EC. Pela estimativa da EC o veículo deveria percorrer 28380 km e para o ajuste exponencial 30820 km, com intervalo de confiança entre 29720 e 31960 km. Igualmente ao ajuste exponencial pelo método de mínimos quadrados, tivemos um erro de 5,4% e 2,7% respectivamente. Este resultado corrobora com a ideia de proximidade entre os resultados do método da máxima verossimilhança e mínimos quadrados para ajuste exponencial, presentes na literatura.

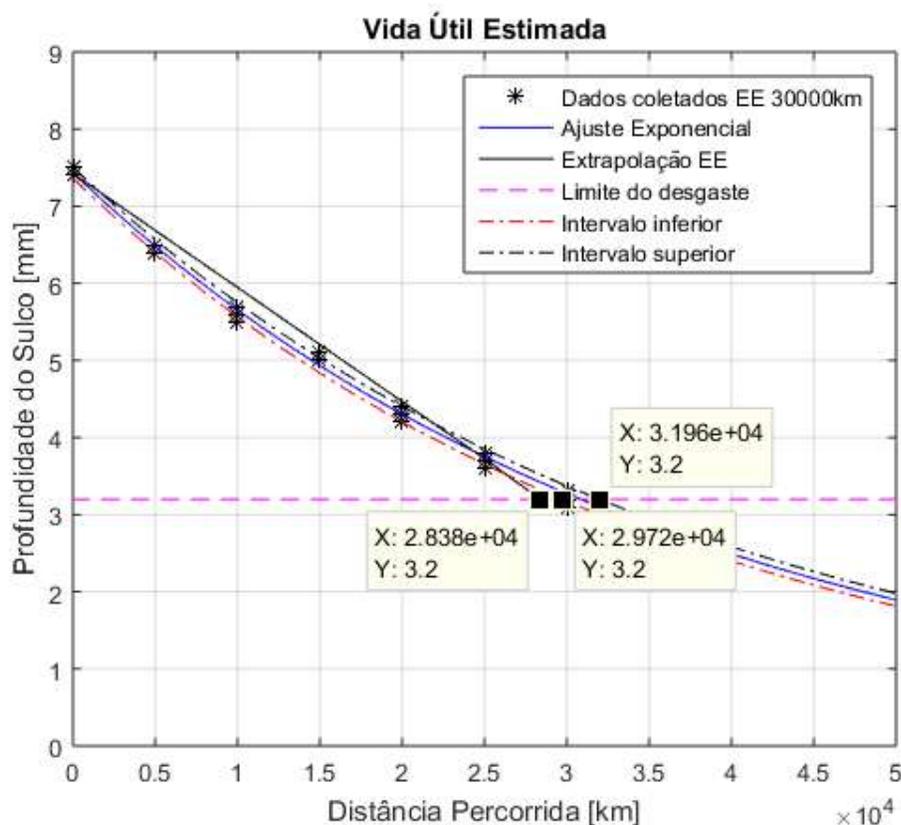


Figura 48: Comparação do Ajuste Exponencial pelo Método da Máxima Verossimilhança e da Extrapolação Utilizada pela EC.

5.6 Comparação Entre os Métodos

Uma análise do ensaio executado pela EC foi realizada, assim como os cálculos de projeção da vida útil dos pneus utilizando o método da extrapolação linear. Estes resultados foram utilizados para comprovar que o modelo de extrapolação linear não é aconselhável para se obter resultados fora do intervalo conhecido.

O modelo de extrapolação linear projetou uma quilometragem de 28380 km, que apresentou um erro intrínseco nos cálculos de projeção da vida útil dos pneus de 5,4% comparado a quilometragem final do veículo nos testes realizados em campo pela EC, 30000 km percorridos.

Os modelos de ajustes lineares para ambos os métodos de mínimos quadrados e máxima verossimilhança, obtiveram valores próximos entre eles, uma quilometragem aproximada de 28500 km, o que representa um erro aproximado de 5% comparado ao experimento em campo.

Os modelos de mínimos quadrados e máxima verossimilhança, apresentaram uma diferença de aproximadamente 825 km na projeção da vida útil do pneu utilizado nos cálculos, quando comparado aos ensaios realizados em campo. Os resultados apresentados são assertivos, pois a grande maioria dos dados coletados pela EC estão dentro dos intervalos de confiança e com pouca discrepância da quilometragem final da sétima medição.

Comparando os resultados apresentados, é possível afirmar que os modelos mais assertivos que apresentaram melhor correlação com os ensaios em campo são os modelos de ajuste exponencial de mínimos quadrados e máxima verossimilhança, conforme Tabela 17.

Tabela 17: Comparação entre os Métodos de Ajuste de Curvas.

Modelo Matemático	Distância Percorrida (km)	Diferença (%)
Mínimos Quadrados - Linear	28860	-3.80
Máxima Verossimilhança - Linear	28290	-5.70
Mínimos Quadrado - Não Linear	30830	2.77
Máxima Verossimilhança - Não Linear	30820	2.73
Empresa Especializada - Extrapolação Linear	28380	-5.40
Distância Final do Veículo	30000	0.00

6 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi propor métodos matemáticos de estimativa de parâmetros fora de uma população conhecida e implementados em um software, bem como a redução de custo e tempo do teste. Dos métodos apresentados, preferiu-se os modelos de mínimos quadrados e máxima verossimilhança pelo método exponencial, considerando a não linearidade dos modelos, uma vez que o estudo é baseado na projeção da vida útil dos pneus durante seu desgaste não linear nos testes em campo.

Os quatro métodos matemáticos aplicados deste trabalho possuem liberdade para alteração dos parâmetros para análise do desgaste do pneu, quantidade de sulcos medidos lateralmente na banda de rodagem, eliminação dos valores de profundidade dos sulcos medidos nos ombros e utilização apenas dos valores centrais, análise individual da posição de cada pneu montado no veículo e redução das medições realizadas a cada 90 graus na direção circunferencial do pneu.

Com isso, uma interface criada no software possibilitou a fácil interação do usuário com os métodos aplicados neste trabalho. Os valores das medições de profundidade dos sulcos dos pneus para cada quilometragem analisada foram coletados e uma planilha de dados foi preenchida e os valores carregados no software como base para o cálculo de estimativa da projeção da vida útil dos pneus.

Desta forma, um procedimento de teste de rodagem e projeção de desgaste e vida útil de pneus foi então desenvolvido, para prover maior precisão dos valores projetados com a aplicação de métodos matemáticos mais adequados. Esta redução de custos é proveniente da redução de quilometragem. O procedimento utilizado pela EC, montadoras de veículos e fabricantes de pneus tem uma característica comum entre elas, a obrigatoriedade da rodagem de 40000 km percorridos ou rodagem mínima percorrida pelos pneus para certificação dos testes, ou seja, os pneus devem rodar no mínimo 70% da distância solicitada nos testes, esta rodagem pode levar pelo menos 10 semanas de testes, ao contrário do procedimento criado e apresentado neste trabalho, os pneus devem rodar uma distância máxima de 12000 km. Desta forma, é possível considerar a redução de tempo de realização dos testes de no máximo 7 semanas, também a redução de milhares de litros de combustível consumidos na rodagem e hora homem trabalhada nos testes.

A Tabela 18 apresenta os resultados dos ensaios realizados em campo pela empresa comercial nos testes de durabilidade. Fazendo uma comparação com os dados da empresa comercial e os dados coletados utilizando o método proposto, os resultados apresentaram um erro aproximado de 2.5%, o que se mostrou bem inferiores quando comparados ao erro encontrado pela EC que foi aproximadamente de 12%.

Tabela 18: Comparação entre os dados utilizados na Estimativa da Vida Útil de um Pneu

Modelo Matemático	Carro 1 (km)	Diferença (%)
Mínimos Quadrados - Não Linear (30000 km)	29340	-2.2%
Mínimos Quadrados - Não Linear (12000 km)	30830	2.8%
Empresa Especializada - Extrapolação Linear	26520	-11.6%
Distância Total do Pneu	30000	0.0%

Portanto, o modelo proposto do método de mínimos quadrados e máxima verossimilhança apresentaram resultados satisfatórios, que diferem favoravelmente do modelo atual usado por empresas especializadas em testes de durabilidade de pneus.

Com o avanço da tecnologia e a busca por novos produtos de alta qualidade, há também um aumento nas especificações e tolerâncias, levando a um aumento nos testes de validação com tempo reduzido. Portanto, este projeto alcançou o objetivo esperado, a redução da quilometragem necessária para predizer a vida útil do pneu, tempo e custo dos testes em 70%.

6.1 Trabalhos Futuros

Apesar deste trabalho ter chegado a resultados promissores em relação aos métodos de estimativa da vida útil dos pneus e procedimentos de rodagem, outras propostas de projeção da quilometragem e procedimentos de rodagem devem ser abordadas.

Para proposta futura, a padronização da configuração dos veículos utilizados nos testes em campo, pois diferentes configurações podem influenciar no peso do veículo e consequentemente no desgaste dos pneus.

Dando uma continuidade nessa linha de testes, melhorar o treinamento dos motoristas e a conscientização que a forma de condução dos veículos é um dos maiores fatores de desgaste excessivo dos pneus, a calibração ainda com os pneus frios e os cuidados em pavimentos severos, tornando o treinamento mais completo e robusto.

Fatores externos que poderiam ser implementados no software, a temperatura ambiente, dos pavimentos e o nível de aderência do solo.

Por fim, a aplicação deste estudo de projeção da vida útil para pneus de caminhões e ônibus. A realização de experimentos em campo e a comparação dos métodos propostos deste trabalho com o método das empresas especializadas.

REFERÊNCIAS

A. Becker, B. Seifert. Simulation of wear with a FE tyre model using a steady state rolling formulation. Tyre Research, Tyre Mechanics, Continental AG, Hannover, Germany.

Acidentes rodoviários e infraestrutura. – Brasília: CNT, 2018.

Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, 2019.

Anthony, David A. (2007). The horse, the wheel, and language: how Bronze-Age riders from the Eurasian steppes shaped the modern world. Princeton, N.J: Princeton University Press. p. 67.

BAKKER, E.; NYBORG, L e PACEJKA, H.B. Tyre Modelling for use in vehicle dynamics studies. Relatório técnico SAE Technical Paper, 1987.

BAZZON, S. C. M. Terminologia da Indústria de Artefatos de Borracha: proposta de um vocabulário. Universidade Federal de São Carlos. Centro de Educação e Ciências Humanas. 11 p., 2009.

CHARNET, Reinaldo. et al. Análise de modelos de regressão Linear com Aplicações. 2 ed. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2008.

DICK, J. S., Rubber Technology: Compounding and Testing Performance, Hanser Publishers, Munich, 568 p., 2001.

FUENTES, L.a, GUNARATNE, M.b, De León IZEPPI, E.c, FLINTSCH, G.d, MARTINEX, G.e View Correspondence. Determination of pavement macrotexture limit for use in international friction index model (Article). Transportation Research Record - Issue 2306, 1 December 2012, Pages 138-143

GENT, A. N., Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components, Hanser Publishers, Munich, 18 p., 2012.

GENTA, G. Motor vehicle dynamics modeling and simulation, v. 43. World Scientific, 1997.

GHOREISHY, M.H.R. A State-of-the-Art Review of the Finite Element Modelling of Rolling Tyres. Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran, 2008.

GILLESPIE, T. D. (1992). Fundamentals of vehicle dynamics. Michigan: Society of Automotive Engineers Inc.

HARRIS and CREDE, McGraw-Hill 1976. Shock and Vibration Handbook.

HAVARIAS. Metodologia para Análise de Confiabilidade de Pneus Radiais em Frotas de Caminhões de Longa Distância. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 2005.

HOGG Robert V. Probability and Statistical Inference/ Robert V. Hogg, Elliot A. Tanis, Dale Zimmerman. – 9th ed., 2015.

HULTMANN. Estudo de Confiabilidade de Pneus de Rodagem. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Exatas e pelo Setor de Tecnologia, 2011.

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Programa Brasileiro de Etiquetagem. Tabela de Consumo / Eficiência Energética de Veículos Automotores Leves. INMETRO, 2019.

International Institute of Synthetic Rubber Producers Inc., Holanda. 1973.

ISO 3417 (2008). Rubber – Measurement of Vulcanization characteristics with the oscillating disc curemeter.

ISO 6502 (2016). Rubber — Guide to the use of curemeters.

ISO2631 (1978). Guia para avaliação da exposição humana à vibrações de corpo inteiro. Segunda edição.

J. C. Cho and B. C. Jung, “Prediction of Tread Pattern Wear by Explicit FEM,” Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 35, 2006.

