



MARCOS RODOLFO GALI

Modelo Analítico de Resistência ao Rolamento de Pneus de Carga

50/2015

CAMPINAS

2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

MARCOS RODOLFO GALI

Modelo Analítico de Resistência ao Rolamento de Pneus de Carga

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

Orientador: Prof. Dr. José Maria Campos Dos Santos

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO Marcos Rodolfo Gali, E ORIENTADO PELO PROF. DR. José Maria Campos Dos Santos.

.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2015

iii

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza – CRB 8/8098

G133m Gali, Marcos Rodolfo, 1980-
Modelo analítico de resistência ao rolamento de pneus de carga / Marcos Rodolfo Gali. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: José Maria Campos Dos Santos.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Método Analítico. 2. Resistência ao rolamento. 3. Pneus. 4. Viscoelasticidade. I. Santos, José Maria Campos dos, 1953-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Analytical model of truck tires' rolling resistance

Palavras-chave em inglês:

Analytical Method

Rolling resistance

Tires

Viscoelasticity

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Maria Campos Dos Santos

Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

Prof. Dr. Argemiro Luis de Aragão Costa

Data da defesa: 25-03-2015

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL.

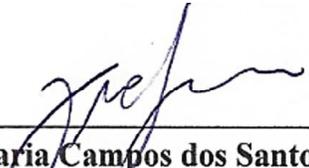
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Modelo Analítico de Resistência ao Rolamento de Pneus de Carga

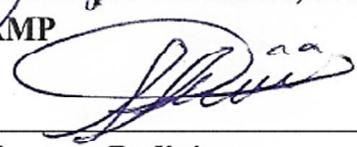
Autor: Marcos Rodolfo Gali

Orientador: Prof. Dr. José Maria Campos Dos Santos

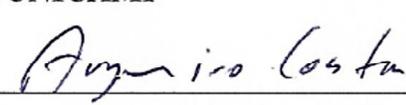
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. José Maria Campos dos Santos, Presidente
DMC/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini
DSI/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Argemiro Luis de Aragão Costa
Pirelli Pneus/Santo André

Campinas, 25 de março de 2015

Dedicatória

Com o coração repleto de amor e alegria, dedico esse trabalho aos meus pais Natalina e Germano, e aos meus irmãos Marta e Celso que sempre me motivaram e me apoiaram, não somente durante meus estudos, mas sim durante todas minhas conquistas, participando ativamente em todas elas.

Em especial dedico a minha esposa e amiga Paula Gali, que esteve sempre ao meu lado durante esta empreitada, me dando incentivo e força para superar os obstáculos que são inerentes a qualquer processo de crescimento e amadurecimento.

A toda minha família meu sempre muito obrigado.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pela força, paciência e sabedoria necessária para superar todos os momentos de dificuldade durante a execução deste trabalho e principalmente pela oportunidade de subir mais um degrau na escada do conhecimento.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Maria C. Dos Santos, pela grande oportunidade, confiança e dedicação em me guiar e orientar nos caminhos do aprendizado. Ao senhor meu muito obrigado por me permitir fazer parte do seu grupo de pesquisa.

Aos membros das bancas de qualificação e defesa Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles, Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini e Prof. Dr. Argemiro Luis de Aragão Costa, pelas sugestões e conselhos para o melhoramento deste trabalho

À Pirelli Pneus Ltda pelo incentivo, tempo e recursos fornecidos.

Aos meus amigos Anderson Calhabeu, Luiz Mari, Rubens Pinati, Matheus Barbosa, Thiago Rieger, Argemiro Costa, Henry Fornitano, Cleferson Carlos, Hélio Arai e aos operadores do Laboratório Indoor, que me forneceram essencial colaboração para o desenvolvimento do trabalho.

E em especial ao meu amigo Renan Ozelo, que foi o grande motivador para essa conquista, não somente por ter me apoiado, mas por toda orientação quando encontrei dificuldades durante a presente pesquisa.

À coordenação do curso de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.

