



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

RODRIGO XAVIER LEANDRO

**INFLUÊNCIA DA TEXTURA DOS PAVIMENTOS E DIFERENTES TIPOS DE
PNEUS NA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO**

**Recife
2018**

RODRIGO XAVIER LEANDRO

**INFLUÊNCIA DA TEXTURA DOS PAVIMENTOS E DIFERENTES TIPOS DE
PNEUS NA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Fabricação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Flávio José da Silva.

Recife
2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

L437i Leandro, Rodrigo Xavier.

Influência da textura dos pavimentos e diferentes tipos de pneus na resistência ao rolamento / Rodrigo Xavier Leandro - 2018.
71folhas, Il.; Tabs.; Abr. e Sigl.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Resistência ao rolamento. 3. Consumo de combustível. 4. Pavimento. 5. Textura. I. Silva, Flávio José da. (Orientador). II.Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-20

RODRIGO XAVIER LEANDRO

**INFLUÊNCIA DA TEXTURA DOS PAVIMENTOS E DIFERENTES TIPOS DE
PNEUS NA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte integrante dos requisitos parciais para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 17/12/2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Flávio José da Silva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves (examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Bruno Alessandro Silva Guedes de Lima (examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Ao meu orientador, prof. Dr. Flávio José da Silva, que acreditou nas minhas ideias e me guiou com muita paciência durante todo o trabalho.

Aos meus pais, por sempre me mostrarem que a educação é sempre o melhor caminho.

Aos meus irmãos, pelo carinho e incentivo.

À empresa FCA, que me permitiu participar do mestrado, apoiando-me com equipamentos para a realização de testes.

Aos servidores da secretaria do PPGEM, pelas orientações e cordialidade.

Por fim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para que eu pudesse realizar esta conquista.

RESUMO

O setor de transportes no Brasil foi responsável pela emissão de aproximadamente 200 milhões de toneladas de CO₂ em 2017. Esse setor de consumo de energia é um dos poucos onde as emissões ainda permanecem aumentando devido ao rápido crescimento da frota. O melhoramento da eficiência energética da frota de veículos é essencial para a redução das emissões. Uma das forças resistivas ao deslocamento do veículo e, portanto, que influencia o consumo é a resistência ao rolamento, que é uma manifestação das perdas de energia, devidas às deformações sofridas pela superfície de contato do pneu com o pavimento. A resistência ao rolamento não é uma propriedade apenas do pneu, e sim uma interação entre o pneu e o pavimento. Do lado do pavimento, a textura é a característica que mais influencia a resistência ao rolamento. O objetivo geral deste trabalho é avaliar a diferença no consumo de combustível em veículos leves e conseqüentemente o aumento da emissão de gases devido às más condições dos pavimentos e dos diferentes tipos de pneus. Para medir a textura dos pavimentos foi utilizado o método da mancha de areia e foram realizados testes de resistência ao rolamento em bancada no laboratório de *Rolling Resistance* da FCA – Fiat Chrysler Automóveis. O modelo de Willans Line foi utilizado para estimar o consumo de combustível. O método da mancha de areia se mostrou um método adequado para a medição de textura de pavimentos asfálticos. Foi observada uma variação máxima de 460% no nível de textura entre os locais avaliados e essa variação da textura causa uma diferença de até 16,7% no coeficiente de resistência ao rolamento, e um acréscimo médio de 1,0% no consumo de combustível. Entre os pneus que foram testados em bancada, foi observada uma variação de até 16,8% no coeficiente de resistência ao rolamento entre pneus semelhantes, causando um acréscimo de 2,0% no consumo de combustível e conseqüentemente na emissão de gases.

Palavras-chave: Resistência ao rolamento. Consumo de combustível. Pavimento. Textura.

ABSTRACT

The transport sector in Brazil was responsible for the emission of approximately 200 million tons of CO₂ in 2017. This sector of energy consumption is one of the few where emissions are still increasing due to the rapid growth of the fleet. Improving the energy efficiency of the vehicle fleet is essential for the reduction of emissions. One of the forces resistive to the displacement of the vehicle and, therefore, that influences the consumption is the rolling resistance, which is a manifestation of the energy losses, due to the deformations suffered by the contact surface of the tire with the pavement. Rolling resistance is not just a property of the tire, but an interaction between the tire and the pavement. On the pavement side, texture is the feature that most influences rolling resistance. The general objective of this work is to evaluate the difference in fuel consumption in passenger cars and consequently the increase of gas emissions due to bad conditions of pavements and different types of tires. To measure the texture of the pavements, the sand patch method was used, and rolling resistance tests were performed on bench in the laboratory of Rolling Resistance of FCA - Fiat Chrysler Automobiles. The Willans Line model was used to estimate fuel consumption. The sand patch method proved to be a suitable method for the measurement of texture of asphalt pavements. A maximum variation of 460% in the texture level was observed between the evaluated sites and this texture variation causes a difference of up to 16.7% in the coefficient of rolling resistance, and a mean increase of 1.0% in fuel consumption. Among the tires that were bench tested, a variation of up to 16.8% in the coefficient of rolling resistance between similar tires was observed, causing a 2.0% increase in fuel consumption and consequently in the emission of gases.

Keywords: Rolling resistance. Fuel consumption. Pavement. Texture.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Normas SAE e ISO para medição da RR em laboratório	28
Tabela 2 – Condições dos pavimentos das rodovias brasileiras em 2018	37
Tabela 3 – Locais de medição da macrotextura	44
Tabela 4 – Roadwheel Test System 860	46
Tabela 5 – Incertezas padrão do certificado de calibração	51
Tabela 6 – Pneus testados em laboratório	52
Tabela 7 – Dados de entrada para simulação do consumo de combustível	55
Tabela 8 – Resultados do cálculo do C_{RR} a partir dos testes da mancha de areia	56
Tabela 9 – Pneus testados em laboratório através do método do tambor	59
Tabela 10 – Consumo de combustível a partir do C_{RR} obtido pelo método do tambor	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO ₂	Dióxido de carbono
C _{RR}	Coeficiente de resistência ao rolamento
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FENABRAVE	Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores
F _{RR}	Força de resistência ao rolamento
H _s	Altura média da mancha de areia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IRI	<i>International Roughness Index</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MME	Ministério de Minas e Energia
MPD	<i>Mean Profile Depth</i>
MTD	<i>Mean Texture Depth</i>
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem de pneus
RR	Resistência ao rolamento
SAE	<i>Society Automotive Engineers</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	FORÇAS RESISTIVAS AO DESLOCAMENTO DO VEÍCULO	15
3.1.1	Resistência ao rolamento	17
3.1.1.1	Representação física da resistência ao rolamento	18
3.1.1.2	Coeficiente de resistência ao rolamento (C_{RR})	20
3.2	VARIÁVEIS QUE AFETAM A RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO	21
3.2.1	Características do pneu	21
3.2.1.1	Estrutura e composição.....	21
3.2.1.2	Dureza e viscoelasticidade	23
3.2.1.3	Tamanho	25
3.2.1.4	Velocidade.....	25
3.2.1.5	Carga.....	26
3.2.1.6	Pressão interna	26
3.2.1.7	Métodos para medir resistência ao rolamento.....	27
3.2.2	Trabalhos recentes sobre resistência ao rolamento	29
3.2.3	Características do pavimento	30
3.2.3.1	Textura	30
3.2.3.2	Rigidez do pavimento	34
3.2.4	Trabalhos recentes sobre textura de pavimentos	35
3.2.5	Temperatura ambiente	35
3.3	MALHA RODOVIÁRIA E FROTA DE VEÍCULOS AUTOMOTORES	36
3.4	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÃO DE CO_2	38
4	METODOLOGIA	40
4.1	MEDIÇÃO DA TEXTURA ATRAVÉS DO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA.....	40
4.1.1	Materiais utilizados no método da mancha de areia	40
4.1.2	Procedimento para realização do teste da mancha de areia	42
4.1.3	Medições de textura realizadas	43

4.1.4	Incerteza de medição do método de cálculo do C_{RR}	44
4.2	MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DO TAMBOR	44
4.2.1	Equipamento utilizado para a medição da RR em laboratório	45
4.2.2	Procedimento para realização do teste utilizando o método do tambor	47
4.2.3	Incerteza de medição do equipamento	50
4.2.4	Pneus testados em laboratório	52
4.3	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	RESULTADOS DOS TESTES DA MANCHA DE AREIA	56
5.2	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL A PARTIR DA MANCHA DE AREIA	58
5.3	RESULTADOS DOS TESTES UTILIZANDO O MÉTODO DO TAMBOR ..	59
5.4	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL A PARTIR DO MÉTODO DO TAMBOR .	60
5.5	VALIDAÇÃO DO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA	62
6	CONCLUSÕES	64
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, em 2017, o setor de transportes foi responsável por cerca de 46% do total de emissões dos gases de efeito estufa, isso corresponde a nada menos que 200 milhões de toneladas de CO₂ e os veículos de passeio e comerciais leves, são responsáveis por aproximadamente 50% das emissões (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2018).

A frota de automóveis no Brasil cresceu cerca de 96% nos últimos 11 anos e a idade média dos automóveis é de 14 anos. Esses dois fatores, aliados a uma má qualidade das rodovias, contribuem para um aumento do consumo de combustíveis (CNT, 2018).

Segundo uma pesquisa realizada em 2018 pela Confederação Nacional do Transporte - CNT, 107.161 km de rodovias brasileiras foram avaliadas e foi constatado que 51% do total avaliado apresenta algum tipo de problema com relação a qualidade dos pavimentos, obtendo a classificação de regular, ruim ou péssimo.

Os fabricantes de pneus e as montadoras têm trabalhado através de pesquisas de novos materiais (pesquisas protegidas como segredo industrial) e testes de pneus, com a intenção de reduzir a resistência ao rolamento dos pneus uma vez que a indústria automobilística no Brasil se beneficia com redução de impostos a partir de metas de redução de consumo de combustível estipuladas pelo Governo (INOVAR-AUTO, 2012). Por outro lado, as características das superfícies dos pavimentos têm sido negligenciadas mesmo na fase de projeto, mas principalmente na manutenção das rodovias brasileiras.

Pneus de baixa resistência ao rolamento, também chamados de pneus verdes, começaram a ser estudados pela Pirelli na década de 80. Na década de 90 a Michelin apresentou uma nova linha de pneus de baixa resistência ao rolamento (BARBOSA, 2013). Segundo a Michelin (2003), pneus verdes podem diminuir o consumo de combustível de um veículo de passageiros em até 8%, conseqüentemente, reduzindo a emissão de gases poluentes.

Os veículos consomem combustível para vencer as forças contrárias ao seu deslocamento. Segundo Holmberg (2012), em média 17% consumo é para vencer o atrito motor/transmissão, 5% o arrasto do ar, 5% frenagem, 11% resistência ao rolamento dos pneus e 62% é energia desperdiçada em forma de calor. Uma das principais forças contrárias é a força de resistência ao rolamento, o que impacta

diretamente no consumo de combustível e conseqüentemente na emissão de gases poluentes. Para os veículos de passageiros equipados com motores de combustão interna (pouco eficientes), a energia consumida pela resistência ao rolamento corresponde a cerca de 11% do total de energia fornecida pelo combustível, segundo Holmberg (2012).

As características dos compostos dos pneus e as características das superfícies dos pavimentos são muito importantes do ponto de vista econômico e ambiental. A resistência ao rolamento não é uma propriedade apenas do pneu, e sim uma propriedade sistêmica de interação entre o pneu e o pavimento (SANDBERG, 2011b).

Até o início dos anos 2000, por falta de métodos práticos, era muito difícil mensurar e correlacionar fatores como rugosidade e textura de pavimentos asfálticos, que são dados importantes para a determinação da qualidade do pavimento não apenas no que diz respeito a resistência ao rolamento como também à segurança, ruído e desgaste dos pneus (SANDBERG, 2011b).

Poucos trabalhos no Brasil, por exemplo, Aps (2006), Cardoso (2010) e Bastos (2016) foram publicados até o momento sobre caracterização de textura de pavimento, enquanto que nos Estados Unidos e Europa as discussões estão bem mais adiantadas, onde reboques móveis são utilizados para a medir a textura dos pavimentos e fazer a medição direta da resistência ao rolamento e modelos matemáticos cada vez mais refinados são apresentados para o cálculo indireto da resistência ao rolamento através de uma relação com a textura do pavimento (HOOGHWERFF, 2013; ANDERSEN et al., 2015).

Modelos matemáticos mais recentes são utilizados para estimar a resistência ao rolamento a partir de dados de textura e também estimar o consumo de combustível a partir da resistência ao rolamento (VAN HAASTER et al., 2015; HOOGHWERFF, 2013). Os primeiros modelos para o cálculo da resistência ao rolamento, como por exemplo os apresentados por Sandberg (1997) e Greenwood (2003) não representam mais a realidade por conta da evolução tecnológica que os pneus têm passado ao longo dos anos.

Este estudo permitirá um melhor entendimento de como a textura dos pavimentos asfálticos influencia a resistência ao rolamento dos pneus, o consumo de combustível e, em última análise, a emissão de gases poluentes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho propõe estudar a variação do consumo de combustível e emissão de CO₂ de veículos de passageiro, a partir de modelos matemáticos que correlacionam os dados de textura dos pavimentos e resistência ao rolamento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como decorrência do objetivo geral, os objetivos específicos que norteiam este trabalho são:

- Medir a textura dos pavimentos utilizando o método da mancha de areia.
- Avaliar a resistência ao rolamento, utilizando o modelo descrito por Hooghwerff, a partir de diferentes texturas de pavimento.
- Medir a resistência ao rolamento no laboratório de *rolling Resistance* da Fiat Chrysler Automóveis, utilizando o método do tambor e comparar pneus com características e fabricantes diferentes.
- Comparar os coeficientes de resistência ao rolamento estimados pelo método da mancha de areia e pelo método do tambor.
- Estimar o consumo de combustível a partir de diferentes coeficientes de resistência ao rolamento utilizando o modelo matemático de Willans Line para simulação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

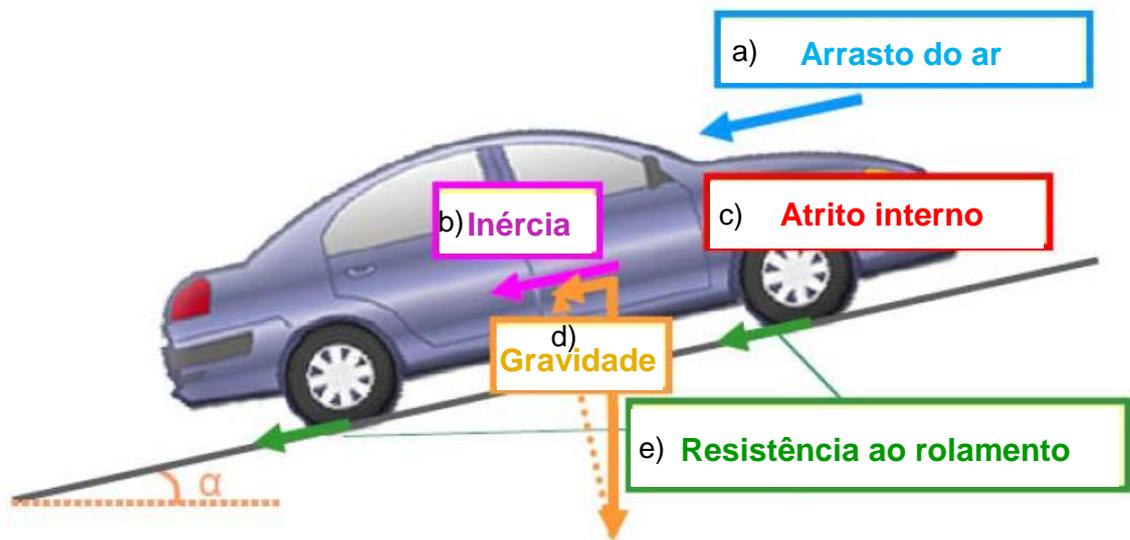
Neste item são abordadas as principais forças resistivas ao movimento de veículos automotivos que levam a um maior consumo de combustível e, conseqüentemente, maior poluição do meio ambiente. É dada ênfase à resistência ao rolamento, às variáveis do sistema pneu/pavimento que afetam o coeficiente de rolamento e, portanto, o consumo de combustível e a emissão de CO₂. São apresentadas as características de pneu, de pavimento, volume da frota de veículos brasileira e modelos para estimar o efeito da resistência ao rolamento pneu/pavimento no consumo e emissão de poluentes.