J. Myung. Tutorial on maximum likelihood estimation. Journal of Mathematical Psychology. Department of Psychology, Ohio State University, 1885 Neil Avenue Mall, Columbus, OH, USA (2002).

JAZAR, R. N., *Vehicle Dynamics: Theory and Application*, Springer Science, 15 p., 2008.

KUBO P., et al., (2007). Aplicação do método de Plackett-Burman para a otimização de experimentos: definição de parâmetros para testes de conforto. SAE Brasil – Colloquium de suspensão – Caxias do Sul / RS.

Yong Li, Shuguang Zuo, Lei Lei, Xianwu Yang and Xudong Wu. *Journal of Vibration and Control* 2012 18: 833 originally published online 25 August 2011.

LINDÉN, J. (2003). Test methods for ride comfort evaluation of truck seats. M. Sc. thesis. Royal Institute of Technology, Department of Signals, Sensors & Systems - Automatic Control. Stockholm - Sweden.

LUK et al., Tread Wear Estimation System and Method. Patent Application Publication. Pub. No.: US 2017/0023441 A1. (2017).

M. Gunaratne, N. Bandara, J. Medzorian, M. Chawla and P. Ulrich, Correlation of Tire Wear and Friction to Texture of Concrete Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, February 2000.

M. M. DA SILVA, R. H. CUNHA and A. C. NETO. Simplified Model for Evaluating Tire Wear During Conceptual Design. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 13, No. 6, pp. 915–922 (2012).

MEEKER, W. Q., Escobar, L. A. *Statistical Methods for Reliability Data*, John Wiley & Sons, 1998.

MONTGOMERY, Douglas C e RUNGER, George C. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 5 ed. LTC. Rio de Janeiro. 2013.

National Research Council. 1994. *Polymer Science and Engineering: The Shifting Research Frontiers*. Washington, DC: The National Academies Press.

Neyman. J, "On the problem of confidence intervals" *Ann. Math. Stat.* , 6 (1935) pp

Organização das Nações Unidas – ONU, 2009.

Organização Mundial de Saúde – OMS, 2009.

PERSEGUIM, O. T. (2005). Dinâmica veicular relativa ao ride de veículos e métricas para sua avaliação. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo – Engenharia de São Carlos.

RIPPEL, M. M. Caracterização Microestrutural de Filmes e Partículas de Látex de Borracha Natural. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, Departamento de Físico-Química, 3 p., 2005.

Rocha, E. C.; Lovison, V. M. H. & Pierozan N. J. - "Tecnologia de Transformação dos Elastômeros", Centro Tecnológico de Polímeros SENAI — CETEPO, São Leopoldo (2003).

RUGGIERO, M. e LOPES, VERA. Cálculo Numérico – Aspectos Teóricos e Computacionais. 2 ed. Campinas, SP: Editora PEARSON, 2000.

SAE J1060. Subjective rating scale for evaluation of noise and ride comfort characteristics related to motor vehicle tires.

SAE J1441. Subjective rating scale for vehicle handling.

SHIEH et al., Method of abrading. Pub. No.: 4,995,197. (1991).

The Pneumatic Tire. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). 2006.

TWTESTES Company. Tire Tread Wear Testing Company. São Paulo. 2017.

VENTURI, Jacir J., 1949. Álgebra Vetorial e Geometria Analítica. 10. Ed. – Curitiba, PR. 242 p.: il. Gráfica Infante.

Wang Yang, Sun Tiecheng, Lu Yongjie and Si Chundi. Prediction for Tire-Pavement Contact Stress under Steady-State Conditions based on 3D Finite Element Method. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2016.

WEI, L. Email Author, LIU, H., CHEN, H., Zhao, Z. View Correspondence (jump link) Mechanics of Advanced Materials and Structures. Finite element analysis of cross section of TBR tire(Article). Volume 27, Issue 17, 1 September 2020, Pages 1509-1517

WHITE, J. R.; DE, S. K. Rubber Technologist's Handbook. Polestar Scientifica, Exeter, UK, 2001.

ZEVIANI, W. M., JÚNIOR. P. J. R. and BONAT, W. H. Modelos de Regressão Não Linear, Laboratório de Estatística e Geoinformação, Departamento de Estatística, Universidade Federal do Paraná, 2013.

APÊNDICE A - Medições de Profundidade dos Sulcos dos Pneus de Referência 185/65R15 e os Pneus Propostos 195/55R16

Os resultados obtidos nos ensaios de *captive* são apresentados na Tabela Apêndice A.1, onde são as medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência nas quatro posições do veículo, os pneus utilizados têm as características 185/65R15 após 5000 km percorridos.

Tabela Apêndice A.1: Profundidade dos sulcos dos pneus de referência

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,2	6,4	6,5	6,3	5,4
90°	5,1	6,4	6,5	6,4	5,4
180°	5,2	6,3	6,4	6,3	5,5
270°	5,1	6,4	6,5	6,4	5,5
Média dos Sulcos	5,2	6,4	6,5	6,4	5,5
Desgaste dos Sulcos	0,6	0,6	0,9	0,6	0,4
Média do desgaste	0,6				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	0,6				
km / mm	8303				
Quilometragem projetada [km]	41517				
% desgaste	12%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,2	6,4	6,5	6,4	5,4
90°	5,2	6,4	6,5	6,5	5,5
180°	5,2	6,4	6,4	6,4	5,5
270°	5,1	6,4	6,5	6,5	5,4
Média dos Sulcos	5,2	6,4	6,5	6,5	5,5
Desgaste dos Sulcos	0,6	0,6	0,9	0,6	0,5
Média do desgaste	0,6				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,7				
Média do desgaste [mm]	0,6				
km / mm	8303				
Quilometragem projetada [km]	42347				
% desgaste	12%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,7	6,6	7,0	6,9	5,8
90°	5,7	6,7	7,0	6,8	5,8
180°	5,7	6,7	6,9	6,8	5,9
270°	5,7	6,8	7,0	6,8	5,8
Média dos Sulcos	5,7	6,7	7,0	6,8	5,8
Desgaste dos Sulcos	0,1	0,3	0,4	0,2	0,1
Média do desgaste	0,2				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	0,2				
km / mm	24910				
Quilometragem projetada [km]	124550				
% desgaste	4%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,7	6,6	7,0	6,9	5,9
90°	5,7	6,7	6,8	6,8	5,8
180°	5,7	6,7	6,8	6,8	5,9
270°	5,7	6,6	6,9	6,8	5,9
Média dos Sulcos	5,7	6,7	6,9	6,8	5,9
Desgaste dos Sulcos	0,0	0,3	0,4	0,2	0,1
Média do desgaste	0,2				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	0,2				
km / mm	24910				
Mileage projected [km]	124550				
% worn	4%				

Na Tabela Apêndice A.2 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos com as características 195/55R16 após 5000 km percorridos.

Tabela Apêndice A.2: Profundidade dos sulcos dos pneus propostos

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,1	6,3	6,1	6,3	5,3
90°	5,0	6,2	6,0	6,1	5,3
180°	5,1	6,2	6,0	6,0	5,4
270°	5,1	6,2	6,2	6,2	5,4
Média dos Sulcos	5,1	6,2	6,1	6,2	5,4
Desgaste dos Sulcos	0,6	0,8	1,2	0,9	0,4
Média do desgaste	0,8				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	0,8				
km / mm	6228				
Quilometragem projetada [km]	31138				
% desgaste	16%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,0	6,2	6,2	6,2	5,3
90°	5,1	6,1	6,0	6,0	5,3
180°	5,1	6,2	6,1	6,0	5,3
270°	5,1	6,2	6,1	6,2	5,3
Média dos Sulcos	5,1	6,2	6,1	6,1	5,3
Desgaste dos Sulcos	0,5	0,9	1,2	1,0	0,5
Média do desgaste	0,8				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	0,8				
km / mm	6228				
Quilometragem projetada [km]	31138				
% desgaste	16%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,6	6,7	6,8	6,7	5,7
90°	5,5	6,6	6,8	6,8	5,6
180°	5,6	6,5	6,7	6,7	5,7
270°	5,6	6,6	6,8	6,8	5,7
Média dos Sulcos	5,6	6,6	6,8	6,8	5,7
Desgaste dos Sulcos	0,1	0,4	0,6	0,2	0,1
Média do desgaste	0,3				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	0,3				
km / mm	16607				
Quilometragem projetada [km]	83033				
% desgaste	6%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,7	6,8	7,0	6,8	5,8
90°	5,7	6,8	7,1	6,9	5,8
180°	5,7	6,8	7,1	7,0	5,8
270°	5,7	6,8	7,1	7,0	5,8
Média dos Sulcos	5,7	6,8	7,1	6,9	5,8
Desgaste dos Sulcos	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0
Média do desgaste	0,1				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	0,1				
km / mm	19710				
Mileage projected [km]	98550				
% worn	2%				

Na Tabela Apêndice A.3 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência com as características 185/65R15 após 10000 km percorridos.

Tabela Apêndice A.3: Profundidade dos sulcos dos pneus de referência

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	5,5	5,5	5,5	4,9
90°	4,4	5,7	5,6	5,5	4,6
180°	4,4	5,5	5,5	5,5	4,8
270°	4,5	5,5	5,5	5,5	4,7
Média dos Sulcos	4,5	5,6	5,5	5,5	4,8
Desgaste dos Sulcos	1,3	1,4	1,9	1,5	1,1
Média do desgaste	1,4				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	1,4				
km / mm	7149				
Quilometragem projetada [km]	35743				
% desgaste	28%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	5,5	5,7	5,8	4,8
90°	4,4	5,6	5,6	5,7	4,9
180°	4,6	5,5	5,5	5,6	4,9
270°	4,5	5,6	5,6	5,8	4,9
Média dos Sulcos	4,5	5,6	5,6	5,7	4,9
Desgaste dos Sulcos	1,3	1,4	1,8	1,4	1,1
Média do desgaste	1,4				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,7				
Média do desgaste [mm]	1,4				
km / mm	7149				
Quilometragem projetada [km]	36458				
% desgaste	27%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,5	6,3	6,6	6,6	5,7
90°	5,5	6,3	6,6	6,5	5,7
180°	5,4	6,3	6,5	6,5	5,6
270°	5,4	6,3	6,5	6,5	5,6
Média dos Sulcos	5,5	6,3	6,6	6,5	5,7
Desgaste dos Sulcos	0,3	0,7	0,8	0,5	0,2
Média do desgaste	0,5				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	0,5				
km / mm	20016				
Quilometragem projetada [km]	100080				
% desgaste	10%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,5	6,1	6,4	6,4	5,7
90°	5,5	6,3	6,5	6,4	5,7
180°	5,5	6,2	6,3	6,4	5,7
270°	5,5	6,1	6,3	6,3	5,8
Média dos Sulcos	5,5	6,2	6,4	6,4	5,7
Desgaste dos Sulcos	0,2	0,8	0,9	0,6	0,3
Média do desgaste	0,6				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	0,6				
km / mm	16680				
Mileage projected [km]	83400				
% worn	12%				

Na Tabela Apêndice A.4 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos com as características 195/55R16 após 10000 km percorridos.

Tabela Apêndice A.4: Profundidade dos sulcos dos pneus propostos

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,3	5,3	4,9	5,3	4,8
90°	4,2	5,2	4,9	5,1	4,7
180°	4,2	5,3	5,0	5,0	4,7
270°	4,2	5,3	5,2	5,3	4,7
Média dos Sulcos	4,2	5,3	5,0	5,2	4,7
Desgaste dos Sulcos	1,5	1,7	2,3	1,9	1,1
Média do desgaste	1,7				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	1,7				
km / mm	5887				
Quilometragem projetada [km]	29435				
% desgaste	34%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,4	5,3	5,1	5,4	4,7
90°	4,5	5,2	5,0	5,2	4,7
180°	4,5	5,3	5,1	5,2	4,7
270°	4,5	5,2	5,0	5,3	4,7
Média dos Sulcos	4,5	5,3	5,1	5,3	4,7
Desgaste dos Sulcos	1,1	1,8	2,2	1,8	1,1
Média do desgaste	1,6				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	1,6				
km / mm	6255				
Quilometragem projetada [km]	31275				
% desgaste	32%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,2	6,1	6,3	6,4	5,5
90°	5,2	6,1	6,2	6,6	5,5
180°	5,2	6,0	6,1	6,4	5,6
270°	5,2	6,1	6,2	6,3	5,6
Média dos Sulcos	5,2	6,1	6,2	6,4	5,6
Desgaste dos Sulcos	0,5	0,9	1,2	0,6	0,2
Média do desgaste	0,7				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	0,7				
km / mm	14297				
Quilometragem projetada [km]	71486				
% desgaste	14%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,5	6,4	6,4	6,4	5,6
90°	5,6	6,3	6,4	6,4	5,7
180°	5,5	6,3	6,5	6,6	5,6
270°	5,5	6,3	6,6	6,6	5,7
Média dos Sulcos	5,5	6,3	6,5	6,5	5,7
Desgaste dos Sulcos	0,2	0,7	0,8	0,5	0,1
Média do desgaste	0,5				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	0,5				
km / mm	14010				
Mileage projected [km]	70050				
% worn	10%				

Na Tabela Apêndice A.5 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência com as características 185/65R15 após 15000 km percorridos.