“A vida é como andar de bicicleta. Para manter seu equilíbrio você deve continuar em movimento”

Albert Einstein

Resumo

Em 2012, Rhyne & Cron desenvolveram um modelo analítico para estimar a mínima Resistência ao Rolamento (RR) para pneus destinados aos veículos de passageiro. Os parâmetros estudados pelos autores foram a área de contato, a espessura e a largura da rodagem, o raio da cintura metálica, o módulo elástico do composto da banda de rodagem, a carga vertical imposta, a pressão de inflação do pneu e a área efetiva de contato do pneu com o solo. Para o fator área de contato, os autores simplificaram a abordagem matemática que defini a interação entre o pneu e o pavimento, não considerando a área total formada devido à deformação na região de interação com o pavimento (que muda com a pressão interna do pneu e com a carga imposta sobre o mesmo).

O objetivo do presente estudo foi desenvolver um modelo analítico baseado no modelo de Rhyne & Cron, para estimar a resistência ao rolamento de pneus de carga, considerando a área de contato formada na região de interação entre o pneu e o pavimento.

Os modelos analíticos foram implementados em MatLab versão R2008a para obtenção das curvas de resistência ao rolamento e compará-las com as curvas obtidas através de modelo numérico que interagiu com um modelo de elementos finitos (FEM). Os resultados dos modelos analíticos e numéricos foram validados e comparados com resultados experimentais obtidos em laboratório segundo condições da norma ISO 28.580.

Os resultados obtidos através do modelo analítico proposto mostraram uma satisfatória correlação comportamental quando comparados com as curvas experimentais, sendo uma ferramenta interessante durante o desenvolvimento do projeto do pneu, pois permite ter uma estimativa da resistência ao rolamento.

Palavras chave: Modelo Analítico, resistência ao rolamento, viscoelasticidade e histerese.

Abstract

In 2012, Rhyne & Cron developed an analytical model to estimate the minimum Rolling Resistance (RR) for tires intended for passenger vehicles. The parameters studied by the authors were the contact area, the thickness and width of the tread, the radius of the metal belt, elastic modulus of the tread compound, the imposed vertical load, the tire inflation pressure and effective contact area tire with ground. For contact area's factor, the authors simplified the mathematical approach that define the interaction between the tire and the ground, not considering the total area formed due to deformation in the interaction region with the ground (which changes with the tire internal pressure and the imposed load).

The objective of this study was to develop an analytical model based on the Rhyne & Cron model to estimate the truck tires' rolling resistance, considering the contact area formed at the interaction region between the tire and the pavement.

The analytical models were implemented in MatLab R2008a version to obtain the rolling resistance curves and compare them with the curves obtained through numerical model that interacted with a finite element model (FEM). The results of analytical and numerical models were validated by comparison with experimental results obtained according ISO 28580 standard.

The obtained results using the proposed analytical model showed a satisfactory behavioral correlation when compared with the experimental curves, being an interesting tool for the development of tire design because it allows having an estimation of the rolling resistance.

Keywords: Analytical model, rolling resistance, viscoelasticity and hysteresis.

Lista de Ilustrações

Figura 1-1 - Linha de tempo da implementação da etiqueta para pneus segundo a portaria nº 544/12 de 25 de outubro de 2012 para pneus comercializados no Brasil, sendo eles pneus de automóveis de passageiros (inclusive os de uso misto e rebocados) e os pneus destinados à veículos comerciais, comerciais leves e rebocados.	2
Figura 1-2 - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, segundo portaria nº 544/12 do Inmetro. Os parâmetros mostrados na etiqueta são: 1. Eficiência Energética, 2. Aderência em pista molhada, 3. Nível de Emissão de Ruído, 4. Logo do Inmetro e 5. Logo da Conpet (Programa Nacional da Racionalização do uso dos Derivados do Petróleo e Gás Natural).	3
Figura 2-1 - Estrutura de um pneu de carga (Gali, Ozelo, Costa, & Campos, 2014).	8
Figura 2-2 - Representação do modelo viscoelástico de Maxwell (Tomazini, 2012).....	10
Figura 2-3 - Representação do modelo viscoelástico de Voigt (Tomazini, 2012).....	11
Figura 2-4 - Modelo viscoelástico Generalizado de Maxwell.	11
Figura 2-5 - Representação da histerese na curva tensão-deformação.	12
Figura 2-6 - Defasagem entre a tensão e deformação do composto de borracha.....	13
Figura 2-7 - Contribuição de RR por componentes obtidos através de modelo numérico de um pneu comercial de medida 295/80 R22.5.	15
Figura 2-8 - Efeito da carga vertical na resistência ao rolamento de um pneu destinado ao carro de passageiros. A resistência ao rolamento é plotada em relação a carga vertical, considerando-a como 80% da máxima carga permitida para o pneu. (LaClair, 2006)	17
Figura 2-9 - Gráfico do coeficiente de resistência ao rolamento de um pneu de utilização em veículos de passageiros, variando pressão e carga vertical (Lambillotte, 2011).	18
Figura 2-10 – Influência da pressão de inflação do pneu na resistência ao rolamento para (a) pneus destinados aos veículos de passageiros e (b) para pneus destinados aos veículos de carga. A resistência ao rolamento é plotada é plotada como sendo uma porcentagem do valor nominal de pressão de inflação do pneu. (LaClair, 2006).....	19
Figura 2-11 - Efeito da velocidade na resistência ao rolamento, o qual é plotada com sendo uma porcentagem da velocidade medida a 80 km/h. (LaClair, 2006)	20
Figura 2-12 - Coeficientes para a equação 2.3.2 (Gillespie, 1992).	23