3.1 FORÇAS RESISTIVAS AO DESLOCAMENTO DO VEÍCULO

Para que um veículo saia do repouso e ganhe velocidade é preciso que a força gerada no motor e transmitida até as rodas, supere o somatório das forças contrárias ao deslocamento do veículo (Figura 1). As principais forças resistivas ao deslocamento de um veículo estão listadas:

- a) Resistência aerodinâmica (arrasto do ar)
- b) Resistência inercial
- c) Resistência mecânica (atrito interno do motor e transmissão)
- d) Resistência gravitacional (aclone)
- e) Resistência ao rolamento

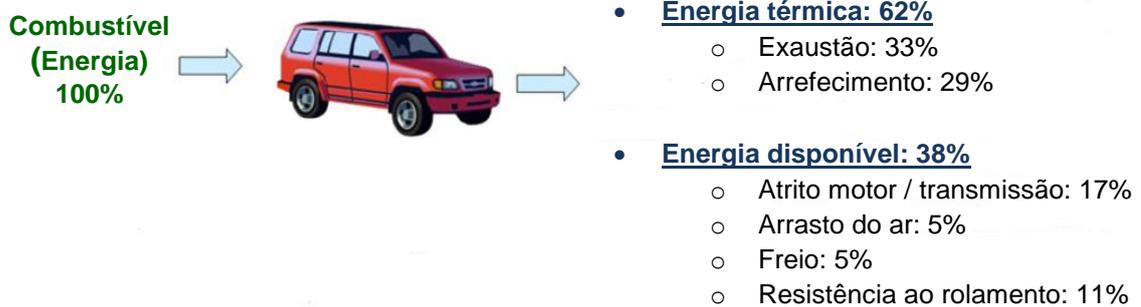
Figura 1 – Forças contrárias ao deslocamento do veículo



Fonte: Sandberg (2011a)

No estudo realizado por Holmberg et al. (2012), do total de energia na forma de combustível consumida por um veículo de passageiros, cerca de 62% é desperdiçada em forma calor através do sistema de arrefecimento (radiador e eletro-ventilador) e dos gases de exaustão (Figura 2). Apenas 38% da energia total consumida é convertida em energia mecânica, sendo que 17% são perdidos em resistência mecânica, também conhecida como força de atrito interno, gerada pelo atrito e inércia dos componentes móveis internos do motor e da caixa de transmissão. O freio se não estiver bem ajustado, também pode gerar atrito entre as pastilhas e o tambor ou disco de freio, contribuindo assim para um aumento da resistência mecânica.

Figura 2 – Dissipação de energia em veículos de passageiros



Fonte: Adaptado de Holmberg et al. (2012)

A eficiência dos motores de combustão interna é muito baixa, apenas 21% da energia são disponíveis para impulsionar o veículo ao longo da estrada. Sendo 5% perdidos nas frenagens (desacelerações) e 5% utilizados para vencer as forças aerodinâmicas (arrasto do ar), que dependem do tamanho e da forma do veículo, ou mais especificamente da sua área frontal e coeficiente de arrasto e também da velocidade de deslocamento. Restam ainda 11% da energia total do combustível que é consumida pela resistência ao rolamento. Esses valores médios consideram um veículo de passageiro viajando com uma velocidade média de 60 km/h em uma estrada plana (HOLMBERG et al., 2012). As forças gravitacionais, só se aplicam quando há uma inclinação na estrada, quanto maior o ângulo de inclinação e a massa do veículo, maior será a força gravitacional. Forças inerciais atuam contra o deslocamento dos veículos durante as acelerações. Como um corpo que está em movimento, tende a permanecer em movimento, a força de inércia atua também durante a desaceleração do veículo. Essa força é muito significativa em tráfegos urbanos por conta das constantes acelerações e desacelerações.

3.1.1 Resistência ao rolamento

De todas as resistências citadas anteriormente, a resistência ao rolamento certamente é a mais difícil de ser entendida e também é a única que sofre influência da textura do pavimento (SANDBERG, 2011a). Para um maior esclarecimento sobre o conceito de resistência ao rolamento algumas definições serão apresentadas a seguir:

Historicamente a resistência ao rolamento tem sido considerada como uma força que se opõe a um pneu que viaja em uma direção particular, porém alguns pesquisadores acham esse conceito insatisfatório (SANDBERG, 2011a).

Gent e Walter (2005) definiram resistência ao rolamento como o esforço necessário para manter um determinado pneu rolando. A resistência ao rolamento inclui perdas de energia mecânica devido ao arrasto aerodinâmico associado ao rolamento, atrito entre o pneu e estrada e entre o pneu e o aro e as perdas de energia ocorrendo dentro da estrutura do pneu.

A definição acima não é a única que correlaciona resistência ao rolamento com perda de energia. Para Schuring (1977) resistência ao rolamento é a energia mecânica convertida em calor por um pneu movendo-se para uma unidade de distância na estrada.

As duas normas mais utilizadas atualmente para testes de medição de resistência ao rolamento em bancada são as SAE J2452:1999 e ISO 28580:2009, definem resistência ao rolamento como perda de energia por distância percorrida.

As propriedades viscoelásticas do pneu devem ser levadas em consideração para melhor entendimento da resistência ao rolamento. Segundo Leal et al. (2012) quando em contato com o solo, o pneu por apresentar em sua composição um material viscoelástico, deforma-se pela carga exercida tornando-se plano na zona de contato, com isso, as camadas de lonas presentes na sua composição se deslocam. As repetidas deformações causam perda de energia devido ao fenômeno de histerese e são dissipadas na forma de calor.

3.1.1.1 Representação física da resistência ao rolamento

Energia não parece ser uma medida física muito prática de ser usada em uma medição de resistência ao rolamento. Por exemplo, para medir a dissipação de calor em um pneu, embora não impossível, parece impraticável.

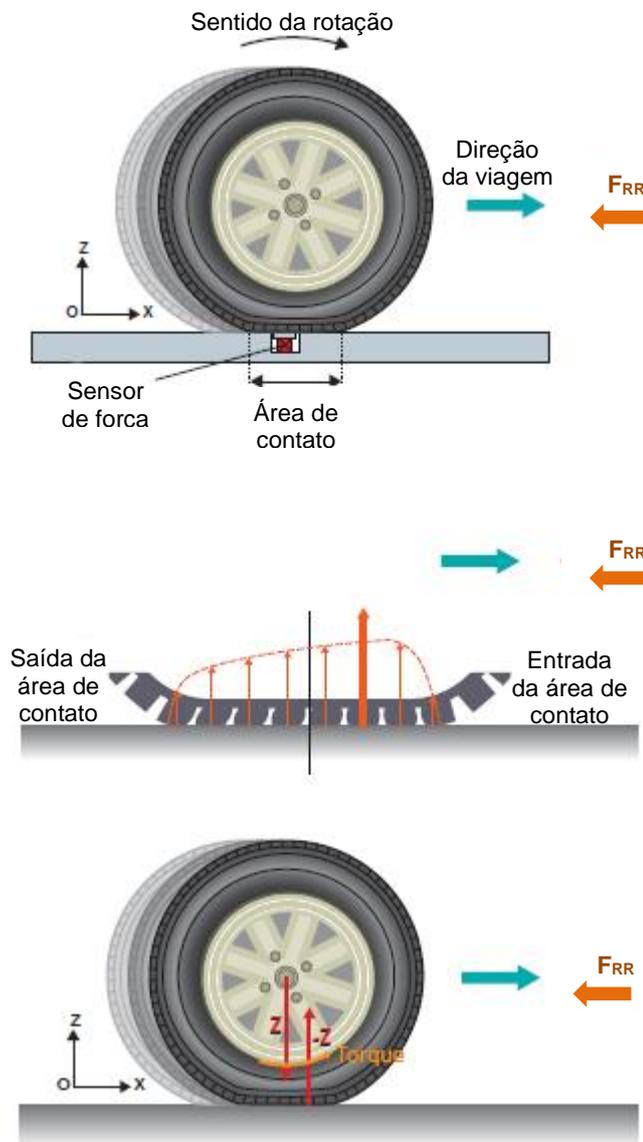
Enquanto uma roda não deformável está em contato com o solo apenas em um ponto em torno de sua circunferência, um pneu para maior segurança e conforto tem uma área em contato com o pavimento. A força de reação do pavimento, portanto, aplica-se a toda a área de contato.

Para Silveira (2011), quando as forças de reação vertical são medidas com um pneu rolando sobre o pavimento, com auxílio de um diagrama que indica a força sobre

uma pequena área elementar ao longo dessa região, pode ser visto que a força normal resultante está deslocada para frente em relação ao centro da região de contato, conforme indicado na Figura 3.

Este deslocamento de forças leva a um torque oposto a rotação da roda. É como se houvesse uma força que resiste ao movimento para a frente da roda. Esta força é a manifestação "mecânica" da perda de energia devido a deformação do pneu na área de contato. É conhecida como a força de resistência ao rolamento (F_{RR}).

Figura 3 – Representação mecânica da força de resistência ao rolamento



Fonte: Michelin (2003)

Neste trabalho consideraremos pavimentos rígidos, ou seja, as deformações dos pavimentos sob um pneu carregado serão desprezadas.

3.1.1.2 Coeficiente de resistência ao rolamento (C_{RR})

Estudos anteriores mostraram uma correlação praticamente linear entre a força de resistência ao rolamento (F_{RR}) e à carga vertical (F_z) aplicada ao pneu. Então, para uma melhor comparação entre os pneus, foi convencionado um coeficiente de resistência ao rolamento (C_{RR}):

$$C_{RR} = F_{RR} / F_z \quad (1)$$

Tanto a força F_{RR} quanto a carga F_z são normalmente expressas em newtons, em conformidade com o sistema internacional de unidades. Então, por definição, C_{RR} é um coeficiente adimensional.

No entanto, a força F_{RR} é frequentemente expressa usando a unidade de quilograma-força (kgf) e carga em tonelada-força (tf). Nesse caso, o coeficiente é expresso em kg / tonelada. A carga F_z também pode ser expressa em quilonewton (kN), assim o coeficiente é expresso em N/kN. O coeficiente ainda pode ser expresso em porcentagem. Um coeficiente de 0,0075 é, portanto, equivalente a um coeficiente de 0,75%, 7,5 kg/t ou 7,5 N/kN. Na indústria, a unidade mais comumente utilizada é a kg/t.

A expressão "7,5 kg/t" significa que se o pneu estiver suportando uma carga de uma tonelada, 7,5 quilogramas-força (cerca de 74 newtons) portanto, precisam ser aplicados para evitar perder velocidade devido à resistência ao rolamento. Para tomar outra ilustração, quando um veículo está sendo conduzido com pneus tendo um coeficiente de resistência ao rolamento de 7,5 kg/t, está usando a mesma quantidade de energia como se estivesse subindo uma inclinação de 0,75% sem resistência ao rolamento (MICHELIN, 2003).

Atualmente, os melhores pneus de automóvel, do ponto de vista energético, possuem coeficiente de resistência ao rolamento $\leq 6,5$ kg/t, avaliados de acordo com a norma ISO 28580, sendo classificados com índice A pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem de pneus – PBE do INMETRO.

3.2 VARIÁVEIS QUE AFETAM A RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

A resistência ao rolamento não é uma propriedade apenas do pneu ou do pavimento, mas sim uma interação entre os dois. Portanto, tanto as características do pneu quanto as características do pavimento podem influenciar a resistência ao rolamento.

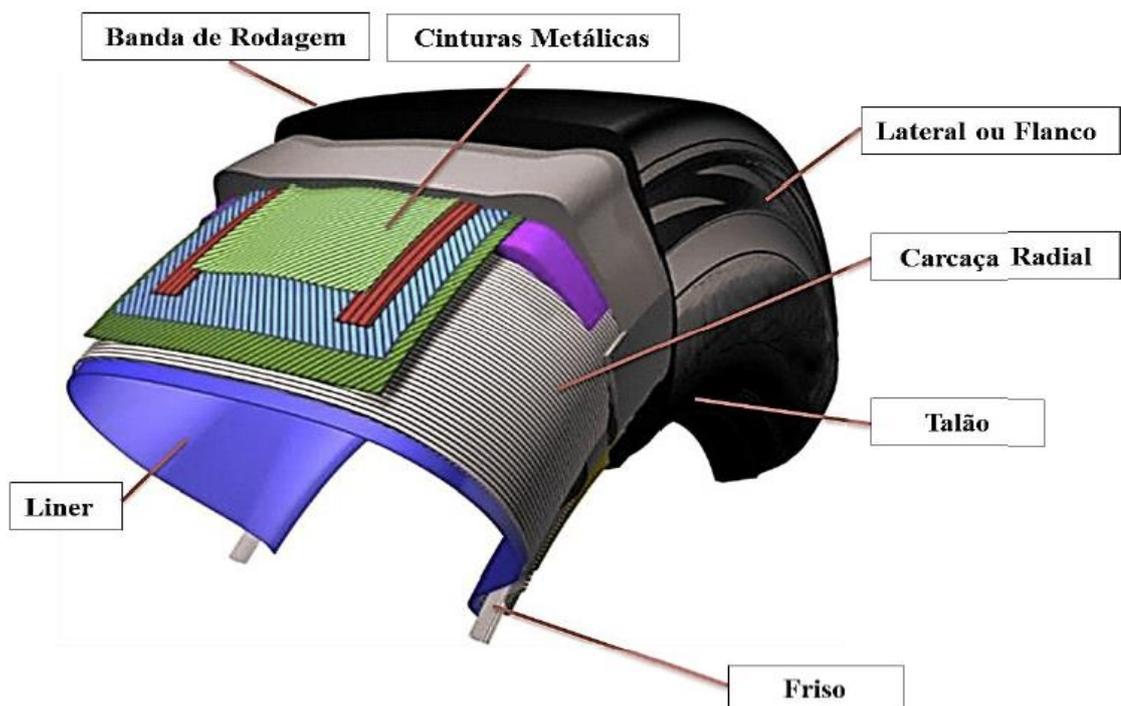
3.2.1 Características do pneu

3.2.1.1 Estrutura e composição

O pneu é um componente muito importante do veículo, pois ele é o único responsável por fazer a interface entre o veículo e o pavimento. Ele é responsável também por suportar cargas, promover aderência para que o veículo trafegue com dirigibilidade, segurança e conforto, além de ter papel fundamental no sistema de frenagem e transmitir tração para que o veículo se mova.

Geralmente cerca de 17 a 19 materiais diferentes compõem a estrutura do pneu. As principais regiões do pneu são mostradas na Figura 4 abaixo.

Figura 4 – Estrutura de um pneu



Fonte: Gali, 2015

Cada um dos componentes tem características diferentes e é responsável por uma função mecânica específica no produto. As cinturas metálicas são tecidos metálicos. Tem como função principal manter o perfil do pneu quando inflado, além da resistência a impactos e perfurações; a lateral do pneu é desenvolvida com compostos especiais com a finalidade de proteger a carcaça radial do pneu de impactos, abrasão e fadiga por flexão. Também é a região do produto onde são gravadas todas as informações do pneu; a carcaça radial é um tecido metálico emborrachado e tem como função principal manter a pressão de ar interna, bem como suportar a carga e impactos laterais inerentes ao uso do produto; o liner é uma fina camada no interior dos pneus e é desenvolvido com um composto especial que proporciona a retenção do ar interno de inflação do pneu; o talão é o conjunto de vários componentes e tem como função principal assentar o pneu na roda, além de aumentar a rigidez lateral do pneu para resistir às deformações nessa região; o friso é uma estrutura localizada no talão do pneu e é formada por fios metálicos, que geralmente são envolvidas por borracha. Sua função é ancorar e manter o pneu inflado ao aro do veículo; a banda de rodagem é responsável em fornecer aderência, tração e frenagem tanto em trajetos retilíneos e curvos. Seu desenho é projetado para obter um desgaste uniforme, bom escoamento da água pelos canais transversais em pisos molhados, redução da emissão de ruídos e uma menor resistência ao rolamento (GALI, 2015).

As cinturas metálicas, toda a parte lateral e a carcaça têm pouca influência na resistência ao rolamento. Entretanto, a banda de rodagem é a principal responsável pelas perdas por resistência ao rolamento devido às deformações cíclicas geradas na borracha que criam perdas por histerese, ou seja, energia é convertida em calor.

A composição da borracha da banda de rodagem varia para cada tipo de pneu e também entre os fabricantes de pneus. Aliás, essa composição é tratada como segredo dentro dos fabricantes de pneus e dificilmente esses dados são divulgados. Mas sabe-se que a borracha da banda de rodagem é uma mistura de polímeros naturais e sintéticos.

Segundo Zafarmehrabian et al. (2012), os principais elementos que compõem a borracha da banda de rodagem são: copolímero de estirenobutadieno (SBR), borracha natural (NR), borracha de polibutadieno (BR), negro de fumo, sílica, óleos, cera, óxido de zinco, enxofre e antioxidantes.

3.2.1.2 Dureza e viscoelasticidade

Para Gent e Walter (2005), dureza é a medida da resistência imposta à penetração de uma superfície, por um instrumento de dimensões determinadas e sob carga também determinada. Os aparelhos mais comuns para a determinação da dureza da borracha dos pneus são os durômetros Shore A.