Tabela Apêndice A.5: Profundidade dos sulcos dos pneus de referência

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,0	4,9	5,1	4,9	4,0
90°	3,8	5,0	4,9	4,8	3,9
180°	4,0	4,9	4,8	4,8	3,8
270°	4,0	5,0	4,9	4,9	3,8
Média dos Sulcos	4,0	5,0	4,9	4,9	3,9
Desgaste dos Sulcos	1,8	2,0	2,5	2,1	2,0
Média do desgaste	2,1				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	2,1				
km / mm	7120				
Quilometragem projetada [km]	35600				
% desgaste	42%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,9	5,2	5,1	5,3	4,1
90°	4,0	5,2	5,1	5,2	4,2
180°	3,9	5,1	5,0	5,1	4,1
270°	4,0	5,2	5,0	5,2	4,2
Média dos Sulcos	4,0	5,2	5,1	5,2	4,2
Desgaste dos Sulcos	1,8	1,8	2,3	1,9	1,8
Média do desgaste	1,9				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	1,9				
km / mm	7869				
Quilometragem projetada [km]	40134				
% desgaste	37%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,2	5,9	6,4	6,4	5,5
90°	5,2	6,0	6,5	6,3	5,5
180°	5,1	5,8	6,4	6,3	5,4
270°	5,1	6,0	6,4	6,3	5,3
Média dos Sulcos	5,2	5,9	6,4	6,3	5,4
Desgaste dos Sulcos	0,6	1,1	1,0	0,7	0,5
Média do desgaste	0,8				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	0,8				
km / mm	18690				
Quilometragem projetada [km]	93450				
% desgaste	16%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,2	5,7	6,0	6,2	5,5
90°	5,1	5,8	6,2	6,2	5,5
180°	5,2	5,7	6,1	6,2	5,6
270°	5,1	5,5	5,9	6,2	5,5
Média dos Sulcos	5,2	5,7	6,1	6,2	5,5
Desgaste dos Sulcos	0,5	1,3	1,2	0,8	0,5
Média do desgaste	0,9				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	0,9				
km / mm	16613				
Mileage projected [km]	83067				
% worn	18%				

Na Tabela Apêndice A.6 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos com as características 195/55R16 após 15000 km percorridos.

Tabela Apêndice A.6: Profundidade dos sulcos dos pneus propostos

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,6	4,4	4,0	4,2	3,7
90°	3,4	4,2	3,8	4,2	3,7
180°	3,5	4,4	4,0	4,2	3,7
270°	3,4	4,4	4,1	4,5	3,9
Média dos Sulcos	3,5	4,4	4,0	4,3	3,8
Desgaste dos Sulcos	2,2	2,6	3,3	2,8	2,0
Média do desgaste	2,6				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	2,6				
km / mm	5751				
Quilometragem projetada [km]	28754				
% desgaste	52%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,5	4,5	4,3	4,5	3,7
90°	3,7	4,6	4,0	4,4	3,7
180°	3,7	4,6	4,1	4,4	3,8
270°	3,8	4,5	4,0	4,5	3,8
Média dos Sulcos	3,7	4,6	4,1	4,5	3,8
Desgaste dos Sulcos	1,9	2,5	3,2	2,6	2,0
Média do desgaste	2,4				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	2,4				
km / mm	6230				
Quilometragem projetada [km]	31150				
% desgaste	48%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	5,3	5,7	6,0	5,2
90°	4,6	5,4	5,8	6,0	5,2
180°	4,5	5,2	5,5	6,0	5,2
270°	4,5	5,2	5,7	5,9	5,2
Média dos Sulcos	4,5	5,3	5,7	6,0	5,2
Desgaste dos Sulcos	1,2	1,7	1,7	1,0	0,6
Média do desgaste	1,2				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	1,2				
km / mm	12460				
Quilometragem projetada [km]	62300				
% desgaste	24%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,9	5,6	5,9	5,9	5,4
90°	4,9	5,6	5,8	6,0	5,3
180°	4,8	5,6	5,9	5,9	5,2
270°	4,8	5,8	6,1	6,1	5,3
Média dos Sulcos	4,9	5,7	5,9	6,0	5,3
Desgaste dos Sulcos	0,8	1,3	1,4	1,0	0,5
Média do desgaste	1,0				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	1,0				
km / mm	11949				
Mileage projected [km]	59745				
% worn	20%				

Na Tabela Apêndice A.7 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência com as características 185/65R15 após 20000 km percorridos.

Tabela Apêndice A.7: Profundidade dos sulcos dos pneus de referência

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,5	4,3	4,3	4,3	3,4
90°	3,3	4,3	4,1	4,1	3,2
180°	3,5	4,1	3,9	4,2	3,3
270°	3,6	4,2	3,9	4,1	3,4
Média dos Sulcos	3,5	4,2	4,1	4,2	3,3
Desgaste dos Sulcos	2,3	2,8	3,3	2,8	2,6
Média do desgaste	2,8				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	2,8				
km / mm	7141				
Quilometragem projetada [km]	35705				
% desgaste	56%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,4	4,5	4,4	4,5	3,6
90°	3,4	4,5	4,3	4,5	3,6
180°	3,5	4,4	4,2	4,3	3,6
270°	3,5	4,5	4,4	4,4	3,6
Média dos Sulcos	3,5	4,5	4,3	4,4	3,6
Desgaste dos Sulcos	2,3	2,5	3,1	2,7	2,4
Média do desgaste	2,6				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	2,6				
km / mm	7690				
Quilometragem projetada [km]	39221				
% desgaste	51%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,8	5,4	5,9	5,9	5,1
90°	4,8	5,4	5,9	5,9	5,2
180°	4,6	5,2	5,7	5,7	5,1
270°	4,7	5,4	6,0	5,8	5
Média dos Sulcos	4,8	5,4	5,9	5,8	5,1
Desgaste dos Sulcos	1,0	1,6	1,5	1,2	0,8
Média do desgaste	1,2				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	1,2				
km / mm	16663				
Quilometragem projetada [km]	83313				
% desgaste	24%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,9	5,1	5,4	5,6	5,3
90°	4,7	5,3	5,5	5,7	5,2
180°	4,7	5,2	5,5	5,7	5,3
270°	4,6	5,1	5,3	5,5	5,3
Média dos Sulcos	4,7	5,2	5,4	5,6	5,3
Desgaste dos Sulcos	1,0	1,8	1,9	1,4	0,7
Média do desgaste	1,4				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	1,4				
km / mm	14282				
Mileage projected [km]	71411				
% worn	28%				

Na Tabela Apêndice A.8 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos com as características 195/55R16 após 20000 km percorridos.

Tabela Apêndice A.8: Profundidade dos sulcos dos pneus propostos

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	2,9	3,7	3,1	3,5	3,0
90°	2,8	3,5	3,0	3,4	3,0
180°	2,9	3,7	3,2	3,3	3,0
270°	2,8	3,7	3,4	3,8	2,9
Média dos Sulcos	2,9	3,7	3,2	3,5	3,0
Desgaste dos Sulcos	2,8	3,3	4,1	3,6	2,8
Média do desgaste	3,3				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	3,3				
km / mm	6059				
Quilometragem projetada [km]	30295				
% desgaste	66%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,0	3,7	3,4	3,7	3,2
90°	3,0	3,7	3,2	3,6	3,1
180°	3,2	3,9	3,3	3,7	3,2
270°	3,2	3,7	3,3	3,6	3,3
Média dos Sulcos	3,1	3,8	3,3	3,7	3,2
Desgaste dos Sulcos	2,5	3,3	4,0	3,4	2,6
Média do desgaste	3,2				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	3,2				
km / mm	6248				
Quilometragem projetada [km]	31242				
% desgaste	64%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,1	4,8	5,2	5,5	4,9
90°	4,1	4,9	5,2	5,6	4,9
180°	4,0	4,8	5,1	5,5	5
270°	4,0	4,8	5,3	5,6	5
Média dos Sulcos	4,1	4,8	5,2	5,6	5
Desgaste dos Sulcos	1,6	2,2	2,2	1,4	0,8
Média do desgaste	1,6				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	1,6				
km / mm	12497				
Quilometragem projetada [km]	62484				
% desgaste	32%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	5,2	5,5	5,7	5,2
90°	4,5	5,0	5,3	5,5	5,2
180°	4,4	5,0	5,4	5,6	5,1
270°	4,5	5,3	5,8	5,7	5,2
Média dos Sulcos	4,5	5,1	5,5	5,6	5,2
Desgaste dos Sulcos	1,2	1,9	1,8	1,4	0,6
Média do desgaste	1,4				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	1,4				
km / mm	12137				
Mileage projected [km]	60686				
% worn	28%				

Na Tabela Apêndice A.9 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência com as características 185/65R15 após 25000 km percorridos.

Tabela Apêndice A.9: Profundidade dos sulcos dos pneus de referência

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,0	3,6	3,6	3,7	2,8
90°	2,9	3,7	3,4	3,5	2,6
180°	3,1	3,4	3,2	3,5	2,6
270°	3,2	3,5	3,2	3,5	2,7
Média dos Sulcos	3,1	3,6	3,4	3,6	2,7
Desgaste dos Sulcos	2,7	3,4	4,0	3,4	3,2
Média do desgaste	3,3				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	3,3				
km / mm	7572				
Quilometragem projetada [km]	37861				
% desgaste	66%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,1	4,0	3,8	4,1	3,1
90°	3,1	4,0	3,8	4,0	3,1
180°	3,1	4,0	3,6	3,8	3,0
270°	3,1	3,9	3,7	3,9	3,1
Média dos Sulcos	3,1	4,0	3,7	4,0	3,1
Desgaste dos Sulcos	2,7	3,0	3,7	3,1	2,9
Média do desgaste	2,6				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,7				
Média do desgaste [mm]	3,1				
km / mm	8061				
Quilometragem projetada [km]	41109				
% desgaste	61%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,2	4,8	5,4	5,5	4,7
90°	4,2	4,9	5,4	5,4	4,7
180°	4,1	4,6	5,1	5,2	4,6
270°	4,3	4,9	5,5	5,3	4,5
Média dos Sulcos	4,2	4,8	5,4	5,4	4,6
Desgaste dos Sulcos	1,6	2,2	2,0	1,6	1,3
Média do desgaste	1,7				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	1,7				
km / mm	14669				
Quilometragem projetada [km]	73494				
% desgaste	34%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,3	4,5	4,7	5,2	4,9
90°	4,2	4,8	4,9	5,2	4,8
180°	4,2	4,8	4,9	5,3	5,0
270°	4,0	4,4	4,6	5,2	5,0
Média dos Sulcos	4,2	4,6	4,8	5,2	4,9
Desgaste dos Sulcos	1,5	2,4	2,5	1,8	1,1
Média do desgaste	1,9				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	1,9				
km / mm	13152				
Mileage projected [km]	65758				
% worn	38%				

Na Tabela Apêndice A.10 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos com as características 195/55R16 após 25000 km percorridos.