Figura 3-1 - Energia dissipada do pneu (Rhyne & Cron, 2012).	25
Figura 3-2 - Tensão de compressão imposta na banda de rodagem (Rhyne & Cron, 2012).26	
Figura 3-3 – Esforço de cisalhamento longitudinal imposta na banda de rodagem do pneu, em contato com o pavimento. (Rhyne & Cron, 2012).....	27
Figura 3-4 - Relação entre tensão e deformação.	32
Figura 3-5 - Área de contato devido ao amassamento do pneu sobre o pavimento.....	34
Figura 3-6 - Desenho esquemático da máquina para medição da Resistência ao Rolamento de pneus (LaClair, 2006).	38
Figura 3-7 - Orientação para medição de resistência ao rolamento em laboratório (Norma ISO 28580).	39
Figura 5-1 – Componentes de dissipação de energia na banda de rodagem. As curvas acima foram obtidas com dados geométricos e de material de um pneu de passeio 205/55R16. (Rhyne & Cron, 2012).....	49
Figura 5-2 - Componentes de dissipação de energia na banda de rodagem, plotados através do programa em MatLab desenvolvido para este trabalho. Para a plotagem das curvas acima, foram utilizados os dados geométricos e de material de um pneu de passeio 205/55R16 apresentados no artigo de Rhyne & Cron.	50
Figura 5-3 – Coeficiente de resistência ao rolamento variando a carga vertical aplicada no pneu. As curvas acima foram obtidas com dados geométricos e de material de um pneu de passeio 205/55R16. (Rhyne & Cron, 2012).....	51
Figura 5-4 - Coeficiente de resistência ao rolamento variando a carga vertical aplicada no pneu, plotado através do programa de MatLab desenvolvido para este trabalho. Para a plotagem das curvas acima, foram utilizados os dados geométricos e de material de um pneu de passeio 205/55R16 apresentados no artigo de Rhyne & Cron.	51

Figura 5-5 – Medição dos parâmetros necessário para o modelo analítico, utilizando uma seção do pneu 295/80R22.5. (Gali, Ozelo, Costa, & Campos, 2014). P : Pressão de inflação = variando de 0 a 1 Mpa com discretização de 0.1 Mpa; F_z : Carga vertical aplicada no pneu = variando de 400N a 4100N sem discretização definida; h : Espessura da banda de rodagem = 21mm; W : Largura da banda de rodagem = 243mm; csr : Razão da superfície de contato do pneu com o solo = 0,72; R_B : Raio da cintura metálica do pneu = 507,5mm; $\tan \delta$: Propriedade polimérica do composto da banda de rodagem = 0,158; E : Módulo elástico do composto de borracha da banda de rodagem = 7.1 Mpa;	52
Figura 5-6 - Componentes de dissipação de energia na banda de rodagem para um pneu de carga 295/80R22.5, segundo modelo analítico de Rhyne & Cron.	53
Figura 5-7 - Resistência ao rolamento, com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, variando pressão de inflação e carga vertical aplicada no pneu 295/80R22.5, utilizando modelo analítico de Rhyne & Cron.	54
Figura 5-8 - Resistência ao rolamento, com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, variando pressão de inflação e carga vertical aplicada no pneu 295/80R22.5, utilizando modelo numérico.	55
Figura 5-9 - Levantamento estatístico de 6 medições do CRR , com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, de um mesmo pneu 295/80R22.5 para verificar a repetitividade dos resultados obtidos em laboratório. Desvio padrão = 0,007.	56
Figura 5-10 - Resistência ao rolamento, com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, variando pressão de inflação e carga vertical aplicada no pneu 295/80R22.5, curvas experimentais conforme condições da norma ISO 28580.	57
Figura 5-11 - Resistência ao rolamento, com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, variando pressão de inflação e carga vertical aplicada no pneu 295/80R22.5, utilizando o modelo analítico proposto.	58
Figura 5-12 - Coeficiente de Resistência ao Rolamento, com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, obtido através do modelo analítico de Rhyne & Cron para um pneu de carga 295/80R22.5.	59