Quando a borracha da banda de rodagem de um pneu apresenta uma dureza mais elevada, as perdas por histerese serão menores quando comparadas a uma menor dureza da borracha da banda de rodagem, pois a borracha com maior dureza se deformará menos, logo a energia dissipada na forma de calor será menor.

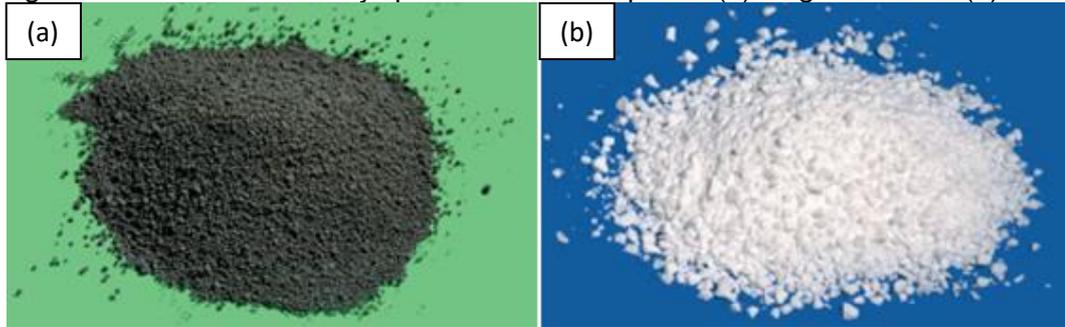
A borracha da banda de rodagem é um material viscoelástico, ou seja, apresenta tanto características viscosas quanto elásticas.

O comportamento de materiais viscoelásticos encontra-se entre o comportamento de uma mola perfeita e um fluido viscoso. Quando um material viscoelástico é deformado, retorna a sua forma inicial somente após um certo tempo, nem sempre perceptível para um observador. Este fenômeno é conhecido como histerese. O lapso de tempo está associado à perda de energia na forma de calor, isto é, dissipação (GENT e WALTER, 2005).

A borracha do pneu é um material compósito, ou seja, é composto por uma matriz e um reforço. A matriz são os polímeros e o reforço pode ser negro de fumo ou uma mistura dele com sílica. Os reforços tornam os pneus mais rígidos e conferem uma melhor resistência ao desgaste. Sem o reforço, os pneus durariam apenas algumas centenas de quilômetros.

O negro de fumo é proveniente da queima incompleta dos gases do petróleo e a sílica é o resultado da fusão de areia com carbonato de sódio em um processo de temperatura muito elevada. O material de reforço, vide Figura 5, ocupa um volume entre 20 e 25% da borracha dos pneus e possuem um tamanho de partícula entre 50 e 500 nm (LEBLANC, 2002).

Figura 5 – Material de reforço para borracha de pneus (a) Negro de fumo (b) Sílica

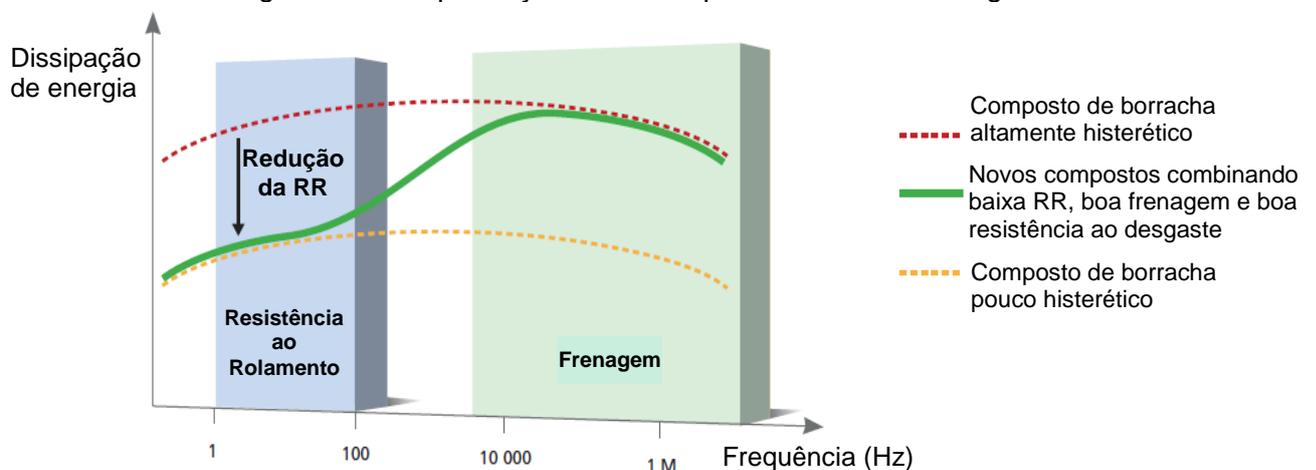


Fonte: Michelin (2003)

Os compostos de borracha usados em pneus são viscoelásticos, o que significa que eles se dissipam energia sob a forma de calor quando deformado. Induzido por deformação, a dissipação de energia é a causa de 90% de resistência ao rolamento. Para reduzir a resistência ao rolamento sem comprometer a aderência ou a resistência ao desgaste, materiais de reforço devem ser distribuídos uniformemente por todo o pneu. A adição de sílica se mostrou muito eficiente na tentativa de diminuir a perda de energia por histerese, diminuindo assim a resistência ao rolamento (MICHELIN, 2003).

Uma vez que fabricantes de pneus já sabem como diminuir a resistência ao rolamento, o maior desafio é chegar em um composto de borracha que atenda também outras performances como resistência ao desgaste e boa aderência para que os veículos atendam aos requisitos de conforto e segurança, como capacidade de frenagem em pavimentos secos e molhados. Essa compensação de desempenho e capacidade de frenagem está ilustrada na Figura 6.

Figura 6 – Compensação de desempenho de RR e Frenagem



Fonte: Michelin (2003)

3.2.1.3 Tamanho

As dimensões dos pneus, tanto o diâmetro quanto a largura, têm uma influência substancial na resistência ao rolamento.

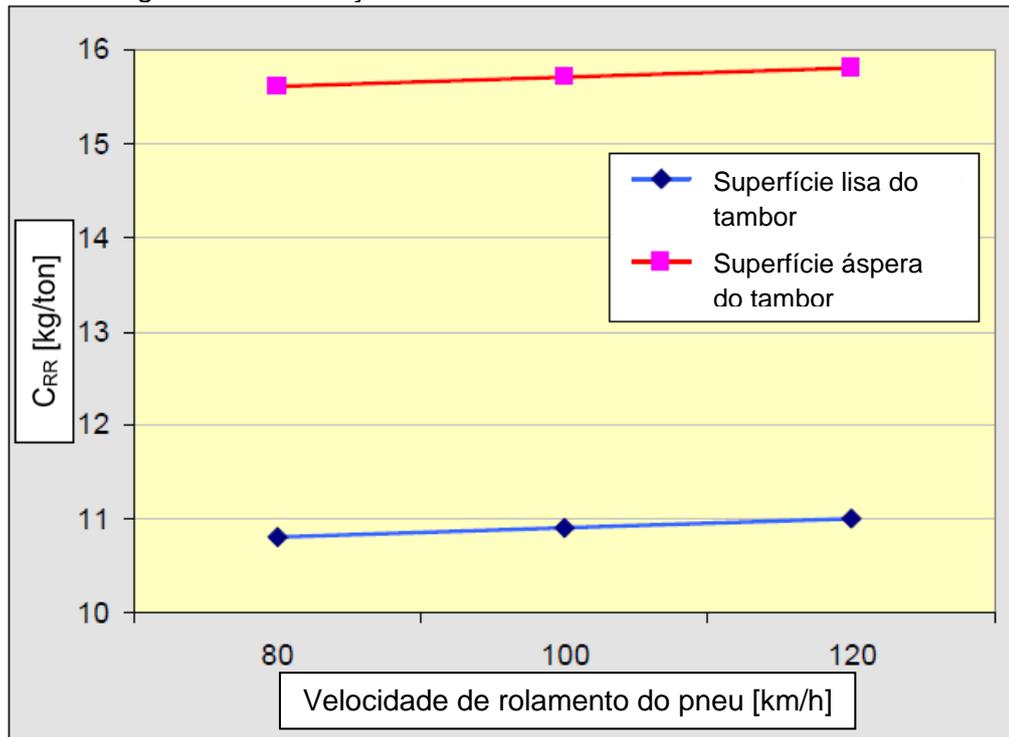
Para Michelin (2003), o coeficiente de resistência ao rolamento de um pneu diminui conforme o seu diâmetro externo aumenta. Isso é porque a deflexão do pneu ao entrar e sair da área de contato é menor para um diâmetro maior. Aumentar o diâmetro externo do pneu em 1 cm reduz a resistência ao rolamento em cerca de 1%.

Com relação a largura, quanto maior, menor será o coeficiente de resistência ao rolamento. A área de contato do pneu com o pavimento aumenta conforme aumenta a largura, diminuindo assim a força sustentada por cada elemento de área. Por isso, a compressão de cada elemento no pneu é menor, comparada com a de um pneu com uma largura menor. Portanto, a perda por histerese é menor. Assim, a energia para superar a perda é menor e a resistência ao rolamento diminui (REDROUTHU, 2014).

3.2.1.4 Velocidade

A resistência ao rolamento é praticamente constante com a velocidade até 100 km/h, a partir dessa velocidade há um aumento considerável (MICHELIN, 2003).

Sandberg (2011a) mostrou o resultado de um trabalho realizado com cerca de 100 pneus de tamanhos e fabricantes variados. Os pneus foram testados em bancada com duas superfícies diferentes do rolo de teste, uma superfície lisa e outra rugosa. Os testes foram realizados com três velocidades diferentes: 80, 100 e 120 km/h e a média dos resultados de todos os pneus mostrou que de 80 para 120 km/h houve um aumento de cerca de 2% no coeficiente de resistência ao rolamento, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Correlação do C_{RR} com a velocidade de rolamento

Fonte: Adaptado de Sandberg (2011a)

3.2.1.5 Carga

O aumento da carga normal aumentará a deformação radial dos elementos do pneu. O momento de rolamento produzido devido ao deslocamento do centro de pressão aumentará agora devido ao aumento no componente vertical do amortecimento da histerese, aumentando assim a força da resistência ao rolamento. Em termos de comportamento dos pneus, isto pode ser entendido como uma maior flexão e cisalhamento da estrutura do pneu à medida que a carga normal aplicada aumenta (REDROUTHU, 2014).

3.2.1.6 Pressão interna

Essa característica do pneu possui grande influência sobre a resistência ao rolamento. À medida que a pressão aumenta, o pneu mantém a sua forma mais firme e a deflexão vertical diminui. Assim, a deformação da borracha é menor em comparação com a de um pneu com menor pressão. Desse modo, as perdas por histerese reduzem, diminuindo a resistência ao rolamento.

Estudos de campo realizados em estradas francesas revelou que os pneus de mais da metade os carros estavam sub-inflados em pelo menos 4,4 psi. Isso resulta em um aumento considerável da resistência ao rolamento: mais de 6% quando 4,4 psi estão abaixo da pressão recomendada e mais de 30% quando a pressão está 14,5 psi abaixo. Um aumento de 30% na resistência ao rolamento ocasiona um aumento no consumo de combustível entre 3 e 5%. Pneus sub-inflados também estão propenso a danos irreversíveis (MICHELIN, 2003).

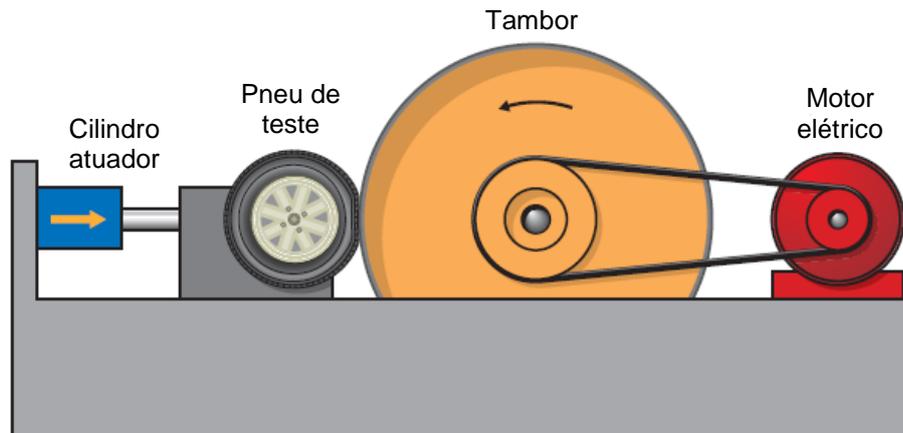
3.2.1.7 Métodos para medir resistência ao rolamento

Medir a resistência ao rolamento de pneus não é tarefa muito fácil. Um dos métodos para a medição é conhecido como *coast down*, onde um veículo é desacelerado apenas pelas forças resistivas ao deslocamento, então é feita uma decomposição das forças. Esse método é pouco significativo para a medição da resistência ao rolamento pois possui muitas variáveis, como: temperatura, vento, pavimento e conhecimento das outras forças resistivas (ANDERSEN et al., 2015).

O método mais confiável para a medição da resistência ao rolamento de pneus é o método do tambor, realizado em um laboratório composto por um tambor de teste, um motor elétrico, um cilindro atuador (elétrico ou hidráulico) alinhado com o centro do tambor e um pneu a ser testado. A Figura 8 mostra uma configuração desse esquema.

Os cilindros atuadores mantem o pneu contra o tambor, que é movido por um motor acoplado a ele. A resistência ao rolamento do pneu aplica um efeito de travagem contra a rotação do tambor, e este efeito é traduzido em medições de forças de resistência ao rolamento.

Figura 8 – Configuração típica do equipamento para a medição da RR



Fonte: Gent e Walter (2005)

Os órgãos internacionais *Society of Automotive Engineers* - SAE e o *International Organization for Standardization* – ISO, já publicaram algumas normas com os procedimentos para os testes de resistência ao rolamento em laboratório. Essas normas são amplamente utilizadas pela indústria automobilística. Os testes podem ser classificados como único ponto ou multi pontos. Os testes de único ponto são realizados com apenas uma condição de carga e pressão interna do pneu, já os testes multi pontos têm os valores de carga e pressão variados ao longo do teste. Algumas características de cada teste são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Normas SAE e ISO para medição da RR em laboratório

Norma	SAE J1269	SAE J2452	ISO 18164	ISO 28580
Número de pontos	Único ponto	Multi pontos	Multi pontos	Único ponto
Diâmetro do tambor	1,7 m	1,219 m ou maior	1,5 m ou maior	1,7 m ou maior
Carga (% da carga máxima do pneu)	70	30, 60 e 90	50 e 90	80
Pressão interna (kPa)	Ref. +20	Múltiplas	Múltiplas	210 ou 250
Velocidade	80 km/h	Desaceleração de 115 a 15 km/h	80 km/h	80 km/h
Range de temperatura	20 a 28°C	20 a 28°C	20 a 30°C	20 a 30°C
Temperatura de referência	24°C	24°C	25°C	25°C

Fonte: Sandberg (2011a)

As principais vantagens de medir a resistência ao rolamento utilizando o método do tambor em laboratório são:

- As medições podem ser realizadas com um controle total de condições ambientais;
- As medições não são influenciadas pelo estilo de condução;
- Fácil ajuste das condições de medição (carga, pressão interna do pneu, velocidade);
- Alta repetitividade dos testes;
- Uma vez instalado o laboratório, os testes são de baixo custo.

A principal desvantagem de medir a resistência ao rolamento em laboratório é que a superfície do tambor não representa uma estrada real em termos de textura. Uma lixa pode ser usada para cobrir o tambor de teste com a intenção de se aproximar de uma textura de pavimento. Porém essa desvantagem é minimizada uma vez que esses testes são, na maioria das vezes, utilizados para uma comparação entre diferentes pneus.

3.2.2 Trabalhos recentes sobre resistência ao rolamento

Atualmente, o estudo sobre resistência ao rolamento de pneus tem abrangido diversas linhas de pesquisa como simulação virtual, estudo da composição da borracha e o estudo de fatores como carga, pressão e temperatura.

A simulação virtual tem sido muito usada para estudar os efeitos da resistência ao rolamento. Cho et al. (2013) descreveram a utilização de uma modelagem numérica em três dimensões para entender a distribuição de temperatura e dissipação de energia do pneu. Andersen et al. (2015) utilizaram elementos finitos para modelar com detalhes a zona de contato do pneu com o pavimento. Elementos finitos também foi utilizado por Fanzhu et al. (2018) para estudar fatores como deformação e taxa de geração de calor.

Sobre a composição, Zafarmehrabia et al. (2012) mostraram que a adição de sílica na composição da borracha da banda de rodagem traz uma melhora significativa na resistência ao rolamento e resistência à fadiga. Hilonga et al. (2012) apresentaram um trabalho sobre a influência do tamanho do grão de sílica para a aplicação em

pneus de baixa resistência ao rolamento e chegaram a conclusão que 37 nm é um tamanho adequado de grão para a indústria de pneus. Zhou et al. (2015) realizaram uma pesquisa que mostrou bons resultados sobre a utilização de um elastômero de base biológica para a redução da resistência ao rolamento. Srivastava (2017) mostrou que a borracha de polibutadieno epoxidado é uma alternativa para o composto de um pneu verde baseado em sílica.