Tabela Apêndice A.10: Profundidade dos sulcos dos pneus propostos

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	2,4	3,1	2,3	2,8	2,5
90°	2,3	2,8	2,2	2,7	2,5
180°	2,4	3,0	2,4	2,7	2,5
270°	2,3	3,1	2,7	3,1	2,3
Média dos Sulcos	2,4	3,0	2,4	2,8	2,5
Desgaste dos Sulcos	3,3	4,0	4,9	4,3	3,3
Média do desgaste	4,0				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	4,0				
km / mm	6247				
Quilometragem projetada [km]	31235				
% desgaste	80%				

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	2,4	3,1	2,5	2,9	2,6
90°	2,5	2,9	2,3	2,8	2,6
180°	2,6	3,2	2,5	2,9	2,7
270°	2,7	3,0	2,5	2,9	2,7
Média dos Sulcos	2,6	3,1	2,5	2,9	2,7
Desgaste dos Sulcos	3,0	4,0	4,8	4,2	3,1
Média do desgaste	3,8				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	3,8				
km / mm	6576				
Quilometragem projetada [km]	32879				
% desgaste	76%				

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,4	4,2	4,4	4,9	4,5
90°	3,4	4,3	4,4	5,0	4,5
180°	3,4	4,1	4,3	4,9	4,5
270°	3,5	4,1	4,5	5,0	4,6
Média dos Sulcos	3,4	4,2	4,4	5,0	4,5
Desgaste dos Sulcos	2,3	2,8	3,0	2,0	1,3
Média do desgaste	2,3				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Medição original	6,6				
Média do desgaste [mm]	2,3				
km / mm	10864				
Quilometragem projetada [km]	54322				
% desgaste	46%				

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	3,8	4,4	4,6	5,0	4,8
90°	3,8	4,3	4,5	4,9	4,8
180°	3,7	4,2	4,5	4,9	4,6
270°	3,9	4,6	5,0	5,1	4,7
Média dos Sulcos	3,8	4,4	4,7	5,0	4,7
Desgaste dos Sulcos	1,9	2,6	2,6	2,0	1,1
Média do desgaste	2,0				
Dados médios de profundidade dos sulcos					
Original measurements	6,6				
Average wear [mm]	2,0				
km / mm	10993				
Mileage projected [km]	54963				
% worn	40%				

APÊNDICE B - Medições de Profundidade dos Sulcos dos Pneus com Características 195/65R15 Utilizados nos Veículos

Os resultados obtidos nos ensaios de *focus* são apresentados na Tabela Apêndice B.1, as medições de profundidade dos sulcos dos pneus nas quatro posições do veículo, os pneus utilizados têm as características 195/65R15 após 3000 km percorridos.

Tabela Apêndice B.1: Profundidade dos sulcos dos pneus

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,2	7,2	7,3	7,3	5,2
90°	5,2	7,3	7,3	7,2	5,2
180°	5,3	7,3	7,2	7,2	5,3
270°	5,3	7,2	7,2	7,2	5,3
Média dos Sulcos	5,3	7,3	7,3	7,2	5,3

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,3	7,1	7	7,2	5,4
90°	5,3	7,2	7,2	7,2	5,3
180°	5,3	7,2	7,3	7,1	5,2
270°	5,4	7,1	7,1	7,2	5,4
Média dos Sulcos	5,3	7,2	7,2	7,2	5,3

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,3	7,2	7,3	7,2	5,4
90°	5,3	7,3	7,4	7,2	5,3
180°	5,3	7,2	7,3	7,3	5,3
270°	5,0	7,1	7,2	7,2	5,2
Média dos Sulcos	5,2	7,2	7,3	7,2	5,3

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,1	7,2	7,2	7,2	5,4
90°	5,3	7,2	7,3	7,3	5,2
180°	5,3	7,2	7,2	7,3	5,3
270°	5,3	7,2	7,2	7,3	5,3
Média dos Sulcos	5,3	7,2	7,2	7,3	5,3

Na Tabela Apêndice B.2 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus com as características 195/65R15 após 6000 km percorridos.

Tabela Apêndice B.2: Profundidade dos sulcos dos pneus

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,1	6,9	6,8	7,0	5,1
90°	5,0	6,9	6,8	7,0	5,2
180°	5,1	7,0	6,9	7,0	5,0
270°	5,1	6,9	6,9	6,9	5,0
Média dos Sulcos	5,1	6,9	6,9	7,0	5,1

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,0	6,8	6,9	6,9	5,0
90°	4,9	6,8	6,8	7,0	5,1
180°	4,9	6,9	6,9	6,8	5,0
270°	5,0	6,7	6,7	6,9	5,0
Média dos Sulcos	5,0	6,8	6,8	6,9	5,0

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,2	7,1	7,2	7,2	5,3
90°	5,3	7,0	7,2	7,2	5,3
180°	5,1	7,0	7,2	7,1	5,3
270°	5,1	7,0	7,1	7,2	5,2
Média dos Sulcos	5,2	7,0	7,2	7,2	5,3

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,1	7,0	7,0	7,2	5,3
90°	5,2	7,1	7,1	7,0	5,2
180°	5,1	7,0	7,0	6,9	5,3
270°	5,1	7,1	7,0	7,2	5,3
Média dos Sulcos	5,1	7,1	7,0	7,1	5,3

Na Tabela Apêndice B.3 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus com as características 195/65R15 após 9000 km percorridos.

Tabela Apêndice B.3: Profundidade dos sulcos dos pneus

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	6,4	6,5	6,4	4,6
90°	4,7	6,5	6,4	6,5	4,6
180°	4,5	6,4	6,4	6,4	4,7
270°	4,6	6,6	6,5	6,6	4,7
Média dos Sulcos	4,6	6,5	6,5	6,5	4,7

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,6	6,5	6,3	6,6	4,6
90°	4,5	6,5	6,4	6,5	4,7
180°	4,5	6,6	6,4	6,5	4,7
270°	4,8	6,5	6,4	6,5	4,5
Média dos Sulcos	4,6	6,5	6,4	6,5	4,6

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,7	6,8	6,9	7,1	4,8
90°	4,9	6,8	7,0	7,1	4,9
180°	4,7	6,8	6,9	7,0	4,8
270°	4,8	6,7	6,9	7,1	4,8
Média dos Sulcos	4,8	6,8	6,9	7,1	4,8

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,7	6,8	6,7	6,8	4,7
90°	4,8	6,8	6,7	6,8	4,7
180°	4,7	6,6	6,6	6,8	4,8
270°	4,7	6,8	6,7	7,1	4,8
Média dos Sulcos	4,7	6,8	6,7	6,9	4,8

APÊNDICE C - Medições de Profundidade dos Sulcos dos Pneus de Referência 185/65R15 e os Pneus Propostos 195/55R16

Os resultados obtidos nos ensaios de *focus* são apresentados na Tabela Apêndice C.1, onde são as medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência nas quatro posições do veículo, os pneus utilizados têm as características 185/65R15 após 3000 km percorridos.

Tabela Apêndice C.1: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,4	6,5	6,4	6,6	5,5
90°	5,3	6,5	6,4	6,5	5,6
180°	5,4	6,5	6,5	6,5	5,5
270°	5,3	6,5	6,6	6,6	5,6
Média dos Sulcos	5,4	6,5	6,5	6,6	5,6

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,3	6,5	6,6	6,6	5,5
90°	5,3	6,5	6,5	6,5	5,6
180°	5,4	6,5	6,6	6,5	5,6
270°	5,4	6,5	6,5	6,6	5,6
Média dos Sulcos	5,4	6,5	6,6	6,6	5,6

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,6	6,7	6,9	6,9	5,8
90°	5,6	6,7	6,9	6,9	5,8
180°	5,6	6,6	6,8	6,8	5,8
270°	5,7	6,7	6,9	6,8	5,8
Média dos Sulcos	5,6	6,7	6,9	6,9	5,8

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,7	7,1	7,2	6,9	5,8
90°	5,7	7,1	7,3	7,1	5,7
180°	5,7	7,0	7,2	7,1	5,8
270°	5,7	7,0	7,3	7,1	5,9
Média dos Sulcos	5,7	7,1	7,3	7,1	5,8

Na Tabela Apêndice C.2 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos com as características 195/55R16 após 3000 km percorridos.

Tabela Apêndice C.2: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,4	6,5	6,4	6,6	5,5
90°	5,3	6,5	6,4	6,5	5,6
180°	5,4	6,5	6,5	6,5	5,5
270°	5,3	6,5	6,6	6,6	5,6
Média dos Sulcos	5,4	6,5	6,5	6,6	5,6

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,3	6,5	6,6	6,6	5,5
90°	5,3	6,5	6,5	6,5	5,6
180°	5,4	6,5	6,6	6,5	5,6
270°	5,4	6,5	6,5	6,6	5,6
Média dos Sulcos	5,4	6,5	6,6	6,6	5,6

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,6	6,7	6,9	6,9	5,8
90°	5,6	6,7	6,9	6,9	5,8
180°	5,6	6,6	6,8	6,8	5,8
270°	5,7	6,7	6,9	6,8	5,8
Média dos Sulcos	5,6	6,7	6,9	6,9	5,8

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,7	7,1	7,2	6,9	5,8
90°	5,7	7,1	7,3	7,1	5,9
180°	5,7	7,0	7,2	7,1	5,8
270°	5,7	7,0	7,3	7,1	5,9
Média dos Sulcos	5,7	7,1	7,3	7,1	5,9

Na Tabela Apêndice C.3 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência com as características 185/65R15 após 6000 km percorridos.

Tabela Apêndice C.3: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,0	6,1	6,3	6,1	5,3
90°	4,8	6,2	6,2	6,1	5,2
180°	4,9	6,1	6,1	6,1	5,2
270°	5,0	6,2	6,2	6,1	5,3
Média dos Sulcos	4,9	6,2	6,2	6,1	5,3

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,8	6,1	6,1	6,2	5,2
90°	4,8	6,1	6,0	6,2	5,2
180°	4,9	6,0	6,0	6,1	5,2
270°	4,8	6,0	6,1	6,2	5,3
Média dos Sulcos	4,8	6,1	6,1	6,2	5,2

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,6	6,5	6,8	6,8	5,8
90°	5,5	6,6	6,9	6,7	5,9
180°	5,5	6,5	6,8	6,8	5,8
270°	5,6	6,6	6,9	6,7	5,8
Média dos Sulcos	5,6	6,6	6,9	6,8	5,8

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,6	6,4	6,7	6,6	5,8
90°	5,5	6,5	6,7	6,7	5,8
180°	5,5	6,5	6,6	6,6	5,8
270°	5,5	6,5	6,7	6,6	5,9
Média dos Sulcos	5,5	6,5	6,7	6,6	5,8

Na Tabela Apêndice C.4 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos com as características 195/55R16 após 6000 km percorridos.

Tabela Apêndice C.4: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,0	6,1	6,3	6,1	5,3
90°	4,8	6,2	6,2	6,1	5,2
180°	4,9	6,1	6,1	6,1	5,2
270°	5,0	6,2	6,2	6,1	5,3
Média dos Sulcos	4,9	6,2	6,2	6,1	5,3

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,8	6,1	6,1	6,2	5,2
90°	4,8	6,1	6,0	6,2	5,2
180°	4,9	6,0	6,0	6,1	5,2
270°	4,8	6,0	6,1	6,2	5,3
Média dos Sulcos	4,8	6,1	6,1	6,2	5,2

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,6	6,5	6,8	6,8	5,8
90°	5,5	6,6	6,9	6,7	5,9
180°	5,5	6,5	6,8	6,8	5,8
270°	5,6	6,6	6,9	6,7	5,8
Média dos Sulcos	5,6	6,6	6,9	6,8	5,8

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,6	6,4	6,7	6,6	5,8
90°	5,5	6,5	6,7	6,7	5,8
180°	5,5	6,5	6,6	6,6	5,8
270°	5,5	6,5	6,7	6,6	5,9
Média dos Sulcos	5,5	6,5	6,7	6,6	5,8

Na Tabela Apêndice C.5 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus de referência com as características 185/65R15 após 9000 km percorridos.

Tabela Apêndice C.5: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus referência

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,6	5,7	5,9	5,7	5,0
90°	4,4	5,8	5,7	5,7	4,8
180°	4,5	5,6	5,7	5,6	4,8
270°	4,6	5,7	5,7	5,7	4,9
Média dos Sulcos	4,5	5,7	5,8	5,7	4,9

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	5,7	5,7	5,9	5,0
90°	4,5	5,8	5,8	5,9	5,0
180°	4,6	5,6	5,7	5,8	5,0
270°	4,7	5,8	5,8	5,8	5,0
Média dos Sulcos	4,6	5,7	5,8	5,9	5,0

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,0	6,4	6,7	6,6	5,8
90°	5,5	6,4	6,7	6,6	5,8
180°	5,5	6,4	6,6	6,6	5,7
270°	5,5	6,4	6,8	6,6	5,7
Média dos Sulcos	5,4	6,4	6,7	6,6	5,8

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,5	6,2	6,4	6,5	5,7
90°	5,5	6,4	6,6	6,5	5,8
180°	5,5	6,2	6,4	6,6	5,8
270°	5,5	6,2	6,4	6,4	5,9
Média dos Sulcos	5,5	6,3	6,5	6,5	5,8

Na Tabela Apêndice C.6 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos com as características 195/55R16 após 9000 km percorridos.