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 - Coeficiente relativo ao tipo de Superfície do Pavimento para as equações 2.3.4 e 2.3.5 (Gillespie, 1992).	24
Tabela 3-1 - Condições para realização do teste em laboratório para determinação da resistência ao rolamento de pneus, segundo a norma internacional ISO 28580. Onde LI é “load index” ou índice de carga do pneu.....	38

Lista de Abreviações e Siglas

Letras Latinas

K	-	Constante elástica do composto de borracha
E'	-	Módulo elástico do composto de borracha
E''	-	Módulo dissipativo ou viscoso do composto de borracha
CRR	-	Coefficiente de resistência ao rolamento (adimensional)
V	-	Volume do material deformado
F_R	-	Força de resistência ao rolamento do pneu
F_z	-	Carga vertical imposta ao pneu
c_r	-	Coefficiente relativo ao tipo de superfície do pavimento
P	-	Pressão de inflação do pneu
x	-	Distância entre o centro e o final da área de contato do pneu com o pavimento
R_B	-	Raio da cintura metálica do pneu
L	-	Comprimento total da área de contato do pneu com o pavimento
E	-	Densidade de energia de deformação
W	-	Largura da Rodagem
h	-	Espessura de borracha entre cintura metálica e superfície da banda de rodagem
csr	-	Razão da superfície de contato do pneu com o solo

Letras Gregas

σ	-	Tensão
ε	-	Deformação
η	-	Viscosidade dinâmica do fluido
δ	-	Defasagem entre a tensão e deformação do composto de borracha
σ_z	-	Tensão de compressão
γ_{xz}	-	Coefficiente de deformação devida a tensão de cisalhamento
σ_{ij}	-	Tensor de tensão
ε_{ij}	-	Tensor de deformação
ν	-	Relação de Poisson

Siglas

Inmetro	-	Instituto Nacional de Metrologia e Tecnologia
UNECE	-	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i>
EC	-	<i>European Council</i>
ALAPA	-	Associação Latino Americana de Pneus e Aros
ENCE	-	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
CONPET	-	Programa Nacional da Racionalização do uso dos Derivados do Petróleo e Gás Natural
RR	-	Resistência ao Rolamento
WGI	-	Índice de chão molhado

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivo	5
1.2	Organização do Trabalho.....	5
2	Revisão bibliográfica.....	7
2.1	Estrutura do pneumático	7
2.2	Viscoelasticidade linear	9
2.3	Fundamentos da resistência ao rolamento	13
3	Fundamentação teórica.....	25
3.1	Modelo analítico de Rhyne & Cron	25
3.2	Modelo analítico proposto	32
3.3	Procedimento de teste	37
4	Materiais e métodos	44
4.1	Validação da implementação do modelo analítico	44
4.2	Levantamento dos parâmetros do pneu de carga 295/80R22.5	44
4.3	Obtenção das curvas de resistência ao rolamento para o pneu de carga segundo Modelo Analítico de Rhyne e Cron.....	45
4.4	Obtenção das curvas de resistência ao rolamento para o pneu de carga segundo Modelo Numérico.....	46
4.5	Obtenção das curvas experimentais para validação dos resultados	47
4.6	Obtenção das curvas de resistência ao rolamento para o pneu de carga segundo Modelo Analítico Proposto.....	48
5	Resultados e discussão	49
6	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	61

6.1	Conclusões	61
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	62

1 Introdução

Nos últimos anos, a indústria automobilística tem se preocupado com as questões ambientais, investindo cada vez mais em pesquisas para reduzir o uso de recursos não renováveis e os impactos ambientais gerados pela fabricação de produtos manufaturados, como por exemplo, a busca por veículos mais eficientes, que além de proporcionar uma economia de consumo de combustível (fator financeiro), também permitam uma menor emissão de poluentes no meio ambiente (fator ambiental).