Em trabalhos semelhantes, Taghavifar (2013) e Ejsmont et al. (2016) investigaram o efeito da velocidade, pressão de enchimento dos pneus e carga vertical na resistência ao rolamento e concluíram que a carga e a pressão têm muito mais influência do que a velocidade. Ejsmont et al. (2018) estudaram o efeito da temperatura na resistência ao rolamento e concluíram que todas as medições experimentais precisam ser corrigidas para uma mesma temperatura pois esta variável possui grande influência na resistência ao rolamento.

3.2.3 Características do pavimento

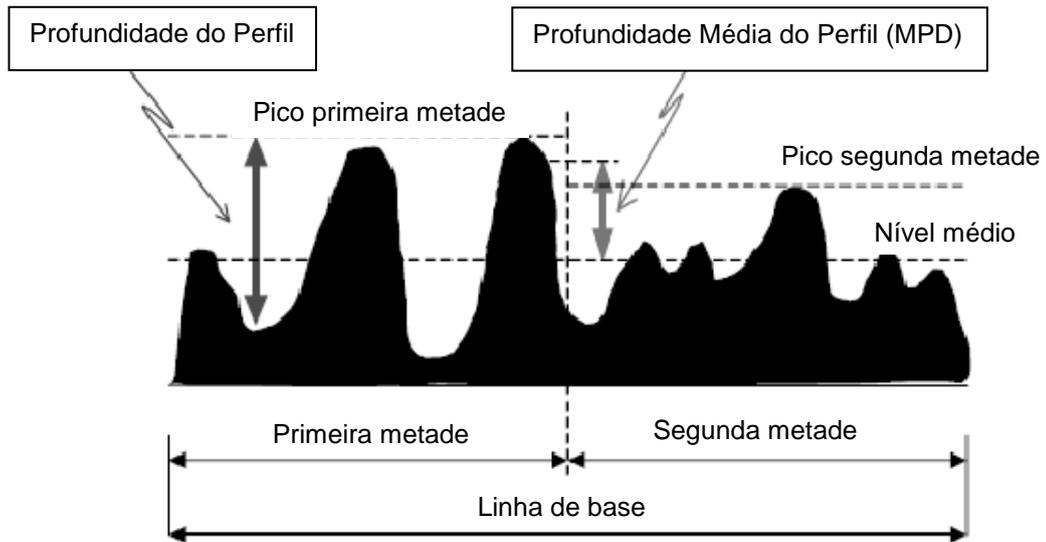
3.2.3.1 Textura

A textura da superfície é a característica mais importante de estradas e pavimentos em geral, afetando os processos de interação entre pneus e pavimentos, como atrito, desgaste de pneus, emissão de ruído e resistência ao rolamento (SANDBERG, 1997).

Segundo Sandberg (2011b), textura ou textura de pavimento é o desvio da superfície de um pavimento a partir de uma superfície verdadeiramente plana, uma ilustração é mostrada na Figura 9.

Um perfil da superfície pode ser gerado com um sensor, como a ponta de uma agulha ou um laser, quando toca ou brilha continuamente na superfície do pavimento enquanto ele é movido ao longo da superfície.

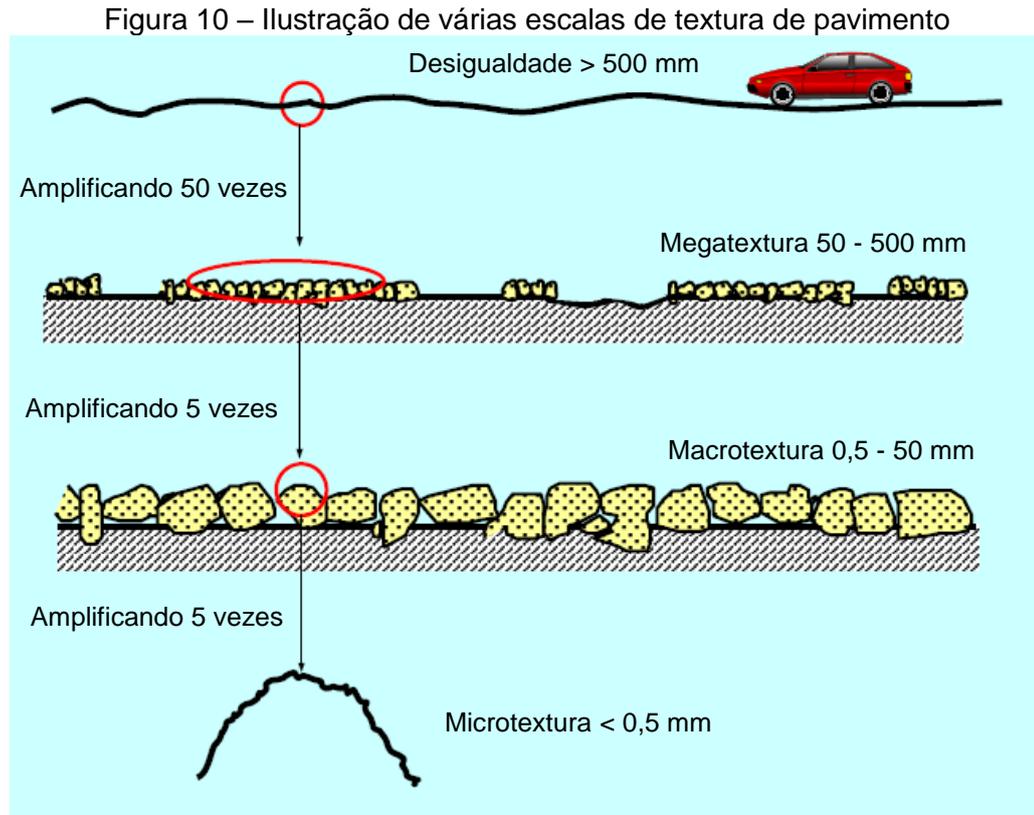
Figura 9 – Perfil da textura do pavimento



Fonte: Sandberg (1997)

Quando os pneus estão rolando na superfície de uma estrada, a histerese da borracha causa perdas de energia nos pneus principalmente quando a macrotextura força a borracha a se deslocar em relação a uma superfície plana ideal. Isso significa que o aumento da textura resulta em aumento da resistência ao rolamento (SANDBERG, 1997).

O perfil pode ser estudado com mais ou menos detalhes, e as características destes terão diferentes influências na interação estrada / pneu / veículo, conforme ilustrado na Figura 10.



Fonte: Sandberg (2011b)

Macrotextura é o principal fator dos pavimentos que influencia a resistência ao rolamento. Para a macrotextura, temos duas medidas que são comumente usados: *Mean Texture Depth* (MTD) e *Mean Profile Depth* (MPD) e ambos são medidos em milímetro (mm).

MTD é uma medida desenvolvida em meados do século 20, onde um certo volume de areia é espalhado com uma ferramenta em movimentos circulares nivelando a areia com os picos na superfície em uma área circular na superfície da estrada, cujo diâmetro é medido. Do diâmetro da área e do volume da areia, calcula-se a profundidade média da textura sobre área. Esse método é conhecido como "método da mancha de areia" e ainda é bastante utilizado nos dias atuais por conta da facilidade de medição e do baixo custo. Em algumas literaturas está definido como H_s , altura da mancha de areia.

O MPD é uma medida desenvolvida nas décadas de 1980 e 1990 com a intenção de substituir o MTD que poderia ser medido pela movimentação de um veículo usando sensores laser para registrar o perfil da superfície do pavimento. Porém não temos relatos de dados de textura medida utilizando esse método em

estradas brasileiras pois exige uma mão de obra especializada e um equipamento de alto custo.

Em um trabalho realizado por Hooghwerff (2013) em 69 trechos de estradas suecas, com a intenção de avaliar a variação da resistência ao rolamento em diferentes tipos de superfícies de estrada, mediu a textura (MPD) e a resistência ao rolamento simultaneamente utilizando um reboque para realizar as medições que pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Reboque utilizado para medição de textura e C_{RR}



Fonte: Hooghwerff (2013)

Após uma análise de regressão dos resultados de MPD e C_{RR} , Hooghwerff chegou à seguinte relação:

$$C_{RR} = 0,95 * MPD + 7,92 \quad (2)$$

A relação entre as texturas MPD (método à laser) e MTD (método da mancha de areia), mostrada por Bennett e Greenwood (2003) é a seguinte:

$$MTD = 1,02 * MPD + 0,28 \quad (3)$$

Para duas texturas MPD de 0,08 e 2,77 mm, o C_{RR} é aumentado da superfície mais lisa para a mais áspera entre 21 e 55%, dependendo do tipo de pneu. E o

consumo de combustível variou entre 7 e 18% para veículos leves dirigidos em uma estrada a 90 km/h. (BERGIERS et al., 2011).

Por motivo de segurança, para que o pavimento possa proporcionar boa aderência tanto com piso seco como molhado, o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes - DNIT não recomenda pavimentos com MTD inferior a 0,6 mm (DNIT, 2006).

Também chamada de irregularidade longitudinal e desigualdade, a rugosidade é definida como sendo o conjunto dos desvios da superfície do pavimento em relação a um plano de referência, desvios estes que, entre outros inconvenientes, afetam a qualidade do rolamento e a ação dinâmica das cargas sobre a via, contribuindo para um rolamento inseguro, desconfortável e que pode gerar maiores custos de reparação dos veículos (DNIT, 2006).

Para caminhões e ônibus, o fator rugosidade não deve ser negligenciado no cálculo da resistência ao rolamento, uma vez que esse fator pode ter uma influência maior do que a macrotextura do pavimento em velocidades mais altas. Enquanto que, para veículos de passageiros, a influência da rugosidade é muito pequena e pode ser desconsiderada.

A rugosidade é medida ao longo de uma linha imaginária, paralela ao eixo da estrada, usando um veículo equipado com sensores laser que deve ser conduzido a 80 km/h, cuja resposta é acumulada para produzir um índice de rugosidade que é a inclinação acumulada da curva de perfil por km de estrada, seja negativa ou positiva, expressa em mm/km ou m/km. Esse índice é chamado de *International Roughness Index* - IRI. Desde a sua introdução nos anos 80, o IRI tornou-se o parâmetro da estrada mais utilizado em todo o mundo para avaliação e gerenciamento de sistemas rodoviários (FONTARAS, 2017; SANDBERG, 2011b).

3.2.3.2 Rigidez do pavimento

A rigidez bem como a deflexão do pavimento sob um pneu carregado, deve resultar em algum consumo de energia, que deve ser refletida em uma contribuição para a resistência ao rolamento. Segundo Sandberg (2011a) estudos europeus revelaram uma contribuição muito pequena principalmente para veículos leves. Por conta da dificuldade de medição e pela baixa contribuição, a rigidez será desconsiderada nesse trabalho, mas deverá ser considerada em estudos futuros.

3.2.4 Trabalhos recentes sobre textura de pavimentos

Estudos sobre a caracterização dos pavimentos através da medição da textura têm sido realizados no mundo todo e utilizando diferentes técnicas para a medição da textura.

Trabalhos realizados no Brasil, por exemplo, Aps (2006), Cardoso (2010) e Bastos (2016) fizeram a caracterização de pavimentos utilizando a técnica da mancha de areia para a medição da textura, porém não fizeram qualquer relação da textura com a resistência ao rolamento.

Na China, Hao et al. (2016) fizeram uma comparação entre as técnicas de medição e chegaram em um valor de correlação de 0,98, indicando uma boa correlação entre as técnicas de medição a laser e o método da mancha de areia. Puzzo et al. (2017) utilizaram fotografias tridimensionais para medir a textura do pavimento na Itália e correlacionaram com o método da mancha de areia e chegaram em um índice de correlação de 0,99 entre os dois métodos.

Van Haaster et al. (2015) mediram a textura de pavimentos utilizando o método laser em estradas holandesas e concluíram que pelo menos 2% do consumo de combustível poderia ser economizado se os pavimentos fossem construídos com um agregado de tamanho menor do que normalmente é utilizado.

Boere et al. (2014) apresentaram uma modelagem utilizando elementos finitos para estimar a resistência ao rolamento e encontraram uma correlação linear comparando a modelagem com medições de textura em estradas holandesas. Shakiba et al. (2016) apresentaram um estudo teórico com simulações tridimensionais para estimar o consumo de combustível considerando os pavimentos como uma superfície deformável.

3.2.5 Temperatura ambiente

A quantidade de energia dissipada pelos elastômeros quando submetidos a deformação repetida diminui conforme a temperatura aumenta. A resistência ao rolamento é, portanto, menor quando a temperatura ambiente é mais alta. A variação na resistência ao rolamento em função de a temperatura não é linear. No entanto, entre 10 e 40 °C, uma variação de 1 °C corresponde a uma variação na resistência ao rolamento de 0,6% (MICHELIN, 2003).

Para testes de resistência ao rolamento realizados em laboratório, as normas estabelecem uma temperatura de referência (25 °C para a norma ISO 28580 e 24 °C para a norma SAE J2452) para que esse fator não interfira no resultado de comparação entre os pneus.

3.3 MALHA RODOVIÁRIA E FROTA DE VEÍCULOS AUTOMOTORES

A CNT realizou uma pesquisa em 2018 e publicou os resultados no Relatório Gerencial 2018 (CNT, 2018). A pesquisa mostra que o Brasil possui 1.720.700 quilômetros de rodovias, sendo que apenas 213.453 km (12,4% do total) são pavimentados.

Em 2018, 107.161 km das rodovias pavimentadas foram avaliadas pela CNT levando em consideração as características do pavimento, da sinalização e da geometria da via. O estado geral da rodovia leva em consideração as três características anteriores ao mesmo tempo. Mais da metade (57%) das rodovias avaliadas, apresentam algum tipo de problema no estado geral, sendo classificadas como regular, ruim ou péssimo.

Avaliando separadamente apenas as condições do pavimento, a pesquisa CNT mostrou que 50,9% das rodovias apresenta algum tipo de problema no pavimento. As principais irregularidades nos revestimentos asfálticos consideradas pela CNT são: fissuras, trincas corrugação, desagregação, remendos, afundamentos, ondulações e buracos (CNT, 2018). A Tabela 2 mostra a qualidade dos pavimentos de toda extensão pesquisada e também os trechos administrados pela iniciativa privada e gestão pública.

Tabela 2 – Condições dos pavimentos das rodovias brasileiras em 2018

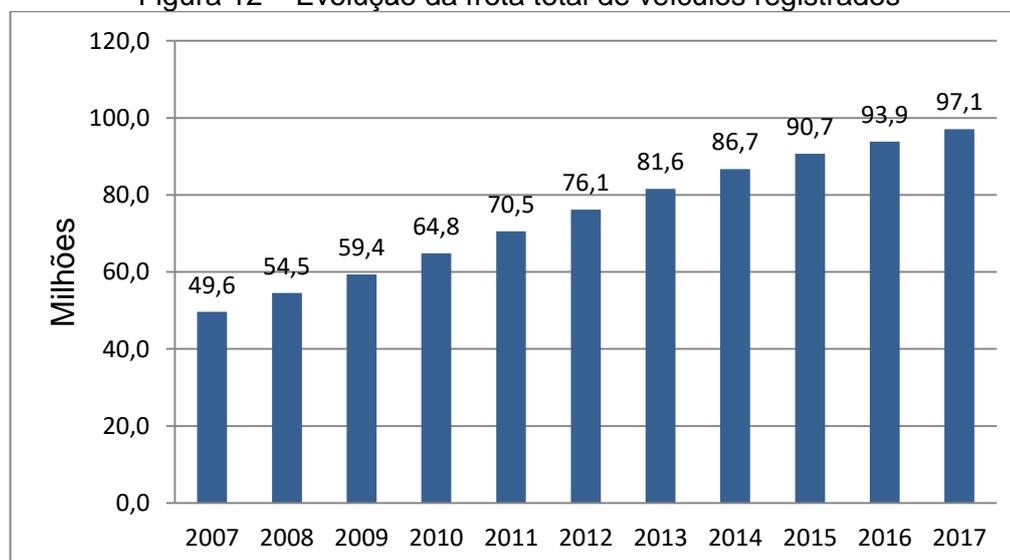
Pavimento	Extensão Total		Gestão Concedida		Gestão Pública	
	km	%	km	%	km	%
Ótimo	45.211	42,3%	14.533	74,2%	30.678	35,0%
Bom	7.315	6,8%	968	4,9%	6.347	7,2%
Regular	39.664	37,0%	3.711	18,9%	35.953	41,2%
Ruim	10.205	9,5%	326	1,9%	9.829	11,2%
Péssimo	4.766	4,4%	10	0,1%	4.756	5,4%
Total	107.161	100,0%	19.598	100,0%	87.563	100,0%

Fonte: Adaptado de dados de CNT (2018)

Os números mostrados não são nada animadores, tendo em vista que no histórico desde 2010 até 2018, a avaliação positiva (ótimo ou bom) do estado geral e das condições dos pavimentos das rodovias têm se mantida praticamente constante ao longo dos anos, mantendo-se assim uma malha rodoviária inadequada que aumenta os custos de transporte e manutenção, reduz a segurança do tráfego, e aumenta o consumo de combustível e emissão de gases poluentes.