Tabela Apêndice C.6: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus propostos

Dianteiro Esquerdo (DE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,6	5,7	5,9	5,7	5,0
90°	4,4	5,8	5,7	5,7	4,8
180°	4,5	5,6	5,7	5,6	4,8
270°	4,6	5,7	5,7	5,7	4,9
Média dos Sulcos	4,5	5,7	5,8	5,7	4,9

Dianteiro Direito (DD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	4,5	5,7	5,7	5,9	5,0
90°	4,5	5,8	5,8	5,9	5,0
180°	4,6	5,6	5,7	5,8	5,0
270°	4,7	5,8	5,8	5,8	5,0
Média dos Sulcos	4,6	5,7	5,8	5,9	5,0

Traseiro Esquerdo (TE)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,5	6,4	6,7	6,6	5,8
90°	5,5	6,4	6,7	6,6	5,8
180°	5,5	6,4	6,6	6,6	5,7
270°	5,5	6,4	6,8	6,6	5,7
Média dos Sulcos	5,5	6,4	6,7	6,6	5,8

Traseiro Direito (TD)					
Posição	A	B	C	D	E
0°	5,5	6,2	6,4	6,5	5,7
90°	5,5	6,4	6,6	6,5	5,8
180°	5,5	6,2	6,4	6,6	5,8
270°	5,5	6,2	6,4	6,4	5,9
Média dos Sulcos	5,5	6,3	6,5	6,5	5,8

APÊNDICE D - Medições de Profundidade dos Sulcos dos Pneus com Características 195/65R15 Utilizados nos Veículos

Na Figura Apêndice D.1 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus com as características 195/65R15, do início ao término dos testes do carro 2.

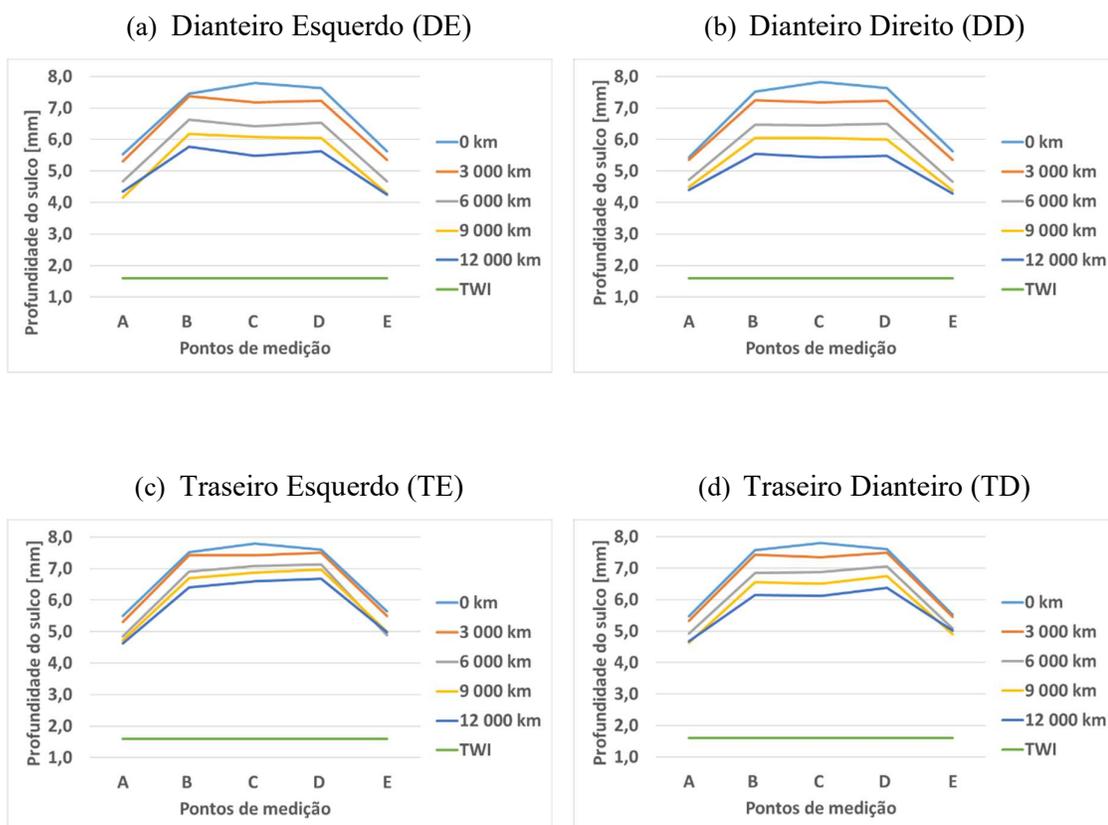


Figura Apêndice D.1: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus do carro 2

Na Figura Apêndice D.2 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus com as características 195/65R15, do início ao término dos testes do carro 3.

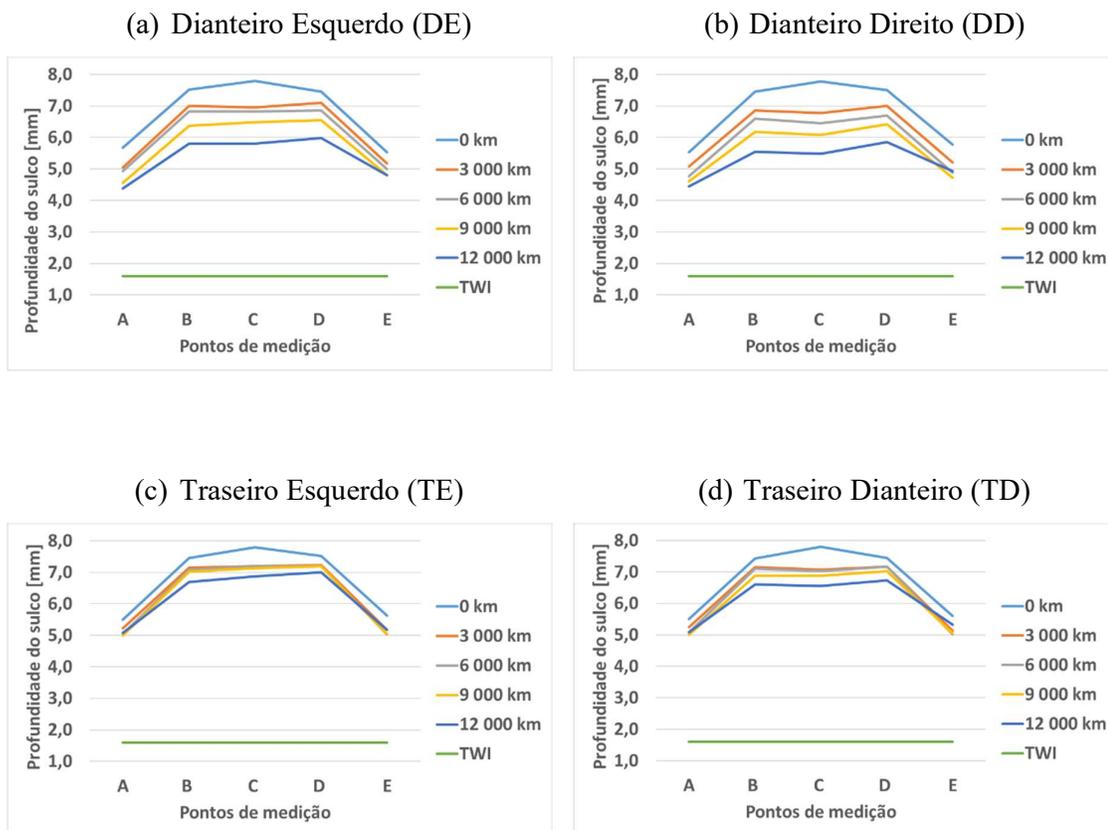


Figura Apêndice D.2: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus do carro 3

Na Figura Apêndice D.3 são apresentadas as medições de profundidade dos sulcos dos pneus com as características 195/65R15, do início ao término dos testes do carro 4.

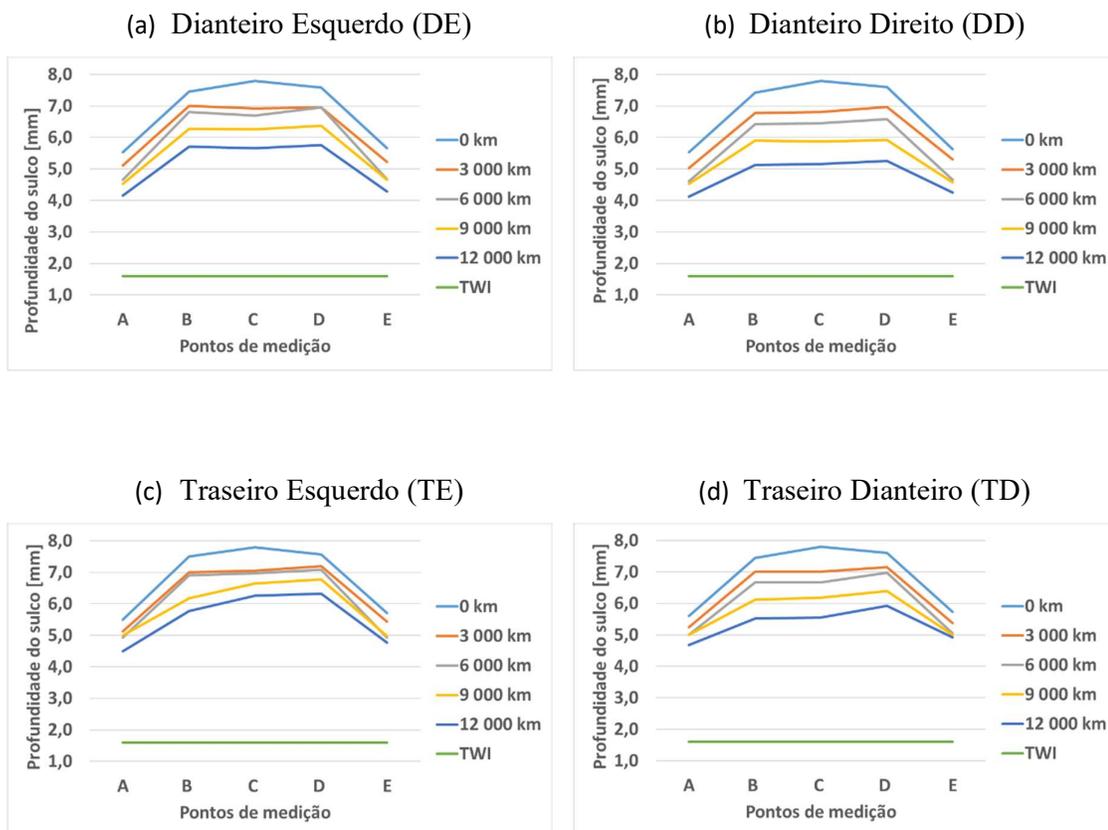


Figura Apêndice D.3: Medições de profundidade dos sulcos dos pneus do carro 4

APÊNDICE E - Compostos Químicos e Funções da Banda de Rodagem de Um Pneu

E.1 Sílica

Os pneus verdes ou pneus de sílica, apresentam melhor comportamento no piso molhado comparado aos pneus que utilizam apenas negro de fumo. Essa diferença se destaca devido a diferença de polaridade entre a sílica e a água, com isso ocorre uma repulsão da água pela sílica aplicada na banda rodagem. A molécula de água é um exemplo comum de uma molécula polar. O átomo de oxigênio é mais eletronegativo que o de hidrogênio, ou seja, o núcleo do oxigênio atrai os elétrons envolvidos na ligação O - H mais fortemente que o núcleo do hidrogênio. Essa propriedade é decisiva na polaridade da molécula de água, uma vez que torna o oxigênio mais negativo (com os elétrons mais próximos) e o hidrogênio mais positivo (com os elétrons mais afastados). Ou seja, a molécula de água é polar, sendo o oxigênio seu polo negativo ($2\delta^-$, já que são dois elétrons a mais) e os hidrogênios seus polos positivos (δ^+ , um elétron a menos para cada átomo), (Dick 2001). Já o negro de fumo é apolar, fazendo com que os pneus fabricados apenas com essa matéria prima, tenham o comportamento inferior ao da sílica no piso molhado, pois não ocorrerá repulsão entre as moléculas.

A interação entre polímero e carga (P-F), pode ser ajustada com a morfologia da sílica. Com a diminuição do tamanho da partícula, se nota um incremento da interação P-F. Isso se deve, pelo fato dela ter uma maior dispersibilidade na matriz polimérica. Quanto maior a partícula, maior a interação carga-carga (F-F). Contudo, para uma efetiva interação entre polímero-carga, se faz necessário o uso de um agente de ligação entre a carga e as cadeias poliméricas denominado *coupling agent*. O *coupling agent* em geral é uma substância bifuncional, onde faz a cobertura superficial da partícula polar para diminuir a interação F-F, possibilitando maior interação P-F.

Com a chegada da sílica na manufatura dos pneus nos anos 90, conseguiu-se expandir o triângulo mágico dos pneus de automóvel. Os pneus verdes, fabricados principalmente com cargas reforçantes de sílica, apresentam melhores desempenhos em resistência ao rolamento, *wet grip*, e razoável resistência ao desgaste comparado ao negro de fumo (NHTSA, 2006). Isso pode ser notado na relação da propriedade com carga utilizada (comumente chamado dentro da indústria de triângulo mágico dos pneus), conforme a Figura 49.