Um dos motivos para a inadequação das condições das rodovias pavimentadas brasileiras está relacionada à demanda por essa infraestrutura. Nos últimos 11 anos, enquanto a malha rodoviária pavimentada brasileira cresceu 2,1%, a frota de veículos que circulam pelo país cresceu 95,6%, vide Figura 12 (DENATRAN, 2017).

Figura 12 – Evolução da frota total de veículos registrados



Fonte: Adaptado de dados de DENATRAN (2017)

Conforme o Anuário da Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores - FENABRAVE de 2016, a idade média da frota brasileira de automóveis é de 14 anos.

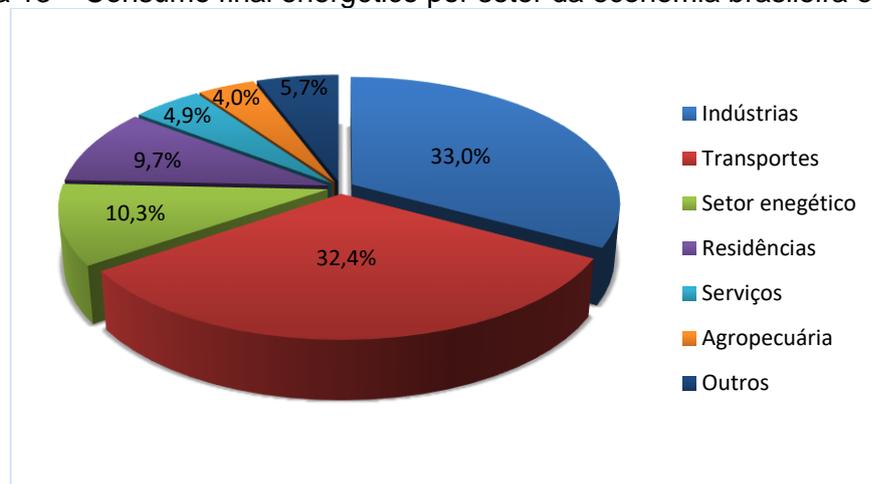
A inadequada malha rodoviária combinada com o rápido crescimento da frota e a avançada idade média dos veículos contribuem para um aumento do consumo de combustível e emissão de gases poluentes.

3.4 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÃO DE CO₂

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE, subordinada ao Ministério de Minas e Energia – MME, divulgou em 2017 no Balanço Energético Nacional – BEN os dados de 2016 sobre, entre outros, o consumo de energia no Brasil.

Os setores das indústrias e transportes, como pode ser visto na Figura 13, foram os grandes consumidores de energia em 2016 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017).

Figura 13 – Consumo final energético por setor da economia brasileira em 2016



Fonte: Adaptado de dados de MME (2017)

Dentro do setor de transporte, destaca-se a importância do modal rodoviário, o qual respondeu por mais de 30% do consumo final de energia do Brasil em 2016 e por 94% do consumo final de energia pelo setor de transporte.

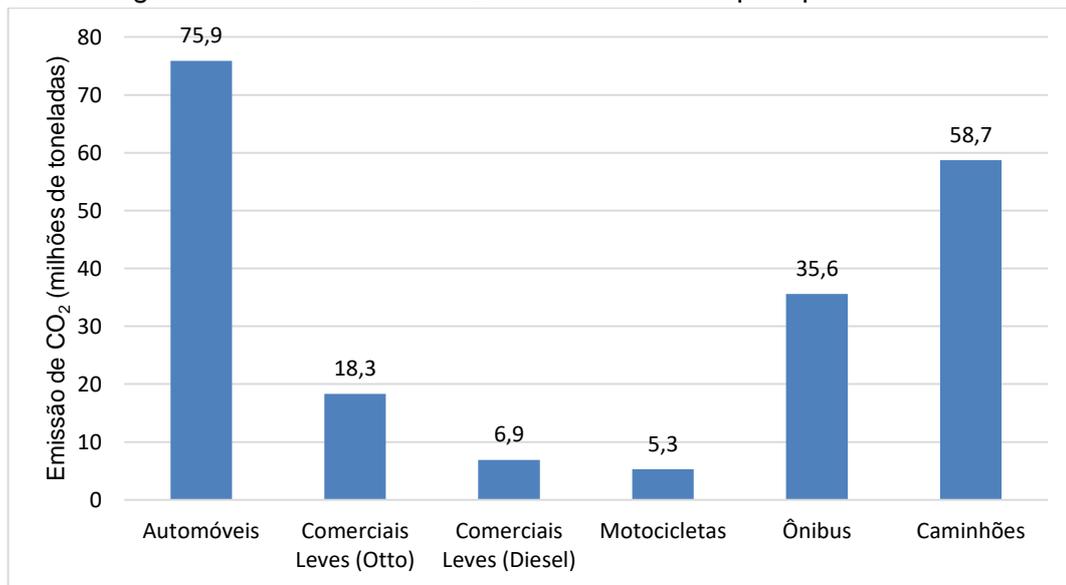
O consumo de combustível dos veículos pode ser verificado através de testes utilizando o próprio veículo ou também pode ser estimado através de modelos

matemáticos, desde que se tenha dados confiáveis como por exemplo o coeficiente de arrasto aerodinâmico e área frontal do veículo.

O problema causado pelas emissões veiculares foi alvo de uma das primeiras manifestações públicas no país sobre cuidados com o meio ambiente. Na década de setenta, a fumaça preta emitida pelos veículos a óleo diesel apareceu como problema ambiental devido à implantação da indústria automobilística, atrelada à rápida urbanização (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 2015).

Globalmente, o transporte rodoviário é um dos principais contribuintes para a emissão de gases de efeito estufa e é um dos poucos setores de consumo de energia onde as emissões ainda permanecem aumentando. No Brasil o modal rodoviário foi responsável por aproximadamente 46% das emissões totais de CO₂ no ano de 2017.

Figura 14 – Emissão de CO₂ no Brasil em 2010 por tipo de veículo



Fonte: Adaptado de dados de MCTIC (2015)

Dentre todos os gases de efeito estufa, o CO₂ é o grande vilão, ele é responsável por cerca de 98% da composição dos gases emitidos. Segundo Brasil (2018), no ano de 2017 o setor de transporte rodoviário emitiu 199,7 milhões de toneladas de CO₂ no Brasil. Na Figura 14 pode ser vista a contribuição por tipo de veículo na emissão de CO₂.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos e os devidos ensaios realizados para a obtenção dos coeficientes de resistência ao rolamento através da macrotextura dos pavimentos medidas em campo e através dos ensaios realizados em laboratório.

Após a obtenção dos coeficientes de resistência ao rolamento, o modelo matemático de Willans Line, descrito em Pavlovic (2016), foi utilizado para o cálculo do consumo de combustível.

4.1 MEDIÇÃO DA TEXTURA ATRAVÉS DO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA

Para medir a textura do pavimento asfáltico foi utilizado o método da mancha de areia (*Mean Texture Depth* – MTD), regulado pela norma ASTM E 965 (1996). Esse método realizado em campo é usado para determinar a profundidade de altura média de um volume de areia em superfícies de pavimentos asfálticos e consiste em preencher os vazios da textura superficial do pavimento com um volume conhecido de areia preparada de modo que a área final seja aproximadamente circular. Através da Equação 4 e do diâmetro médio D_M é obtida a altura média H_s (mm).

$$MTD (H_s) = \frac{V \cdot 4}{D_M^2 \cdot \pi} \quad (4)$$

Onde:

V = Volume de areia, 25000 (mm³)

D_M = Diâmetro médio da mancha de areia (mm)

MTD ou H_s = Altura média da mancha de areia (mm).

4.1.1 Materiais utilizados no método da mancha de areia

Os materiais e equipamentos (Figuras 15 e 16) utilizados neste método são de baixo custo, por esse motivo, o método da mancha de areia é amplamente utilizado para caracterizar a textura de pavimentos asfálticos.

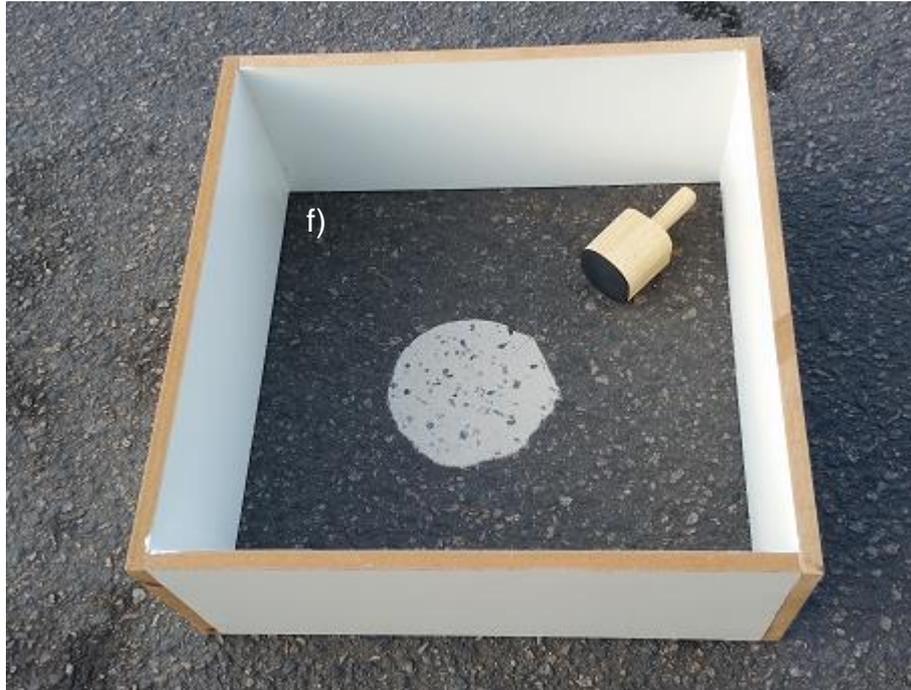
Figura 15 – Materiais e equipamentos para o ensaio da mancha de areia



Fonte: Autoria própria

- a) Areia normal brasileira Nº 100, fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT.
- b) Dispositivo circular de madeira com base emborrachada, para o espalhamento da areia na superfície do pavimento.
- c) Régua ou trena com divisões milimétricas para medição do diâmetro do círculo de areia espalhado na superfície do pavimento.
- d) Recipiente graduado ou com um volume interno predeterminado de 25000 mm³, para ser preenchido com a areia que será espalhada na superfície do pavimento.
- e) Pincel, para completa limpeza da superfície do pavimento antes do espalhamento do volume de areia.
- f) Dispositivo de proteção com dimensões mínimas de 50 cm x 50 cm para ser posicionado em volta da areia durante a realização do ensaio, a fim de proteger o material do vento e da turbulência criada pelo tráfego, como na Figura 16.

Figura 16 – Dispositivo de proteção contra ventos e turbulência criada pelo tráfego



Fonte: Autoria própria

4.1.2 Procedimento para realização do teste da mancha de areia

As superfícies dos pavimentos que foram ensaiadas foram inspecionadas visualmente afim de selecionar uma área seca, homogênea, livre de trincas e emendas. Utilizando o pincel, as áreas foram completamente limpas, com a finalidade de remover qualquer resíduo, detrito ou partículas de agregado livres na superfície. Então foi posicionado o dispositivo de proteção ao redor da área a ser ensaiada.

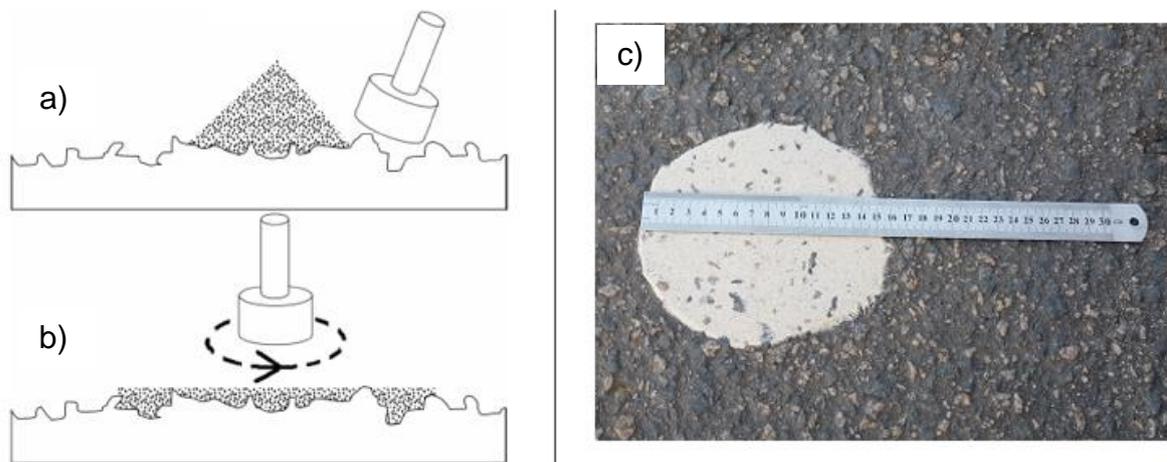
Após a área ser selecionada e preparada, foi preenchido o recipiente graduado com areia seca e batido levemente a base do recipiente em uma superfície rígida de forma a adensar o material, adicionando mais areia e garantindo que o volume não ultrapasse 25000 mm³.

Após despejar o volume de areia medido no recipiente na superfície limpa e seca do pavimento (Figura 17 a), com a área a ser ensaiada protegida pelo dispositivo de proteção, cuidadosamente a areia foi espalhada de forma circular, ver Figura 17 (b), preenchendo os vazios superficiais até o surgimento das pontas dos agregados, formando uma superfície plana no círculo formado pela areia espalhada. Medindo o diâmetro da área circular coberta pela areia (Figura 17 c), com quatro medições

espaçadas igualmente em torno da amostra foi possível calcular o diâmetro médio através das quatro medições.

O mesmo operador deve realizar, em áreas selecionadas aleatoriamente no mesmo segmento, no mínimo três medições da profundidade média da macrotextura do pavimento. A média aritmética das medições individuais da profundidade da macrotextura deve ser considerada como a profundidade da macrotextura do segmento avaliado (ARTERIS, 2016).

Figura 17 – Procedimento do teste da mancha de areia a) despejar a areia b) espalhamento da areia c) diâmetro da mancha



Fonte: a) e b) ASTM E 965 (1996) / c) Autoria própria

4.1.3 Medições de textura realizadas

Os locais foram definidos por meio de um plano baseado no tipo de pavimento estudado. As medições foram realizadas com pista seca e sempre no período matutino nos finais de semana por conta da diminuição do tráfego e realizadas entre os dias 16/09/2018 e 29/09/2018.

Foram definidos 5 locais para a medição da textura de modo a abranger rodovias sob administrações federal, estadual e municipal. Em cada local foram realizadas 3 medições, espaçadas no mínimo 50 metros entre si, a fim de se obter uma média da macrotextura. Na BR 101 foram realizadas medições em 2 locais. No primeiro, denominado de Local 1 a rodovia passou por recente (menos de 3 meses) troca do pavimento, enquanto que no Local 2, o pavimento não passou por reformas recentes. O Local 3 representa o trecho urbano e fica localizado na Rua Gen. Édson

Ramalho no bairro de Boa Viagem, zona sul do Recife. Os locais onde as macrotexturas foram medidas estão descritos na Tabela 3 abaixo.

Os valores de textura MTD medidos foram comparados com o valor referência sugerido pelo DNIT que é 0,60 mm.

Tabela 3 – Locais de medição da macrotextura

Local	Rodovia	Administ.	Trecho	Localização (Latitude / Longitude)
1	BR 101 (1)	Federal	km 67	8°02'37.2"S 34°56'37.8"W
2	BR 101 (2)	Federal	km 105	8°17'46.2"S 35°03'32.2"W
3	PE 015	Estadual	km 14	7°57'36.8"S 34°52'13.2"W
4	R. Gen. Édson Ramalho	Municipal	Nº 446	8°06'56.1"S 34°54'01.4"W
5	Av. Reitor Joaquim amazonas	Federal	UFPE	8°03'05.5"S 34°57'00.7"W

Fonte: Autoria própria

4.1.4 Incerteza de medição do método de cálculo do C_{RR}

A partir dos dados de textura medidos e utilizando as equações 2 e 3, foi possível calcular os coeficientes de resistência ao rolamento.

No estudo realizado por Hooghwerff (2013), foi feita uma investigação da incerteza total envolvida nas seções da estrada onde cada seção foi medida com cinco execuções de medição. O cálculo de incerteza foi baseado nas informações sobre influências de temperatura, pressão do pneu, repetibilidade, reprodutibilidade, etc.

A incerteza total do coeficiente de resistência ao rolamento médio, medida em uma determinada seção foi de aproximadamente $\pm 3\%$ para um intervalo de confiança de 95%.

4.2 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DO TAMBOR

Para a medição da resistência ao rolamento foi utilizado o método do tambor em laboratório.

4.2.1 Equipamento utilizado para a medição da RR em laboratório

As medições da resistência ao rolamento foram realizadas no laboratório de *Rolling Resistance* da empresa Fiat Chrysler Automóveis – FCA no estado de Pernambuco, que é o único laboratório dessa montadora de veículos para esse tipo de medição na América Latina.

O equipamento utilizado foi o modelo Roadwheel Test System 860 (Figura 18) do fabricante MTS e importado dos Estados Unidos.

Figura 18 – Roadwheel Test System 860



Fonte: Autoria própria

Os principais equipamentos que compõem o Roadwheel Test System 860 estão descritos na Tabela 4:

Tabela 4 - Roadwheel Test System 860

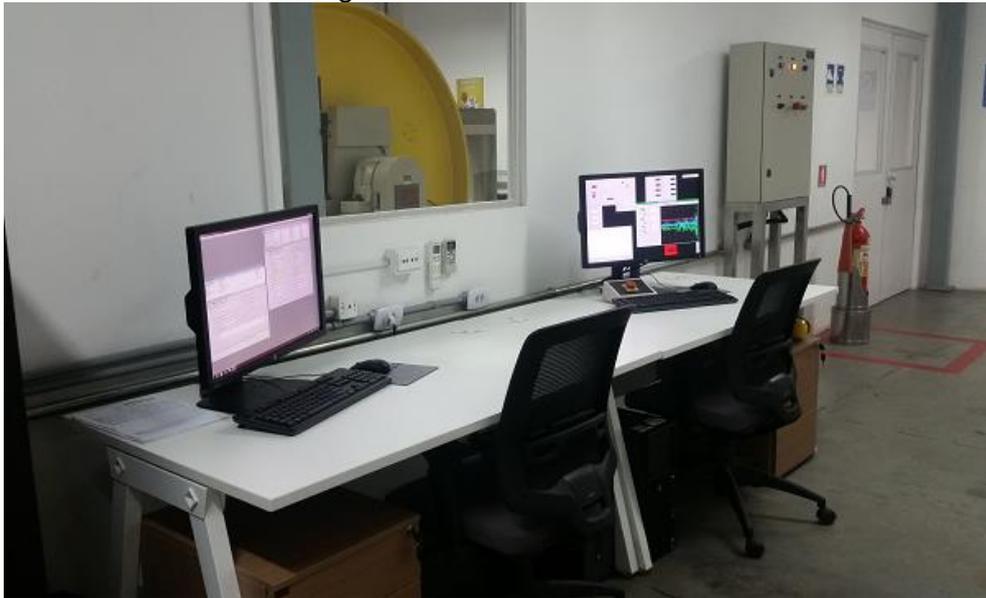
Equipamentos	Característica
Transdutor de deslocamento	Modelo: GPM0762MD602DI8
Transdutor de velocidade	Modelo: H25D-SS-5000-ABZC
Transdutor de pressão	Modelo: Sensotec Z
Célula de carga biaxial	Fabricante: MTS
Sensor de temperatura	Modelo: RTD 100
Diâmetro do tambor	2000 mm
Velocidade máxima	250 km/h
Carga máxima dos atuadores	15 kN
Pressão interna do pneu	700 kPa (101 psi)
Diâmetro máximo do pneu	1000 mm (40 pol)
Largura máxima do pneu	400 mm
Potência do motor principal	100 HP
Massa total do sistema	12247 kg

Fonte: Autoria própria

Toda a operação do sistema é feita por dois computadores com *softwares* específicos da MTS, localizados na sala de controle (Figura 19), ao lado da sala do equipamento.

Por motivos de segurança, dois *scanners* fazem uma varredura na sala do equipamento e o teste só é iniciado se não tiver ninguém dentro da sala e a porta de acesso é trancada automaticamente durante todo o teste.

Figura 19 – Sala de controle



Fonte: Autoria própria

A interface entre os computadores e o sistema é feita pelo controlador digital FlexTest 100 (Figura 20).

Figura 20 – Controlador digital FlexTest 100



Fonte: Autoria própria

4.2.2 Procedimento para realização do teste utilizando o método do tambor

Dentre as normas citadas anteriormente na Tabela 1, a escolhida para reger os testes deste trabalho foi a norma ISO 28580, pelos seguintes motivos:

- É a norma mais recente;

- É utilizada pelo INMETRO para classificar os pneus segundo o Programa Brasileiro de Etiquetagem – PEB;
- É muito utilizada na Europa e Estados Unidos para a medição da resistência ao rolamento em laboratório (SANDBERG, 2011a).

Todos os pneus foram montados em rodas de chapa de aço e em seguida foi feito um balanceamento dinâmico do conjunto roda/pneu para evitar trepidações na máquina e falsas medições.

Antes do pneu ser montado na máquina de teste, ele deve passar por uma ambientação mínima de 3 horas, onde o pneu fica acondicionado em estantes (ver Figura 21) dentro do laboratório na temperatura de 25°C que é a temperatura de realização do teste. Nesse momento a calibração do pneu já deve estar correta dependendo do tipo de carga do pneu, 210 kPa (30,5 psi) se o pneu for *Standard Load* ou 250 kPa (36,3 psi) se for *Extra Load*. As informações do tipo de carga, capacidade de carga e pressão de referência são gravadas pelos fabricantes na lateral do pneu.

Figura 21 – Estantes para ambientação dos conjuntos roda/pneu



Fonte: Autoria própria

Enquanto o pneu está ambientando (estabilizando a temperatura), suas informações já podem ser inseridas no *software*. Algumas informações são obrigatórias, como: as medidas do pneu, pressão de referência e capacidade de carga.

Após o período de ambientação, o pneu está pronto para ser montado na máquina e o teste pode ser iniciado. Dado o comando para iniciar o teste, os cilindros atuadores carregam o pneu contra o tambor, aplicando uma carga (F_z) equivalente a 80% da carga máxima do pneu, então começa o período de aquecimento do pneu, esse período é de 30 minutos a 80 km/h.

Alguns parâmetros são aquiritados de forma direta, são eles:

- Velocidade;
- Temperatura ambiente;
- Carga (F_z);
- Força longitudinal (F_x);
- Força parasita (F_p);
- A distância entre o centro do pneu até a superfície externa do tambor (R_L).

Forças parasitas são atribuídas ao arrasto aerodinâmico do pneu e também ao atrito dos rolamentos. Essa força é medida por uma tara onde o pneu gira sem carga, então essa força pode ser medida (ISO 28580, 2009).

A força longitudinal (F_x) medida ainda não é a força de resistência ao rolamento (F_{RR}), ela precisa passar por algumas correções. Primeiro, a força parasita (F_p) deve ser subtraída da força longitudinal (F_x), depois esse resultado deve ser corrigido para a temperatura de referência (25°C), caso o teste tenha ocorrido em uma temperatura diferente.

A resistência ao rolamento, utilizando o método da força, é calculada conforme a Equação 5 (ISO 28580, 2009):

$$F_{RR} = [F_x \cdot (1 + R_L/R) - F_p \cdot (1 + R_{LP}/R)] \cdot [1 + 0,008 \cdot (T_{AMB} - 25)] \quad (5)$$

Como o raio o tambor do equipamento utilizado é $R = 1,0$ m, a Equação 5 pode ser simplificada:

$$F_{RR} = [F_x \cdot (1 + R_L) - F_p \cdot (1 + R_{LP})] \cdot [1 + 0,008 \cdot (T_{AMB} - 25)] \quad (6)$$

Onde:

F_{RR} = Força de resistência ao rolamento [N]

F_X = Força longitudinal [N]

R_L = Distância entre o centro do pneu até a superfície externa do tambor [m]

F_P = Força parasita [N]

R_{LP} = Distância entre o centro do pneu até a superfície externa do tambor, durante a medição da força parasita [m]

T_{AMB} = Temperatura ambiente [°C]

4.2.3 Incerteza de medição do equipamento

Sabemos que a grande maioria das grandezas mensuráveis possui uma incerteza de medição associada e com o coeficiente de resistência ao rolamento não é diferente.

Como o C_{RR} é obtido a partir de uma medição indireta, para o cálculo da incerteza padrão combinada, é necessário calcular as derivadas parciais do C_{RR} em relação a cada grandeza de entrada. O modelo matemático completo é mostrado na Equação 7 (ISO 28580, 2009).

$$C_{RR} = \frac{[F_X \cdot (1 + R_L) - F_P \cdot (1 + R_{LP})] \cdot [1 + 0,008 \cdot (T_{AMB} - 25)]}{F_Z} \quad (7)$$

Onde:

F_{RR} = Força de resistência ao rolamento [N]

F_X = Força longitudinal [N]

R_L = Distância entre o centro do pneu até a superfície externa do tambor [m]

F_P = Força parasita [N]

R_{LP} = Distância entre o centro do pneu até a superfície externa do tambor, durante a medição da força parasita [m]

T_{AMB} = Temperatura ambiente [°C]

F_Z = carga vertical [N]

Do certificado de calibração dos equipamentos, foram coletadas as incertezas padrão de cada variável de entrada e são apresentadas na Tabela 5:

Tabela 5 – Incertezas padrão do certificado de calibração

Fonte de Incerteza	Incerteza expandida	Distribuição Assumida	Divisor	Incerteza Padrão	Graus de Liberdade
F _X	± 0,5 [N]	Normal, k=2	2	0,25	∞
R _L	± 0,0005 [m]	Normal, k=2	2	0,00025	∞
F _P	± 0,5 [N]	Normal, k=2	2	0,25	∞
R _{LP}	± 0,0005 [m]	Normal, k=2	2	0,00025	∞
T _{AMB}	± 0,5 [°C]	Normal, k=2	2	0,25	∞
F _Z	± 10 [N]	Normal, k=2	2	5	∞

Fonte: Autoria própria

A incerteza padrão combinada (U_c), pode ser obtida a partir das derivadas parciais do C_{RR} (Equação 7) em relação a cada variável de entrada e das suas respectivas incertezas padrão, conforme a Equação 8 (ALBERTAZZI, 2008):

$$\begin{aligned}
 UC_{C_{RR}}^2 = & \left(\frac{\partial C_{RR}}{\partial F_X} \cdot u_{F_X} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{RR}}{\partial R_L} \cdot u_{R_L} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{RR}}{\partial F_P} \cdot u_{F_P} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{RR}}{\partial R_{LP}} \cdot u_{R_{LP}} \right)^2 \\
 & + \left(\frac{\partial C_{RR}}{\partial T_{AMB}} \cdot u_{T_{AMB}} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_{RR}}{\partial F_Z} \cdot u_{F_Z} \right)^2
 \end{aligned} \quad (8)$$

Por fim, após a obtenção da incerteza padrão combinada, determina-se a incerteza expandida (U). A incerteza expandida é estimada pela multiplicação da incerteza padrão combinada pelo respectivo fator de abrangência (k) (ALBERTAZZI, 2008).

$$U = k \cdot U_c \quad (9)$$

Assumindo-se uma distribuição de probabilidade normal, para uma probabilidade de abrangência de 95,45%, $k = 2$.

$$U_{95\%} = 2 \cdot U_c \quad (10)$$

4.2.4 Pneus testados em laboratório

Foram selecionados seis pneus novos, porém não são produzidos em série, são pneus protótipos construídos para testes. Cada pneu foi testado cinco vezes e o coeficiente de resistência ao rolamento de cada pneu é a média das cinco medições.

Na Tabela 6 abaixo, é mostrada as principais características de cada pneu:

Tabela 6 – Pneus testados em laboratório

Identific.	Fabricante	Modelo	Composto	Tamanho	Tipo de carga
A	F1	M1	C1	175/70R14	<i>Extra Load</i>
B	F2	M2	C2	175/70R14	<i>Extra Load</i>
C	F3	M3	C3	185/60R15	<i>Extra Load</i>
D	F3	M3	C4	185/60R15	<i>Extra Load</i>
E	F3	M4	C5	205/60R16	<i>Standard Load</i>
F	F3	M5	C6	205/60R16	<i>Standard Load</i>

Fonte: Autoria própria

Os pneus A e B (Figura 22) são iguais em tamanho, capacidade e tipo de carga, tipo de uso (*on road*) e pressão de referência. Comparando-se os coeficientes de resistência ao rolamento desses dois pneus ficará perceptível a diferença entre os fabricantes F1 e F2.

Figura 22 – Pneus A e B



Fonte: Autoria própria

Os pneus C e D (Figura 23) são iguais em praticamente tudo: fabricante, modelo, tamanho, desenho da banda de rodagem, capacidade e tipo de carga, tipo de uso (*on road*) e pressão de referência. A diferença entre os coeficientes de resistência ao rolamento desses dois pneus se dará por conta apenas na diferença do composto de borracha da banda de rodagem C3 e C4.

Figura 23 – Pneus C e D



Fonte: Autoria própria

Os pneus E e F (Figura 24) são iguais em fabricante, tamanho, capacidade e tipo de carga e pressão de referência. A diferença entre esses dois pneus fica por conta do tipo de uso. O pneu E é para uso *on road* (possui melhor desempenho em estradas pavimentadas), enquanto que o pneu F é destinado ao uso *off road* (pode ser usado tanto em estradas pavimentadas como em estradas de terra).

Figura 24 – Pneu E (*on road*) e pneu F (*off road*)



Fonte: Autoria própria

4.3 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

O consumo de combustível foi simulado por um modelo matemático conhecido como modelo de Willans Line descrito por Pavlovic (2016), que diz o seguinte:

$$\text{Potência consumida (P}_{\text{CON}}) = 2,23 \cdot \text{Potencia requerida (P}_{\text{REQ}}) + 6,82 \cdot N \quad (11)$$

Onde N é o número de rotações do motor em rpm.

$$P_{\text{REQ}} = F_T \cdot V \text{ [W]} \quad (12)$$

Onde:

F_T é somatório de todas as forças contrárias ao deslocamento do veículo

V é a velocidade de deslocamento em m/s

Foi visto anteriormente que são 5 as principais forças contrárias ao deslocamento de um veículo. Nessa simulação foi considerado que o veículo está se deslocando com velocidade constante e em uma pista plana, assim, podemos desconsiderar a força de inércia e a força da gravidade respectivamente. Logo, o somatório das forças (F_T) é mostrado na equação 13 abaixo (MICHELIN, 2003):

$$F_T = \underbrace{(C_{\text{RR}} \cdot m \cdot g)}_{F_{\text{RR}}} + \underbrace{(0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_{\text{AERO}} \cdot V^2)}_{F_{\text{AERO}}} + (R_M) \quad (13)$$

Onde:

C_{RR} é o coeficiente de resistência ao rolamento

m é a massa do veículo (kg)

g é a aceleração da gravidade (m/s^2)

ρ é a densidade do ar (kg/m^3)

A é a área frontal do veículo (m^2)

C_{AERO} é o coeficiente de arrasto aerodinâmico

V é a velocidade de deslocamento (m/s)

R_M é a resistência mecânica ou atrito interno motor/transmissão (N) e pode ser considerado constante

Finalmente, o consumo de combustível pode ser calculado através da equação 14 abaixo:

$$\text{Consumo de combustível} = P_{\text{CON}} / E \text{ [l / 100 km]} \quad (14)$$

Onde E é a energia (ou poder calorífico) da gasolina E27 que é a gasolina com a adição de 27% de etanol anidro (Wh/l).

Para alimentar o modelo foram considerados os dados reais de um veículo popular compacto, cujos valores são apresentados na Tabela 7. Em todas as simulações variou-se apenas o coeficiente de resistência ao rolamento de acordo com os valores encontrados nos testes da mancha de areia e através do método do tambor, os demais dados de entrada mantiveram-se constantes.