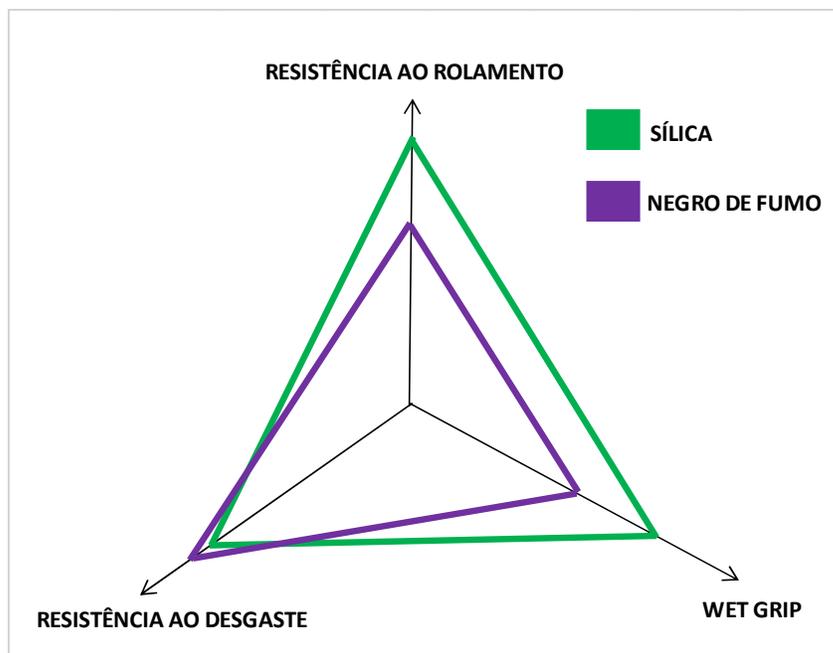


Figura 49: Triângulo mágico dos pneus (Arquivo pessoal).

E.2 Agente Vulcanizante

O agente vulcanizante mais comum e usado na fabricação dos pneus é o enxofre. É o elemento químico de símbolo S , tem estado sólido a temperatura ambiente. Ele pode ser encontrado junto a fontes termais, zonas vulcânicas e em minas além de ser extraído pelo processo Frasch, processo responsável por 23% da produção de enxofre no mundo. Esse processo consiste em injetar vapor de água superaquecido para fundir o enxofre, que posteriormente é bombeado para o exterior utilizando-se ar comprimido. Também está presente em pequenas quantidades em combustíveis fósseis como carvão e petróleo. Sua aplicação se faz necessária como ponte de ligação entre as cadeias de elastômeros. O enxofre pode ser usado em duas formas na vulcanização: em estado solúvel como cristais romboédricos e insolúvel, como enxofre polimérico. Em alguns compostos, o grande uso do enxofre solúvel na mistura provoca um processo chamado de *blooming*, processo pela qual o enxofre migra para a superfície do pneu e se cristaliza, deixando o pneu com uma aparência esbranquiçada. O fenômeno da floração também ocorre quando utilizamos grandes quantidades de enxofre solúvel, isso por que, com o aumento da temperatura ocorre uma maior solubilização do enxofre na matriz, mas ao resfriar o elastômero processado, o enxofre em excesso irá saturar a matriz e

será precipitado, diminuindo assim a aderência do elastômero, provocando defeitos no produto final. O pneu também terá uma aparência esbranquiçada, que não irá agradar nem mesmo os clientes menos exigentes. Para eliminar esse processo de *blooming* utiliza-se o enxofre insolúvel, disperso em elastômero como partículas discretas, que não podem se difundir rapidamente através do elastômero.

Somente a utilização do enxofre como ponte de ligação entre os elastômeros não é suficiente, apenas 40 – 55 átomos de enxofre são combinados com o elastômero, e essas cadeias são instáveis e têm uma fraca resistência ao envelhecimento. Para aumentar e melhorar a eficiência dessas ligações de pontes de enxofre, aceleradores são comumente usados. Eles são divididos em cinco categorias, Uréicos, Aromáticos, Alquilenobis, Ésteres e Organossulfurado. Os aceleradores do tipo uréicos, por exemplo as guanidinas, fornecem a menor taxa de vulcanização, tem início relativamente lento de vulcanização. O início tardio da vulcanização é desejável para algumas partes do pneu, como por exemplo a banda de rodagem. Isso permite que o processo de modelagem do desenho da banda de rodagem seja realizado antes que a vulcanização comece e o material fique em sua forma final. A vulcanização prematura é conhecida como queimadura. Aceleradores do tipo guanidina, são raramente usados sozinhos, normalmente são combinados com outros aceleradores. Os aromáticos tipos xantatos, os aceleradores ultrarrápidos, causam reticulação tão prontamente que raramente são usados em elastômeros sólidos, porque a cura seria iniciada apenas pelo calor gerado durante a mistura. Eles são mais usados principalmente para reticular elastômero como látex. Aceleradores do tipo tiazol são muito importantes para o uso em elastômeros que serão misturados e moídos muitas vezes, sem provocar a vulcanização inesperada ou prematura do elastômero. Os aceleradores do tipo tiuranos e ditiocarbamatos zincado, são considerados ultra aceleradores, por eles terem uma vulcanização muito rápida, sua mistura deve ser feita em baixas temperaturas, e seu processamento imediatamente após a mistura ser feita. É grande a eficiência entre as ligações com o uso dos ultras aceleradores. O tipo de acelerador é mais importante do que a quantidade de acelerador no controle do tempo de queima. Embora os altos níveis de aceleradores aumentem o grau de ligação, geralmente há apenas um pequeno efeito da concentração do acelerador no tempo de queima. A cura do acelerador de enxofre é mais eficiente quando ativadores de óxido de zinco e ácido esteárico são adicionados a mistura. Estes aditivos se combinam para criar íons de zinco solúveis que ativam reações intermediárias envolvidas na formação de ligações cruzadas.

Para determinar o ponto de cura do elastômero é usado um processo chamado reometria de torque. A mistura do elastômero é colocada em um reômetro de torque, onde se analisa o

ponto ótimo de vulcanização da mistura a ser analisada. A temperatura interna e o torque aplicado na mistura são controlados. O equipamento ou reômetro padronizado mais popularmente para esse tipo de análise segue a norma ISO 3417. Outros equipamentos também podem ser encontrados seguindo a norma ISO 6502 (Gent, 2012).

A curva reométrica apresenta parâmetros de processos da mistura do elastômero e por conseguinte parâmetro para o processo de cura. Onde é possível obter o ponto ótimo e a velocidade de vulcanização do elastômero testado. A partir desse ponto ótimo, o elastômero pode alcançar três características: escoamento (aumento lento da rigidez do elastômero), estável (estabilidade da rigidez) e reversão (onde as ligações começam a serem quebradas e se inicia o processo de degradação do material).

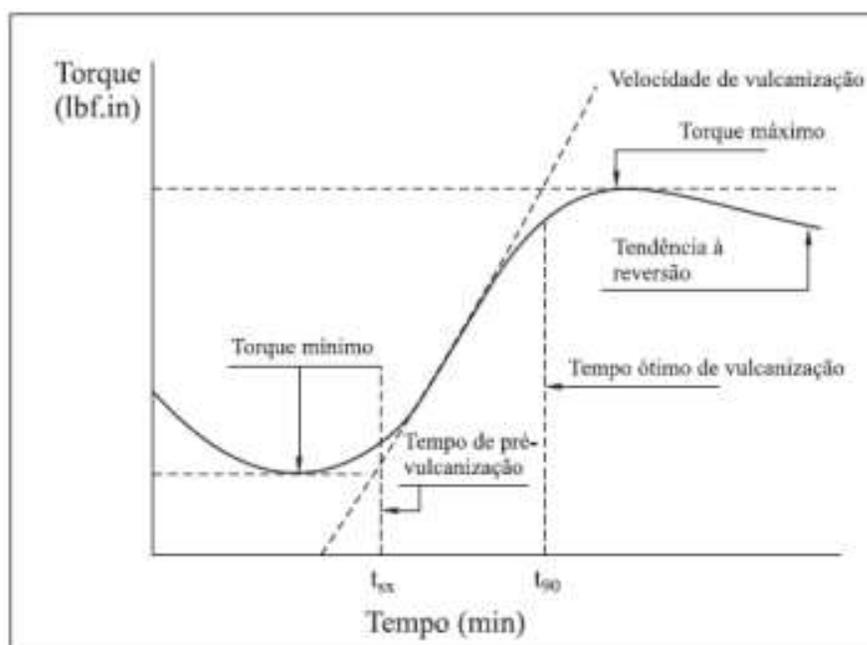


Figura 50: Curva reométrica de uma mistura genérica de elastômero (Rocha et al., 2003).

E.3 Ruído, Vibração e Aspreza (NVH – Noise, Vibration and Harshness)

O desafio dos engenheiros automotivos, considerando as restrições de custo e o tempo durante a fase de desenvolvimento do produto, é conciliar as características do produto com a percepção dos clientes. Ruído e conforto dos ocupantes são alguns dos itens importantes na decisão de compra de um pneu ou veículo. Tais parâmetros são uma vantagem competitiva de

mercado. Não é raro os motoristas passarem muitas horas dentro de um veículo, então parece lógico que os fabricantes de pneus e automóveis se preocupem com o conforto de motoristas e passageiros, para manter sua saúde e condição física em rodovias e em grandes centros urbanos (KUBO et al., 2007). Atualmente, quando um cliente procura por pneus novos, há alguns fatores que pesam em sua decisão de compra, como por exemplo o conforto, que pode ser sonoro ou tátil. Constantemente o nível de exigência está aumentando, com os clientes esperando mais quilometragem dos seus pneus com os mesmos níveis de conforto e ruído, portanto, há uma necessidade de grandes investimentos em pesquisa e desenvolvimento de compostos de elastômeros que forneçam melhores resultados sem encarecer o produto final.

Métodos de avaliações objetivas são importantes ferramentas no desenvolvimento de pneus visando um melhor ambiente para os ocupantes do veículo. Estes métodos experimentais devem apresentar repetibilidade e uma boa correlação com opiniões subjetivas. O *NVH* (ruído, vibração e aspereza), é a área que estuda o ruído e conforto do pneu. A diferença de cada critério está na faixa de frequência analisada, 0 a 20 Hz vibração, 20 a 100 Hz aspereza e acima de 100 Hz o ruído. Nas faixas de frequências apresentadas, existem alguns critérios avaliados com suas frequências específicas, tanto para o ruído, quanto para o conforto. A banda de rodagem tem maior influência nos critérios de ruído do piso liso, comumente conhecidos como: ruído de rolagem ou *Pattern Noise*, avaliado na faixa de frequência de 700 a 1500 Hz e ruído de alta frequência ou *Tread Shaa* de 500 a 4000 Hz (ISO 2631, 1974). Na vibração e aspereza, são analisadas as acelerações verticais, que dão características a percepção subjetiva sensível ao ser humano. Esses critérios são analisados nas faixas de frequências com base na ISO 2631. Essas faixas de frequências sensíveis no corpo humano estão divididos da seguinte forma: cabeça 20 Hz, peito 10 a 50 Hz, estômago 4 a 8 Hz, área pélvica e espinha de 10 a 12 Hz. Os critérios subjetivos avaliados, são normalmente conhecidos como: absorção de impacto, tempo de amortecimento, tremulação de cabine e aspereza do pavimento.