Tabela 7 – Dados de entrada para simulação do consumo de combustível

Dados	Valores
Massa do veículo	1455 kg
Área frontal	2,098 m ²
Coefficiente de arrasto aerodinâmico	0,391
Velocidade de deslocamento	100 km/h
Rotação do motor	3500 rpm
Poder calorífico da gasolina E27	8593 Wh/l
Resistência mecânica (R_M)	50 N
Aceleração da gravidade	9,81 m/s ²
Densidade do ar	1,2928 kg/m ³

Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS DOS TESTES DA MANCHA DE AREIA

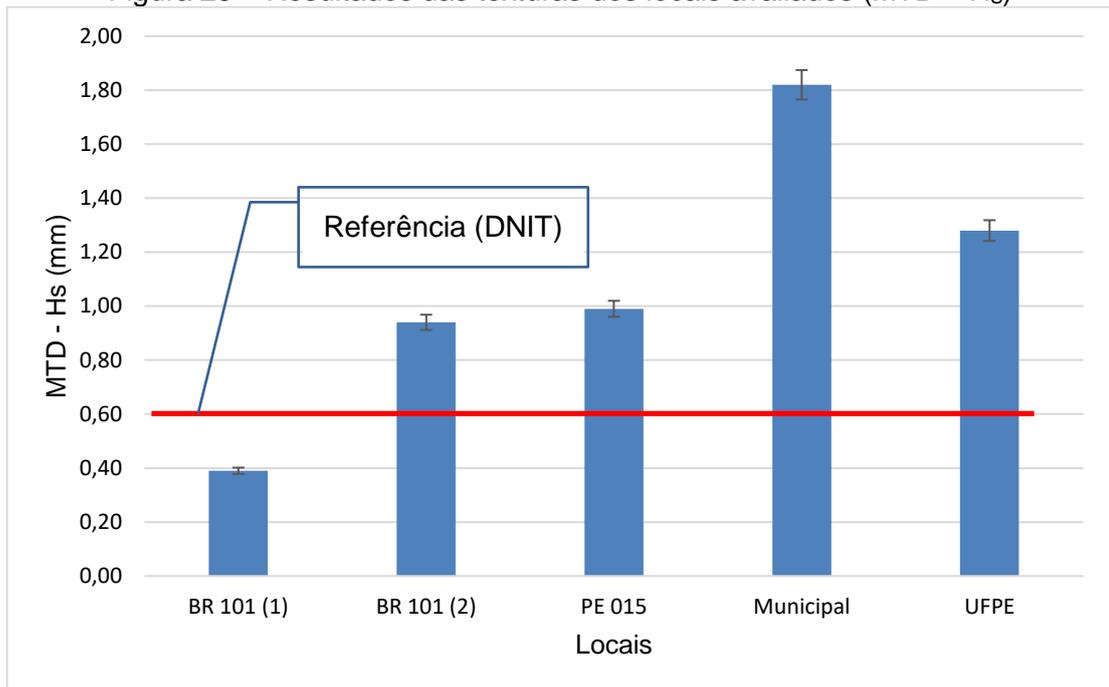
Em cada local foram realizadas medições em três pontos diferentes e em cada mancha de areia o diâmetro foi medido em quatro direções distintas. Utilizando as equações 2 e 3, foi possível calcular o C_{RR} para cada local. As médias dos diâmetros das manchas de areia, assim como a altura média da textura (MTD) e os coeficientes de resistência ao rolamento são mostrados na Tabela 8:

Tabela 8 – Resultados do cálculo do C_{RR} a partir dos testes da mancha de areia

Local	Rodovia	Ø Médio (cm)	MTD (mm)	C_{RR} (kg/t)
1	BR 101 (1)	28,5 ± 0,4	0,39 ± 0,01	8,02 ± 0,01
2	BR 101 (2)	18,4 ± 0,4	0,94 ± 0,03	8,53 ± 0,03
3	PE 015	17,9 ± 1,3	0,99 ± 0,14	8,59 ± 0,13
4	R. Gen. Édson Ramalho	13,2 ± 0,8	1,82 ± 0,20	9,36 ± 0,20
5	Av. Reitor Joaquim Amazonas	15,8 ± 0,4	1,28 ± 0,07	8,85 ± 0,06

Fonte: Autoria própria

Os valores de MTD obtidos e comparados com o valor de referência do DNIT são mostrados na Figura 25.

Figura 25 – Resultados das texturas dos locais avaliados (MTD – H_s)

Fonte: Autoria própria

O único local avaliado em que a textura do pavimento ficou abaixo do valor mínimo de referência estabelecido pelo DNIT foi o local 1, que foi um trecho da BR 101 que passou por recente troca de pavimento. Esse valor de textura abaixo do valor recomendado pelo DNIT pode apresentar risco para a segurança do tráfego, principalmente com o pavimento molhado. Esse trecho recém recapeado não representa a realidade dos pavimentos brasileiros de acordo com os dados da CNT (2018), mas mostra que é possível a construção de um pavimento de boa qualidade e que atenda aos requisitos de eficiência energética.

Os outros 4 locais avaliados, em média, apresentaram um valor de textura pelo menos o dobro do valor de referência, com destaque para o local 4 (municipal) que apresentou um valor de textura 3 vezes o valor de referência e 4,6 vezes o valor do local 1.

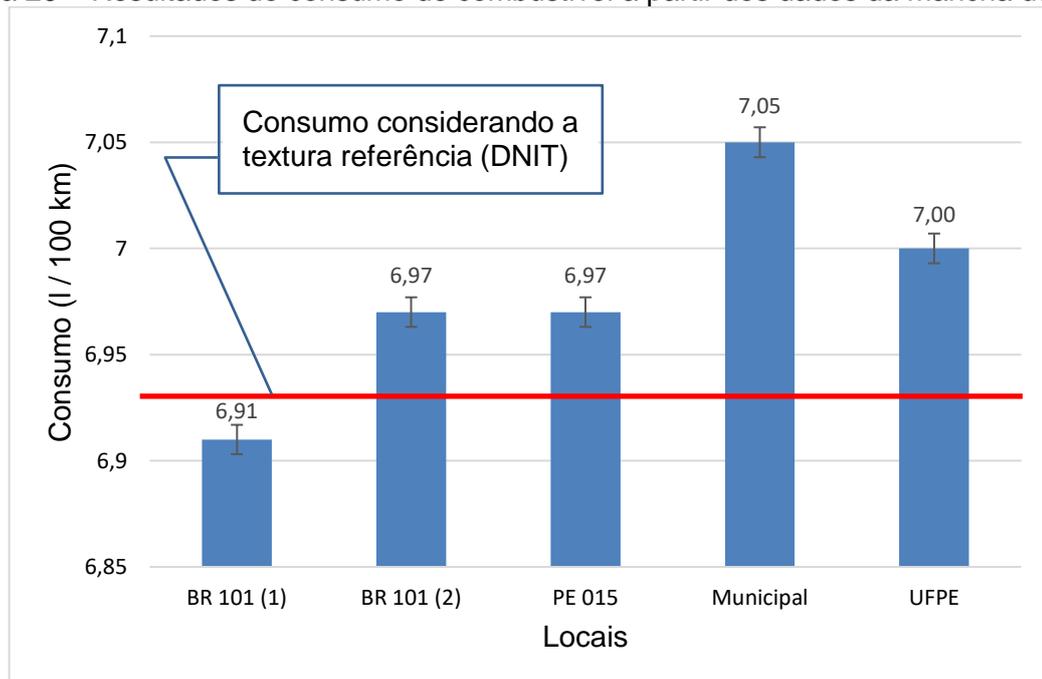
O valor médio da textura (MTD) dos 5 locais avaliados foi de 1,08 mm, 16% maior do que a média das texturas obtidas por Aps (2006) em rodovias na região Sudeste do Brasil. Essa diferença pode ser explicada devido ao fato das medições realizadas por Aps (2006) terem sido realizadas principalmente em rodovias privadas. Segundo a CNT (2018), as rodovias privadas possuem melhores pavimentos quando comparadas com as rodovias sob gestão pública.

5.2 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL A PARTIR DA MANCHA DE AREIA

A partir dos coeficientes de resistência ao rolamento calculados através dos testes da mancha de areia apresentados na Tabela 8, utilizando a equação 14 e os dados de um veículo popular compacto mostrados na Tabela 9, foi possível analisar a variação do consumo de combustível para cada pavimento avaliado. Os resultados são mostrados na Figura 26.

Desconsiderando-se os valores do local 1, que de acordo com a CNT não representa a realidade dos pavimentos brasileiros, os demais locais avaliados apresentam um aumento do consumo de combustível devido aos níveis elevados da macrotextura. Os locais 2, 3, 4 e 5 apresentaram, em média, um aumento de 1,0% no consumo de combustível.

Figura 26 – Resultados do consumo de combustível a partir dos dados da mancha de areia



Fonte: Autoria própria

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (2018), só no estado de Pernambuco, no ano de 2017, foram consumidos aproximadamente 2 bilhões de litros de gasolina e etanol. Uma redução de 1,0% no consumo geraria uma economia de 20 milhões de litros de combustível.

A redução no consumo de combustível, além do fator econômico e não menos importante, geraria uma redução da emissão de CO₂. De acordo com o Balanço

Energético Nacional (Ministério de Minas e Energia, 2018), no estado de Pernambuco, em 2017, foram emitidos a partir de automóveis e veículos comerciais leves aproximadamente 3,4 milhões de toneladas de CO₂. Uma redução de 1,0% no de consumo, geraria uma redução de 34 mil toneladas de CO₂ emitidos.

5.3 RESULTADOS DOS TESTES UTILIZANDO O MÉTODO DO TAMBOR

Em cada pneu foram realizados 5 testes de resistência ao rolamento em laboratório seguindo a metodologia descrita na norma ISO 28580. Utilizando as equações 7, 8, 9 e 10, foram calculadas as incertezas expandidas absolutas e as incertezas expandidas relativas. A média do C_{RR} dos 5 resultados de cada pneu está apresentado na Tabela 9 com suas respectivas incertezas.

Tabela 9 – Pneus testados em laboratório através do método do tambor

Identificação	Tamanho	C _{RR} médio [kg/t]	Incerteza absoluta [kg/t]	Incerteza relativa
A	175/70R14	7,06	0,211	3,0 %
B	175/70R14	7,86	0,211	2,7 %
C	185/60R15	6,89	0,210	3,0 %
D	185/60R15	7,90	0,211	2,7 %
E	205/60R16	8,15	0,192	2,4 %
F	205/60R16	9,52	0,192	2,0 %

Fonte: Autoria própria

No comparativo com o pneu A, o pneu B apresentou um coeficiente de resistência ao rolamento médio 11,3% maior. Estes pneus possuem as mesmas características, diferindo apenas o fabricante.

Comparando-se os pneus C e D, observamos que o pneu D possui um coeficiente de resistência ao rolamento 14,7% maior. Nesse comparativo, os dois pneus possuem as mesmas características, inclusive o mesmo fabricante e a única diferença é a composição da borracha da banda de rodagem. Essa diferença de C_{RR}

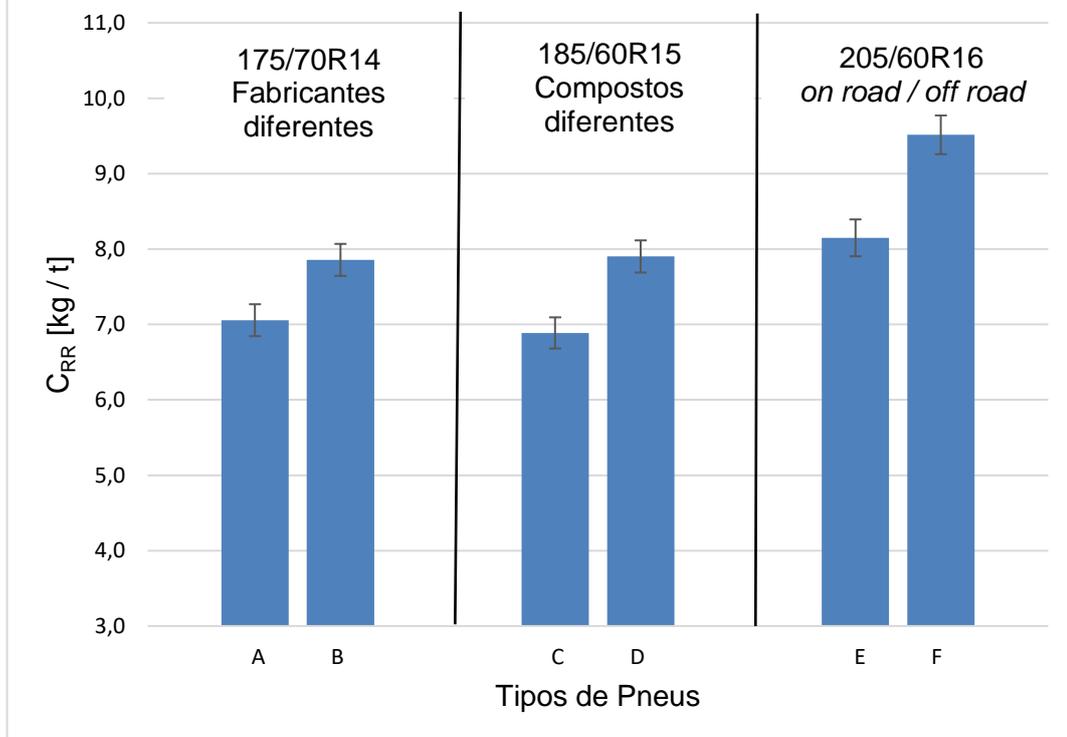
evidencia o quão importante é a qualidade do processo produtivo dos fabricantes de pneus.

Entre os pneus E e F, que possuem características semelhantes inclusive o mesmo fabricante e diferem no tipo de uso para o qual são destinados, o pneu F que é destinado para um uso *off road*, apresentou o C_{RR} médio 16,8% maior que o pneu E que é destinado ao uso *on road*.

As incertezas expandidas para uma confiabilidade de aproximadamente 95% ficaram entre 2,0% e 3,0%.

Os resultados são apresentados graficamente na Figura 27 abaixo:

Figura 27 – C_{RR} dos diferentes tipos de pneus medido através do método do tambor



Fonte: Autoria própria

5.4 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL A PARTIR DO MÉTODO DO TAMBOR

Utilizando a equação 14 apresentada anteriormente, os dados de um veículo popular compacto mostrados na Tabela 9 e variando apenas o coeficiente de resistência ao rolamento obtido através do método do tambor e mostrados na seção 5.3, foi possível analisar a variação do consumo de combustível para cada tipo de pneu. Os resultados são mostrados na Tabela 10 abaixo:

Tabela 10 – Consumo de combustível a partir do C_{RR} obtido pelo método do tambor

Identificação	Tamanho	C_{RR} médio [kg/t]	Consumo de combustível [l / 100 km]
A	175/70R14	7,06	6,81
B	175/70R14	7,86	6,90
C	185/60R15	6,89	6,80
D	185/60R15	7,90	6,90
E	205/60R16	8,15	6,93
F	205/60R16	9,52	7,07

Fonte: Autoria própria

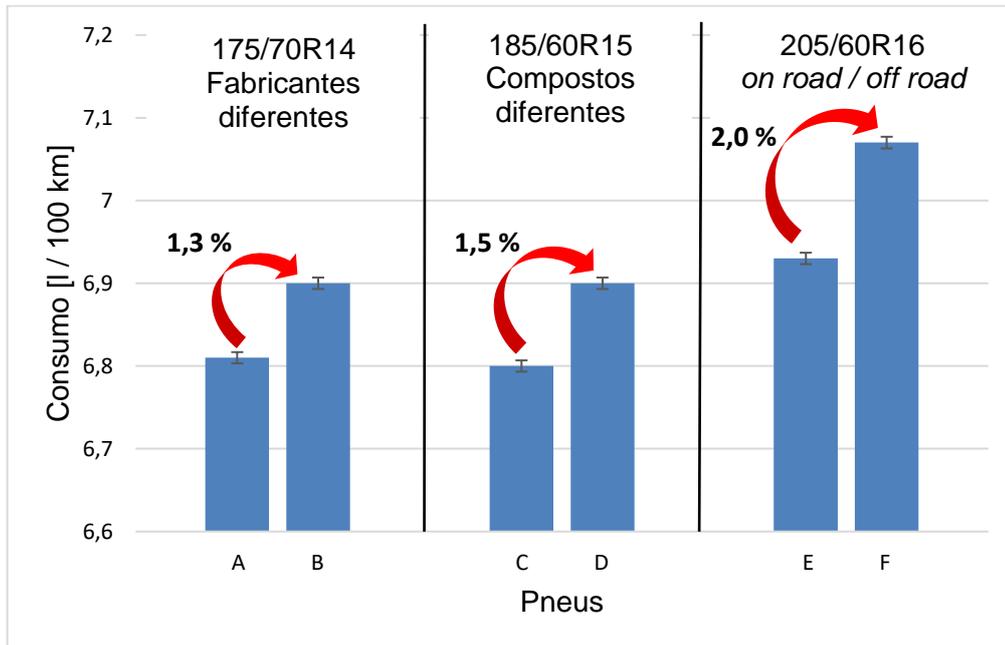
Mantendo-se os comparativos anteriores, entre os pneus A e B, o pneu B apresentou um aumento no consumo de combustível 1,3% comparado com o consumo do veículo montado com o pneu A. Estes pneus possuem as mesmas características, diferindo apenas o fabricante.

No comparativo entre os pneus C e D, foi observado no cálculo do consumo de combustível que o pneu D apresentou um consumo 1,5% maior do que o consumo observado com o veículo montado com o pneu C. Nesse comparativo, os dois pneus possuem as mesmas características, inclusive o mesmo fabricante e a única diferença é a composição da borracha da banda de rodagem.