A ressonância de Helmholtz, é um fenômeno que ocorre quando o ar passa por uma cavidade, e por consequência ressoa, apresentando variações de tons. O volume de ar em uma cavidade ou sulco do pneu, atuará como uma mola ressoando entre a cavidade da banda de rodagem e o ar externo. Na passagem de ar no processo de rolagem dos pneus, o ar é retido nos sulcos da banda de rodagem e comprimido em pequenos vazios entre a banda e o pavimento. O ruído gerado é consequência da ejeção do ar para a atmosfera no momento em que o pneu perde o contato com o solo ao girar. Devido à alta velocidade dos jatos de ar criados por este processo, o fluxo de ar pode ser um grande contribuinte para o ruído irradiado. A colisão entre os blocos dos pneus e o pavimento da estrada, provocam a vibração da banda de rodagem. Ao entrar e

sair em contato com o piso, esse movimento provocará vibrações da banda de rodagem, que é uma das principais fontes de radiação de ruído dos pneus. Durante o movimento de rotação dos pneus e interação da banda de rodagem com a macrotextura da estrada, vibrações são geradas e transmitidas para a carcaça do pneu. A superfície da banda de rodagem e os modos de vibração do ombro do pneu, desempenham um papel importante na geração de ruído de rolamento. Ao falarmos de pneus de caminhões, considera-se a vibração da parede lateral como a principal fonte de ruído. Para pneus de carros de passeio, a pegada do pneu ao solo (em inglês *footprint*), é um dos maiores responsáveis pelo ruído, na parte dianteira e traseira do contato do pneu ao solo. No processo de rotação dos pneus, o pneu sofre uma deflexão até que a pressão de contato se iguale a pressão de ar interna, o piso atua como uma força de empuxo, a parte em contato com o solo excita a parede lateral do pneu e irradia o som diretamente para fora, também a área da superfície do piso que vibra imediatamente antes e depois do contato. O ruído de rolagem dos pneus é afetado por alguns fatores como: construção do pneu, desenho da banda de rodagem, velocidade do veículo, carga do veículo, pressão de inflação dos pneus, superfície do pavimento, cambagem e alinhamento do veículo. No entanto, os mais importantes são: o desenho da banda de rodagem e as superfícies do pavimento.

A dinâmica vertical estuda o comportamento do veículo e seus passageiros quando eles são submetidos a excitações. Estas excitações podem ser externas vindas do pavimento ou internas provenientes da roda, motor e transmissão. A dinâmica vertical é comumente conhecida na indústria automotiva como *ride*. Assim como os pneus, a suspensão também desempenha um papel fundamental nas características de isolamento de vibrações do chassi. O veículo é um sistema dinâmico que transforma o sinal de excitação dos diferentes tipos de pisos e pavimentos em outros sinais de vibração nas superfícies do veículo, com as quais o motorista está em contato, tal parâmetro é conhecido em inglês como *ride environment*. Apesar dos perfis de pistas serem as principais fontes de excitação ao se tratar de *ride*, existem outras fontes significativas de vibrações sentidas no interior do veículo, como as excitações de desbalanceamento e excentricidade dos conjuntos roda-pneu, e as excitações do conjunto *power-train* (motor e transmissão) e cardam quando falamos de caminhões e ônibus (Gillespie, 1992).

O ser humano é outro sistema físico com complexidade muito maior, que através dos sinais de vibrações percebidas no interior do veículo (*ride environment*) durante as avaliações subjetivas, de suas características físicas e seu estado psicológico, obtém sensações relativas a conforto (*ride sensation*) durante a utilização do veículo. A complexidade desse último sistema dificulta o estabelecimento de métricas precisas que quantifiquem a influência do *ride*

environment na avaliação subjetiva. A definição de métricas foi baseada não só em resultados apresentados em literatura, mas também em opiniões de profissionais avaliadores de veículos, com relação a alterações de conforto do veículo a partir da alteração de suas características dinâmicas (Persegum, 2005).

Na busca da padronização da avaliação subjetiva, fez-se necessário padronizar a escala de graduação para a avaliação subjetiva de *ride* (SAE J1060 & J1441).

Tabela 19: Escala de graduação (Lindén, 2003).

Escala de Graduação										
Pontuação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Avaliação do veículo	Falhas com alto risco ou pane	Não aceitável; reclamações de clientes certamente ocorrerão		Desconfortável, incômodo; cliente provavelmente reclamará		Melhoramentos são necessários; reclamações de clientes críticos são esperadas		Bom, até muito bom; mesmo de clientes críticos quase não são esperadas reclamações		Excelente; nenhum tipo de deficiência
	Não aceitável			Limite entre aceitável e não aceitável		Aceitável				
				Objecionável	Requer melhorias	Médio	Leve	Muito leve	Traços	Não percebido

APÊNDICE F – Algoritmo de Mínimos Quadrados

```

close all
clc
clear
format long

%% Dados de entrada

nome = 'Padrao Raw_Data5.xlsx'; % Nome do arquivo em excel que os dados
estão salvos
Dados = xlsread(nome, 'Plotar');

km = [];
td = []; % td = tread depth (profundidade do sulco do pneu)

while ~isempty(Dados)
    km = [km;Dados(Dados==Dados(1),1)];
    td = [td;Dados(Dados==Dados(1),2)];
    Dados(Dados==Dados(1), :) = [];
end

%% Após plotar os pontos, o modelo escolhido foi o Exponencial
% Modelo:  $y = b^x + a$ 

x = km;
y = td;

% Erro alfa
alfa = 0.05;

% Parâmetros estimados (estimador das EEs)
g = fminsearch(@(g) Projeto_Mr(g,x,y), [6 0]);
g = g';
p = length(g);

% Parâmetros estimados (estimador Exponencial)
g1 = fminsearch(@(g1) Projeto_Me(g1,x,y), [40 0]);
g1 = g1';
p = length(g1);

% Curva estimada (exponencial)
ye = g1(1)*exp(x*g1(2));

% Reta estimada
yr = g(1)+g(2)*km;

% Estimador da variância
sig2 = sum((y-ye).^2)/(length(x)-p);

% Intervalos de confiança
percent = 0.1;
dg = percent*g;

XX(:,1) = ((g(1)+dg(1)).*(exp(g(2).*x)))-(g(1).*(exp(g(2).*x)))/dg(1));

```

```

XX(:,2) = (g(1).*(exp((g(2)+dg(2)).*x)))-(g(1).*(exp(g(2).*x))./dg(2);

% Covariância
n = length(x);
Xm = mean(x);
C=inv(XX'*XX);

IC0 = [g1(1,1)+tinv(alfa/2,n-2)*sqrt(sig2*(1/p+Xm^2/sum((x-Xm).^2))
g1(1,1)-tinv(alfa/2,n-2)*sqrt(sig2*(1/p+Xm^2/sum((x-Xm).^2))];

IC1 = [g1(2,1)+tinv(alfa/2,n-2)*sqrt((sig2)^2./sum((x-Xm).^2)) g1(2,1)-
tinv(alfa/2,n-2)*sqrt((sig2)^2./sum((x-Xm).^2))];

ICsig2 = [sum((y-ye).^2)/chi2inv(alfa/2,length(x)-p) sum((y-
ye).^2)/chi2inv(1-alfa/2,length(x)-p)];

% intervalos de confiança da reta
Xm = mean(km);
X = km;
ICreta0 = g(1) + [tinv(alfa/2,n-2) tinv(1-alfa/2,n-
2)]*sqrt(sig2*(1/n+Xm^2/sum((X-Xm).^2)));
ICreta1 = g(2) + [tinv(alfa/2,n-2) tinv(1-alfa/2,n-2)]*sqrt(sig2/sum((X-
Xm).^2));

% Saída de resultados
disp('Valor de a =')
disp(g(1))
% disp('Intervalo de confiança de a')
% disp([IC(1,1) IC(1,2)])
disp('Valor de b =')
disp(g(2))
% disp('Intervalo de confiança de b')
% disp([IC(2,1) IC(2,2)])
disp('Estimador variância =')
disp(sig2)
disp('Intervalo de confiança da variância')
disp(ICsig2)

Vector=size(km);
% Vector=size(km)-4;

% Estimativa da vida útil do pneu
di = 0:10:150000; % distância percorrida [km]

p1ee = y(x(1)==x); % Primeiro ponto da extrapolação
p1km = x(1); % km de medição do primeiro ponto
p2ee = y(x(Vector(1))==x); % Segundo ponto da extrapolação
p2km = x(Vector(1)); % km de medição do segundo ponto

P1ee = mean(p1ee);
P2ee = mean(p2ee);

% PEEy = mean(td(25:28)) ; % altura que eu quero estimar twi
PEEy = 3.2;
PEEx = (p2km-p1km)*(P1ee-PEEy)/(P1ee-P2ee);
PEEy = round(PEEy,1);

eex = [p1km p2km PEEx];
eey = [P1ee P2ee PEEy];

```

```

for n=1:length(di)
    d(:,n) = g1(1).*exp(di(n).*g1(2));
    ydi(n) = (IC0(1)*exp(di(n)* IC1(1)));
    yds(n) = (IC0(2)*exp(di(n)* IC1(2)));
    twi(:,n) = PEEy; % twi
    re(:,n) = g(1)+g(2)*di(n);
    rei(n) = ICreta0(1)+ICreta1(1).*di(n);
    res(n) = ICreta0(2)+ICreta1(2).*di(n);
end

cont = 1;
kma = x;
b_da = y;

while size(kma,1)>0
    KM(cont,1) = kma(1);
    B_D(cont,1) = mean( b_da( kma==KM(cont) ) );
    b_da(kma==KM(cont)) = [];
    kma(kma==KM(cont)) = [];
    cont = cont+1;
end

R = corr(B_D,g(1)*exp(KM*g(2)));

disp('Correlação da curva exponencial')
disp(R)

%%
xe = 1:10:150000;
ye = g1(1)*exp(xe*g1(2));
fig = figure();
fig.Units = 'centimeters';
fig.Position = [10 5 15 12];
plot(x, y, 'k *') % plota os dados reais
hold on
plot(xe,ye,'b') % plota o ajuste exponencial
axis([0 150000 0 9])
title('Vida Útil Estimada')
xlabel('Distância Percorrida [km]')
ylabel('Profundidade do Sulco [mm]')
plot(di, re(1,:), 'b') % plota o ajuste linear
plot(eex,eey,'k') % plota a extrapolação EE
plot(di, twi, '-- m') % plota o limite do TWI
plot(di, ydi, '-- r') % plota os intervalos inferiores e superiores
plot(di, yds, '-- k') % plota os intervalos inferiores e superiores
legend('Dados coletados EE 30000km','Ajuste Linear','Ajuste
exponencial','Extrapolação EE','Limite do desgaste','Limite
Inferior','Limite Superior')
grid on

hmax = max(td); % Altura maxima,
hmin = 1.6; % Altura minima, TWI

GIF = figure;
axis tight manual % this ensures that getframe() returns a consistent size
h_km = km;

for t = 1:16:length(h_km)
    in = [];
    in = (td(h_km(1)==km)-hmin)/(hmax-hmin);

```

```

n = length(in);
in = [mean(in(1:5:n)) mean(in(2:5:n)) mean(in(3:5:n)) mean(in(4:5:n))
mean(in(5:5:n))];
footprint(in)
h_km(h_km==h_km(1),:) = [];
% ----- PARAR AQUI -----
% ----- PARAR AQUI -----
pause(1)
drawnow

%% Fazer a GIF
filename = 'EstimativaTW.gif';
% Capture the plot as an image
frame = getframe(GIF);
im = frame2im(frame);
[imind,cm] = rgb2ind(im,256);
% Write to the GIF File
if t == 1
    imwrite(imind,cm,filename,'gif','Loopcount',inf);
else
    imwrite(imind,cm,filename,'gif','WriteMode','append');
end
end

%% Plot dados combinados

Dados1 = xlsread(nome,'Plotar1');
km1 = [];
b_d1 = [];

while ~isempty(Dados1)
    km1 = [km1;Dados1(Dados1==Dados1(1),1)];
    b_d1 = [b_d1;Dados1(Dados1==Dados1(1),2)];
    Dados1(Dados1==Dados1(1),:) = [];
end

x = km1;
y = b_d1;
g = fminsearch(@(g) Projeto_Me(g,x,y),[6 0]);
for n=1:length(di)
    d1(:,n) = g(1)*exp(-di(n)*g(2));
end

figure()
plot(km, td, 'k *') % plota os dados reais
hold on
plot(di,d,'b') % plota o ajuste exponencial
axis([0 150000 0 9])
title('Vida Útil Estimada')
xlabel('Distância Percorrida [km]')
ylabel('Profundidade do Sulco [mm]')
plot(di, re(1,:), 'g') % plota o ajuste linear
plot(eex,eey,'k') % plota a extrapolação EE
plot(di, twi, '-- m') % plota o limete do TWI
plot(di, ydi, '-- c') % plota os intervalos inferiores e superiores
plot(di, yds, '-- r') % plota os intervalos inferiores e superiores
legend('Dados coletados','Ajuste exponencial','Ajuste
linear','Extrapolação EE','Limite do desgaste','Limite Inferior','Limite
Superior')
grid on