Entre os pneus E e F, que possuem características semelhantes inclusive o mesmo fabricante e diferem no tipo de uso para o qual são destinados, o pneu F que é destinado para um uso *off road*, apresentou um consumo de combustível 2,0% maior que o pneu E que é destinado ao uso *on road*.

Os resultados são apresentados graficamente na Figura 28 abaixo:

Figura 28 – Consumo de combustível a partir do C_{RR} obtido pelo método do tambor



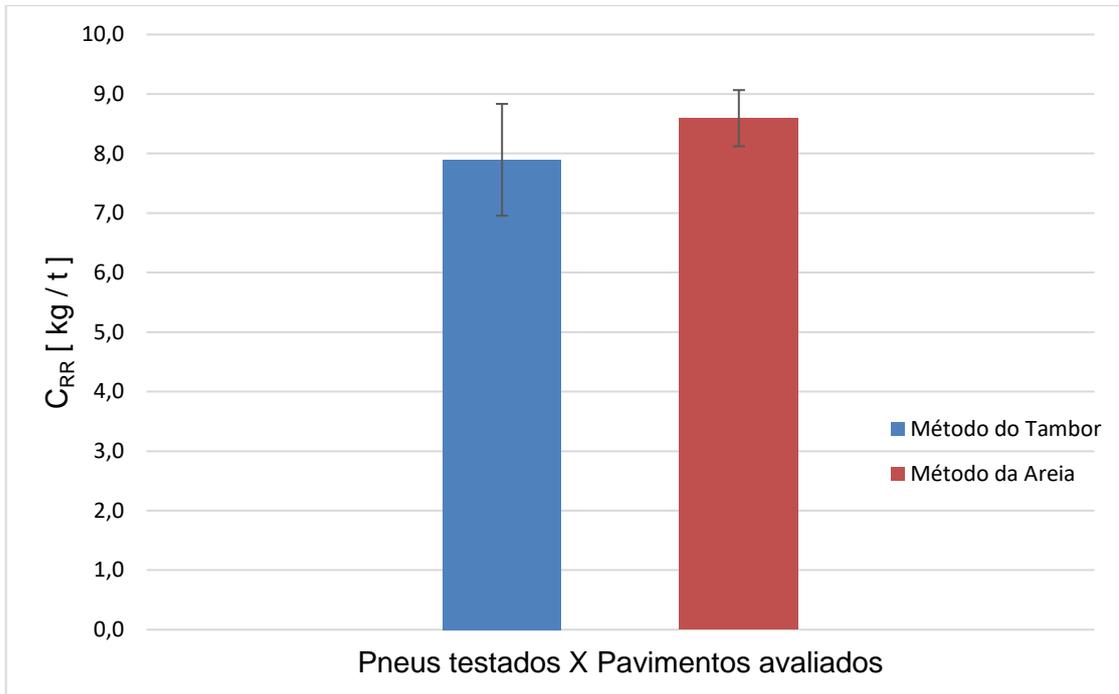
Fonte: Autoria própria

Os testes de resistência ao rolamento realizados em laboratório mostraram a importância de se manter os pneus com as mesmas características dos originais, pois estes certamente passaram por sucessivos testes pela montadora e atingiram bons índices de performance não só no quesito de resistência ao rolamento como também em capacidade de frenagem, dirigibilidade, conforto e ruído.

É importante também que os fabricantes de pneus mantenham um rigoroso controle de qualidade da produção, pois uma pequena variação da composição da borracha pode acarretar uma significativa mudança de comportamento dos pneus.

5.5 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DA MANCHA DE AREIA

Os valores estimados dos coeficientes de resistência ao rolamento obtidos através do método da mancha de areia se mostraram em concordância com os valores obtidos através do método do tambor, conforme mostrado na Figura 29.

Figura 29 - C_{RR} Método do Tambor X C_{RR} Método da mancha de Areia

Fonte: Autoria própria

Isso mostra que o método da mancha de areia para medir a textura do pavimento, que é um método simples e barato, junto com o modelo matemático descrito por Hooghwerff (2013) utilizado para estimar o coeficiente de resistência ao rolamento a partir do valor da textura, podem ser utilizados para estimar o coeficiente de resistência ao rolamento médio de um pavimento asfáltico específico.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que a variação da textura dos pavimentos asfálticos não é insignificante do ponto de vista econômico e ambiental. Se os pavimentos fossem projetados, construídos e mantidos com foco em eficiência energética, o retorno seria positivo não só em termos monetários, mas também em termos ambientais.

Foi observada uma variação de 460% no nível de textura média (MTD) entre os locais com as melhores e piores texturas.

A partir dos dados de textura dos pavimentos, medidos através do método da mancha de areia e utilizando o modelo de Hooghwerff (2013), foi observada uma variação de até 16,7% no C_{RR} dos pavimentos avaliados.

A resistência ao rolamento dos pneus medida pelo método do tambor (laboratório) mostrou uma variação de até 16,8% no C_{RR} entre pneus semelhantes.

Os valores estimados dos coeficientes de resistência ao rolamento obtidos através do método da mancha de areia se mostraram em concordância com os valores obtidos através do método do tambor. Isso mostra que o método da mancha de areia, que é um método simples e barato, junto com o modelo matemático descrito por Hooghwerff (2013), podem ser utilizados para estimar o C_{RR} médio de um pavimento asfáltico específico.

A partir dos dados de textura obtidos através do método da mancha de areia, foi observado um acréscimo médio de 1,0% no consumo de combustível devido aos elevados níveis de textura. Só no estado de Pernambuco, 1,0% do consumo de gasolina e etanol correspondeu a 20 milhões de litros no ano de 2017. Essa redução de consumo também geraria uma redução na emissão de CO_2 , principal gás de efeito estufa, de 34 mil toneladas.

Entre os coeficientes de resistência ao rolamento medidos em laboratório, entre pneus semelhantes (mesmo tamanho), foi observada uma variação de até 2,0% no consumo de combustível e conseqüentemente na emissão de CO_2 .

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Validar o método da mancha de areia para a medição de texturas de pavimentos de concreto.
- Calcular a resistência ao rolamento levando em consideração, além da textura, a rigidez do pavimento.
- Desenvolver um modelo para o cálculo da resistência ao rolamento para veículos pesados (ônibus e caminhões) a partir das características dos pavimentos.
- Para o método do tambor, realizar os testes com uma lixa na superfície do tambor, simulando diferentes texturas e avaliar o impacto na resistência ao rolamento.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. São Paulo. Ed. Manole, 2008.
- ANDERSEN, L. G. et al. **Rolling Resistance Measurement and Model Development**. Journal of Transportation Engineering. V. 141, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000673.
- ANP. **Seminário de Avaliação do Mercado de Combustíveis**. 2018. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/images/Palestras/seminario_avaliacao_2018.pdf>. Acesso em: 18 set. 2018.
- APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado *IFI* – *International Friction Index* para revestimentos asfálticos**. Tese, Engenharia. 2006, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ARTERIS. **Medição da profundidade da macrotextura de pavimentos utilizando técnica volumétrica**. 2016. Disponível em: <http://www.arteris.com.br/institucional/especificacoes-tecnicas.aspx>. Acesso em: 31 nov. 2017.
- ASTM E 965. **Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. 1996. Annual Book of ASTM Standards, USA.
- BARBOSA, T. A. F. **Pneu Verde – Desafios para equilibrar conforto, segurança e baixo consumo de combustível**. Pós-graduação em Engenharia Automotiva. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul. 2013.
- BASTOS, C. F. **Análise da influência dos métodos de cálculo da força resistiva total ao deslocamento de um veículo leve na determinação do consumo de combustível e na emissão de co2 no ciclo urbano**. Dissertação, Engenharia Mecânica. 2016, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- BENNETT, C., R. AND GREENWOOD, I., D. **Modelling Road User and Environmental Effects in HDM-4**. No 7 in the Highway Development and Management Series. Version 3.0- Dezembro, 2003. ISBN: 2-84060-103-6.
- BERGIERS, A.; GOUBERT, L.; ANFOSSO-LÉDÉE, F.; DUJARDIN, N.; EJSMONT, J. A.; SANDBERG, U.; ZÖLLER, M. **Comparison of Rolling Resistance Measuring Equipment - Pilot Study**. 2011. Deliverable No. 3 of MIRIAM.

BOERE S. et al. **Tyre/road interaction model for the prediction of road texture influence on rolling resistance**. International Journal of Vehicle Design, V. 65. 2014. DOI: 10.1504/IJVD.2014.060815.

CARDOSO, F. A. **Estudo do desempenho dos compostos de borracha utilizados na fabricação da banda de rodagem dos pneus automotivos em função dos pavimentos das rodovias**. Dissertação, Escola Politécnica - Engenharia Mecânica. 2010, Universidade de São Paulo.

CHO J. R. et al. **Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire**. International Journal of Solids and Structures, V. 50, p. 86-96. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.09.004>.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018**: relatório gerencial. – Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2018. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>. Acesso em: 06 nov. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT (2006). **Manual de restauração de Pavimentos Asfálticos**, 2006. IPR 720. 2ª edição. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO – DENATRAN. **Frota de veículos - 2018**. Brasília: Sinet/Denatran/Detrans. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/estatistica/635-frota-2018>>. Acesso em: 27 mar. 2018.

EJSMONT J. et al. **Influence of load and inflation pressure on the tyre rolling resistance**. International Journal of Automotive Technology, V. 17, p. 237-244. 2016. DOI 10.1007/s12239-016-0023-z.

EJSMONT J. et al. **Influence of temperature on the tyre rolling resistance**. International Journal of Automotive Technology, V. 19, p. 45-54. 2018. DOI 10.1007/s12239-018-0005-4.

FANZHU L. et al. **Thermo-mechanical coupling analysis of transient temperature and rolling resistance for solid rubber tire: Numerical simulation and experimental verification**. Composites Science and Technology, V. 167, p. 404-410. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.08.034>.

FEDERAÇÃO NACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES – FENABRAVE. **Anuário 2016: O Desempenho da Distribuição Automotiva no Brasil.** - São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www3.fenabrave.org.br:8082/plus/modulos/listas/index.php?tac=indices-e-numeros&idtipo=6&id=704&layout=indices-e-numeros>. Acesso em: 21 mar. 2018.

FONTARAS, G., ZACHAROF, N. G., CIUFFO, B. **Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe-Laboratory versus real-world emissions.** Progress in Energy and Combustion Science, V. 60, p. 97-131. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2016.12.004>.

GALI, M. R. **Modelo analítico de resistência ao rolamento de pneus de carga.** Campinas: Dissertação de mestrado da Universidade Estadual de Campinas, 2015.

GENT, A. N., WALTER, J. D. **The pneumatic tire**, 2005. U.S. Dept. of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration - NHTSA, Washington, DC.

HAO X. et al. **Evaluation and Comparison of Real-Time Laser and Electric Sand-Patch Pavement Texture-Depth Measurement Methods.** Journal of Transportation Engineering, V. 142. 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000842.

HILONGA A. et al. **Synthesis of mesoporous silica with superior properties suitable for green tire.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry, V. 18, p. 1841-1844. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2012.04.015>.

HOLMBERG, K., ANDERSSON, P., ERDEMIR, A.: **Global energy consumption due to friction in passenger cars**, Tribology International, Vol. 47, pp. 221-234, 2012.

HOOGHWERFF, J., E.W. van Gils, and H. F. Reinink. **Influence of Road Surface Type on Rolling Resistance.** M+P Raadgevende Ingenieurs BV and Rijkwaterstaat, 2013.

INOVAR-AUTO. **Decreto-Lei nº 7.819**, de 3 de outubro de 2012. Regulamenta os arts. 40 a 44 da Lei nº 12.715, de 17 de setembro de 2012, que dispõe sobre o Programa de Incentivo à Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores - INOVAR-AUTO, e os arts. 5º e 6º da Lei nº 12.546, de 14 de dezembro de 2011, que dispõe sobre redução do Imposto sobre Produtos Industrializados, na hipótese que especifica. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/Decreto/D7819.htm> Acesso em: 23 nov. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 18164, **Passenger car, truck, bus and motorcycle tyres — Methods of measuring rolling resistance**. 2005. Geneva, Switzerland.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 28580. **Passenger car, truck and bus tyres - Methods of measuring rolling resistance - Single point test and correlation of measurement results**. 2009. Geneva, Switzerland.

LEAL, L. C. M.; ROSA, E.; NICOLLAZZI, L. C. **Uma introdução à modelagem quase-estática de veículos automotores de rodas**. Publicação interna do GRANTE – Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Florianópolis. 2012.

LEBLANC, J., **Rubber-Filler Interactions and Rheological Properties in Filled Compounds**, Prog. Polym. Sci., Vol. 27, 2002, pp. 627–687.

MICHELIN. **The Tyre. Rolling Resistance and Fuel Savings**. 2003. France.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa: Relatórios de referência, Emissões de gases de efeito estufa no transporte rodoviário, no setor energético**. Brasília, 2015. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/publicacoes>. Acesso em: 18 maio 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional**. Brasília, 2017. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf. Acesso em: 18 maio 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional**. Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202018-ab%202017vff.pdf>. Acesso em: 25 set. 2018.

PAVLOVIC, J.; MAROTTA, A.; CIUFFO, B. **CO2 emissions and energy demands of vehicles tested under the NEDC and the new WLTP type approval test procedures**. Applied Energy. 2016, V. 177, p. 661–670. doi:10.1016/j.apenergy.2016.05.110.

PUZZO L. et al. **Three-dimensional survey method of pavement texture using photographic equipment**. Measurement, V. 111, p. 146-157. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.040>.

REDROUTHU, B. M.; DAS, S. **Tyre modelling for rolling resistance**. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 2014

SANDBERG, U., et al. **Road surface influence on tyre/road rolling resistance**. Models for Rolling Resistance in Road Infrastructure Asset Management Systems (MIRIAM), 2011b. Disponível em: <http://miriam-co2.net/Publications/MIRIAM_SP1_Road-Surf-Infl_Report%20111231.pdf>.

SANDBERG, U., et al. **Rolling resistance - Basic information and state-of-the-art on measurement methods**. Models for Rolling Resistance in Road Infrastructure Asset Management Systems (MIRIAM), 2011a. Disponível em: <http://miriam-co2.net/Publications/MIRIAM_SoA_Report_Final_110601.pdf>.

SANDBERG, Ulf. **Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related to Environment, Economy and Safety – A State-of-the-Art Study Regarding Measures and Measuring Methods**. VTI Notat 53A-1997, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), 1997. Linköping, Sweden.

SCHURING, D.J. **A New Look at the Definition of Tire Rolling Loss**. 1977. In Tire Rolling Losses and Fuel Economy - An R&D Planning Workshop. Proc. of 1977 SAE Conference, p. 74.

SHAKIBA M. et al. **Mechanics based model for predicting structure-induced rolling resistance (SRR) of the tire-pavement system**. Mech Time-Depend Mater, V. 20, p. 579-600. 2016. DOI 10.1007/s11043-016-9313-0.

SILVEIRA, F. L. **Potência de tração de um veículo automotor que se movimenta com velocidade constante**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 1, p. 1304, 2011. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/331304.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2018.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS – SAE J1269. **Rolling Resistance Measurement Procedure for Passenger Car, Light Truck, and Highway Truck and Bus Tires**. 2006. Issued 1979-11, Revised 2006-09, Superseding J1269 SEP2000, p. 5. Warrendale, PA.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS – SAE J2452. **Stepwise coastdown methodology for measuring tire rolling resistance**. 1999. Warrendale, PA.

SRIVASTAVA V. K.; BASAK G. C.; MAITI M.; JASRA R. V. **Synthesis and utilization of epoxidized polybutadiene rubber as an alternate compatibilizer in green-tire composites**. International Journal Ind. Chem. V. 8, p. 411-424. 2017. <https://doi.org/10.1007/s40090-017-0130-3>.

TAGHAVIFAR H; MARDANI A. **Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire.** Journal of Terramechanics, V. 50, p. 99-106. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2013.01.005>.

VAN HAASTER, B.; WORRELL E.; FORTUIN J. P. F.; VAN VLIET W. J. **Potential Energy Savings by Reducing Rolling Resistance of Dutch Road Pavements.** Journal of Materials in Civil Engineering. V. 27, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000999.

ZAFARMEHRABIAN, R.; GANGALI, S. T.; GHOREISHY, M. H. R.; DAVALLU, M. **The Effects of Silica/Carbon Black Ratio on the Dynamic Properties of the Tread compounds in Truck Tires.** E-Journal of Chemistry, vol. 9, no. 3, pp. 1102-1112, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/571957>.

ZHOU X. et al. **Design and synthesis by redox polymerization of a bio-based carboxylic elastomer for green tire.** Sci China Chem, V. 58, p. 1561-1569. 2015. doi: 10.1007/s11426-015-5332-y.