```

```

%%
figure()
plot (km, td, 'k *')      % plota os dados reais
hold on
plot (km1, b_d1, 'm *')  % plota os dados reais
plot (di,d,'b')         % plota o ajuste exponencial
axis ([0 150000 0 9])
title ('Vida Útil Estimada')
xlabel ('Distância Percorrida [km]')
ylabel ('Profundidade do Sulco [mm]')
plot (di, re(1,:), 'g')  % plota o ajuste linear
plot(eex,eey,'k')       % plota a extrapolação EE
plot (di, twi, '-- m')  % plota o limite do TWI
plot (di, ydi, '-- c')  % plota os intervalos inferiores e superiores
plot (di, yds, '-- r')  % plota os intervalos inferiores e superiores
legend ('Dados coletados EE', 'Dados coletados MP', 'Ajuste
exponencial', 'Ajuste linear', 'Extrapolação EE', 'Limite do desgaste', 'Limite
Inferior', 'Limite Superior')
grid on

%%
load('Mv.mat')
ye = g1(1)*exp(xe*g1(2));
figure()
plot (x, y, 'k *')      % plota os dados reais
hold on
plot (xe,ye,'b')       % plota o ajuste exponencial
axis ([0 150000 0 9])
plot(xMv,yMv)
title ('Vida Útil Estimada')
xlabel ('Distância Percorrida [km]')
ylabel ('Profundidade do Sulco [mm]')
plot(eex,eey,'c')      % plota a extrapolação EE
plot (di, twi, '-- m')  % plota o limite do TWI
plot (di, ydi, '-- c')  % plota os intervalos inferiores e superiores
plot (di, yds, '-- r')  % plota os intervalos inferiores e superiores
legend ('Dados coletados', 'Ajuste exponencial MMQ', 'Ajuste exponencial
Mv', 'Extrapolação EE', 'Limite do desgaste', 'Limite Inferior', 'Limite
Superior')
grid on

```

APÊNDICE G – Algoritmo de Máxima Verossimilhança

```

close all
clear
clc
format long

%% Dados de entrada

nome = 'Padrao Raw_Data5.xlsx'; % Nome do arquivo em excel que os dados
estão salvos
Dados = xlsread(nome, 'Plotar');

km = [];
td = []; % td = tread depth (profundidade do sulco do pneu)

while ~isempty(Dados)
    km = [km;Dados(Dados==Dados(1),1)];
    td = [td;Dados(Dados==Dados(1),2)];
    Dados(Dados==Dados(1),:) = [];
end

%% Plot dados combinados

Dados1 = xlsread(nome, 'Plotar1');
km1 = [];
td1 = [];

while ~isempty(Dados1)
    km1 = [km1;Dados1(Dados1==Dados1(1),1)];
    td1 = [td1;Dados1(Dados1==Dados1(1),2)];
    Dados1(Dados1==Dados1(1),:) = [];
end

x2 = km1;
y2 = td1;

%% Após plotar os pontos, o modelo escolhido foi o Exponencial
% Modelo:  $y = a \cdot \exp(x \cdot b) + e$ 

x = km;
y = td;

% Erro alfa
alfa = 0.05;

% Parâmetros estimados (estimador das EEs)
qe = fminsearch(@(qe) Projeto_Vr(qe,x,y), [-1 6.45 6]);
qe = qe';
p = length(qe);

% Parâmetros estimados (estimador Exponencial) (30000km)
qe1 = fminsearch(@(qe1) Projeto_Ve(qe1,x,y), [20 -0.01 6]); %[40 -0.00001
20.06]
qe1 = qe1';
p = length(qe1);

```

```

% Parâmetros estimados (estimador Exponencial) (12000km)
qe2 = fminsearch(@(qe2) Projeto_Ve(qe2,x2,y2),[25 -0.01 8]);
qe2 = qe2';
p2 = length(qe2);

% Variáveis
a = qe1(1);
b = qe1(2);
s = qe1(3);
n = length(y);

% Curva estimada
re = a*exp(x*b);

% Reta estimada
yr = qe(2)+qe(1)*km;

% Matriz de Covariâncias (30000km)
mc1 = sum(-(exp(b.*x)).^2)/s;
mc2 = sum(x.*exp(b.*x).*(y-2*a*exp(b.*x)))/s;
mc3 = sum(exp(b.*x).*(a*exp(b.*x)-y))/s;
mc4 = mc2;
mc5 = sum((-a.*(x.^2).*exp(b.*x).*(2*a*exp(b.*x)-y)))/s;
mc6 = sum(a*x.*exp(b.*x).*(a*exp(b.*x)-y))/s^2;
mc7 = mc3;
mc8 = mc6;
mc9 = sum((s*n)-2*(y-a*exp(b.*x)).^2)/(2*s^3);

mc = -[mc1 mc4 mc7; mc2 mc5 mc8; mc3 mc6 mc9];
MC = abs(inv(mc));

% Matriz de Covariâncias (12000km)
MC1 = sum(-(exp(qe2(2).*x2)).^2)/qe2(3);
MC2 = sum(x2.*exp(qe2(2).*x2).*(y2-2*qe2(1)*exp(qe2(2).*x2)))/qe2(3);
MC3 = sum(exp(qe2(2).*x2).*(qe2(1)*exp(qe2(2).*x2)-y2))/qe2(3);
MC4 = MC2;
MC5 = sum((-qe2(1).*(x2.^2).*exp(qe2(2).*x2).*(2*qe2(1)*exp(qe2(2).*x2)-y2)))/qe2(3);
MC6 = sum(qe2(1)*x2.*exp(qe2(2).*x2).*(qe2(1)*exp(qe2(2).*x2)-y2))/qe2(3)^2;
MC7 = MC3;
MC8 = MC6;
MC9 = sum((qe2(3)*n)-2*(y2-qe2(1)*exp(qe2(2).*x2)).^2)/(2*qe2(3)^3);

MC_2 = -[MC1 MC4 MC7; MC2 MC5 MC8; MC3 MC6 MC9];
MC12 = abs(inv(MC_2));

% Estimador da variância
sig2 = sum((y-yr).^2)/(n-2);

% intervalos de confiança
Xm = mean(km);
X = km;
ICreta0 = qe(2) + [tinv(alfa/2,n-2) tinv(1-alfa/2,n-2)]*sqrt(sig2*(1/n+Xm^2/sum((X-Xm).^2)));
ICreta1 = qe(1) + [tinv(alfa/2,n-2) tinv(1-alfa/2,n-2)]*sqrt(sig2/sum((X-Xm).^2));

```

```

% Intervalos de confiança da variância (30000km)
w = exp((tinv(1-alfa/2,n-2)*sqrt(diag(MC)))/qe1);
ICs = [qe1./w qe1.*w];

% Intervalos de confiança da variância (12000km)
w2 = exp((tinv(1-alfa/2,n-2)*sqrt(diag(MC12)))/qe2);
ICs2 = [qe2./w2 qe2.*w2];

% Vector=size(km);
Vector=size(km)-4;
Vector=size(km1)-4;

% Estimativa da vida útil do pneu
di = 0:10:50000; % distância percorrida [km]

plee = td(km(1)==km); % Primeiro ponto da extrapolação
p1km = km(1); % km de medição do primeiro ponto
p2ee = td(km(Vector(1))==km); % Segundo ponto da extrapolação
p2km = km(Vector(1)); % km de medição do segundo ponto

Plee = mean(plee);
P2ee = mean(p2ee);

PEEY = mean(td(25:28)) ; % % altura que eu quero estimar twi
% PEEY = 1.6;
PEEX = (p2km-p1km)*(Plee-PEEY)/(Plee-P2ee);
PEEY = round(PEEY,1);

eex = [p1km p2km PEEX];
eey = [Plee P2ee PEEY];

for n=1:length(di)
    d(:,n) = (qe1(1)*exp(di(n)*qe1(2)));
    d2(:,n) = (qe2(1)*exp(di(n)*qe2(2)));
    ydi(n) = (real(ICs(1,1))*exp(di(n)* real(ICs(2,1))));
    yds(n) = (real(ICs(1,2))*exp(di(n)* real(ICs(2,2))));
    ydi2(n) = (real(ICs2(1,1))*exp(di(n)* real(ICs2(2,1))));
    yds2(n) = (real(ICs2(1,2))*exp(di(n)* real(ICs2(2,2))));
    twi(:,n) = PEEY; % twi
    re(:,n) = qe(2)+qe(1)*di(n);
    rei(n) = ICreta0(1)+ICreta1(1).*di(n);
    res(n) = ICreta0(2)+ICreta1(2).*di(n);
end

cont = 1;
kma = x;
b_da = y;

while size(kma,1)>0
    KM(cont,1) = kma(1);
    B_D(cont,1) = mean( b_da( kma==KM(cont) ) );
    b_da(kma==KM(cont)) = [];
    kma(kma==KM(cont)) = [];
    cont = cont+1;
end

R = corr(B_D,qe1(1)*exp(KM*qe1(2)));

disp('Correlação da curva exponencial');

```

```

disp(R)

%%
fig = figure();
fig.Units = 'centimeters';
fig.Position = [10 5 15 12];
plot (km, td, 'k *') % plota os dados reais
axis ([0 150000 0 9])
hold on
plot (di,d,'b') % plota o ajuste exponencial
title ('Vida Útil Estimada')
xlabel ('Distância Percorrida [km]')
ylabel ('Profundidade do Sulco [mm]')
plot (di, re(1,:), 'g') % plota o ajuste linear
plot(eex,eey,'k') % plota a extrapolação EE
plot (di, twi, '-- m') % plota o limite do TWI
% plot (di, rei, '-. r') % plota os intervalos inferiores e superiores
% plot (di, res, '-. k') % plota os intervalos inferiores e superiores
plot (di, ydi, '-. r') % plota os intervalos inferiores e superiores
plot (di, yds, '-. k') % plota os intervalos inferiores e superiores
legend ('Dados coletados EE 30000km', 'Ajuste Exponencial', 'Ajuste
Linear', 'Extrapolação EE', 'Limite do desgaste (TWI)', 'Intervalo
inferior', 'Intervalo superior')
grid on

hmax = max(td); % Altura maxima,
hmin = 1.6; % Altura minima, TWI
xMv = di;
yMv = d;
save('Mv', 'xMv', 'yMv');

GIF = figure;
axis tight manual % this ensures that getframe() returns a consistent size
h_km = km;

for t = 1:16:length(h_km)
    in = [];
    in = (td(h_km(1)==km)-hmin)/(hmax-hmin);
    n = length(in);
    in = [mean(in(1:5:n)) mean(in(2:5:n)) mean(in(3:5:n)) mean(in(4:5:n))
mean(in(5:5:n))];
    footprint(in)
    h_km(h_km==h_km(1),:) = [];
    % ----- PARAR AQUI -----
    % ----- PARAR AQUI -----
    pause(1)
    drawnow
%% Fazer a GIF
filename = 'EstimativaTW.gif';
% Capture the plot as an image
frame = getframe(GIF);
im = frame2im(frame);
[ind,cm] = rgb2ind(im,256);
% Write to the GIF File
    if t == 1
        imwrite(ind,cm,filename,'gif', 'Loopcount',inf);
    else
        imwrite(ind,cm,filename,'gif','WriteMode','append');
    end
end

```

```

end

figure()
plot (km, td, 'k *') % plota os dados reais
hold on
plot (di,d,'b')      % plota o ajuste exponencial
title ('Vida Útil Estimada')
xlabel ('Distância Percorrida [km]')
ylabel ('Profundidade do Sulco [mm]')
plot (di, re(1,:), 'g') % plota o ajuste linear
plot(eex,eey,'k')    % plota a extrapolação EE
plot (di, twi, '-- m') % plota o limete do TWI
plot (di, ydi, '-. r') % plota os intervalos inferiores e superiores
plot (di, yds, '-. k') % plota os intervalos inferiores e superiores
legend ('Dados coletados EE 30000km','Ajuste exponencial','Ajuste
linear','Extrapolação EE','Limite do desgaste (TWI)','Intervalo
inferior','Intervalo superior')
grid on

%%
figure()
plot (km, td, 'k *') % plota os dados reais
hold on
plot (km1, td1, 'm *') % plota os dados reais
plot (di,d,'b')      % plota o ajuste exponencial
title ('Vida Útil Estimada')
xlabel ('Distância Percorrida [km]')
ylabel ('Profundidade do Sulco [mm]')
plot (di, d2, 'c') % plota o ajuste exponencial
plot(eex,eey,'k')    % plota a extrapolação EE
plot (di, twi, '-- m') % plota o limete do TWI
plot (di, ydi, '-. k') % plota os intervalos inferiores e superiores
30000km
plot (di, yds, '-. k') % plota os intervalos inferiores e superiores
30000km
plot (di, ydi2, '-. r') % plota os intervalos inferiores e superiores
12000km
plot (di, yds2, '-. r') % plota os intervalos inferiores e superiores
12000km
legend ('Dados coletados EE 30000km','Dados coletados MP 12000km','Ajuste
exponencial 30000km','Ajuste exponencial 12000km','Extrapolação EE','Limite
do desgaste (TWI)','Intervalo inferior 30000 km','Intervalo superior 30000
km','Intervalo inferior 12000 km','Intervalo superior 12000 km')
grid on

```