Essa consciência ambiental tem sido reforçada na indústria automobilística brasileira, especialmente após recentes revisões de normas que tem como objetivo estabelecer padrões mínimos de qualidade como a norma europeia UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) e a norma brasileira Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia). Outro fator importante no cenário nacional é o programa do governo federal, baseado no decreto nº 7.819 de 03 de outubro de 2012, conhecido como Inovar-Auto, que visa incentivar a indústria automotiva nacional a investir em pesquisa e desenvolvimento dentro do país. Este programa teria o objetivo alavancar o crescimento da engenharia no Brasil, investe na cadeia de fornecedores nacionais, acelera o avanço tecnológico e aumenta a segurança dos veículos e, o principal, influencia positivamente na eficiência energética dos veículos automotores.

Com este cenário, as indústrias de autopeças também foram afetadas, alterando os parâmetros dos projetos e o nível de controle de qualidade de seus produtos. O pneu foi um dos produtos que sofreram um avanço tecnológico para o atendimento desse novo panorama ecológico e das leis de eficiência energética criadas ao redor do mundo. Por exemplo, na Europa, a legislação que regulamenta este produto e suas novas exigências é a EC 1222/2009 de 25 de novembro de 2009 (European Council), que posteriormente foi atualizada segundo a revisão EC 1235/2011 de 29 de novembro de 2011, estando em vigor desde novembro de 2012. No Brasil, uma nova portaria do Inmetro, nº 544/12 de 25 de outubro de 2012¹, foi baseada na legislação europeia determinando que a partir de 2016 todos os pneus comercializados no Brasil (fabricados ou importados) e destinados a motocicletas, motonetas, ciclomotores, automóveis de passageiros, inclusive os de uso

¹ <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001918.pdf> (acessado em 10 de março de 2015).

misto e rebocados, veículos comerciais, comerciais leves e rebocados, precisam estar em conformidade com os requisitos ora aprovados e devidamente registrados no Inmetro.

A etiqueta, onde são apresentados os níveis de desempenho dos pneus, é aplicada aos pneus de automóveis de passageiros, inclusive os de uso misto e rebocados, veículos comerciais, comerciais leves e rebocados. A Figura 1-1 mostra a linha de tempo para a implementação da portaria do Inmetro 544/12.

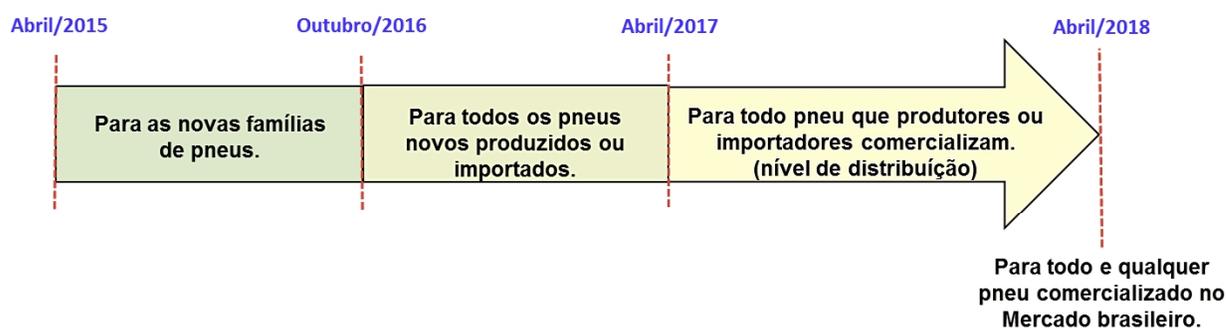


Figura 1-1 - Linha de tempo da implementação da etiqueta para pneus segundo a portaria nº 544/12 de 25 de outubro de 2012 para pneus comercializados no Brasil, sendo eles pneus de automóveis de passageiros (inclusive os de uso misto e rebocados) e os pneus destinados à veículos comerciais, comerciais leves e rebocados.

A norma descrita na portaria nº 544/12 do Inmetro exige que alguns parâmetros do pneu sejam avaliados e divulgados pela indústria. Os parâmetros do pneu testados são o ruído externo, a distância de parada em piso molhado e a resistência ao rolamento, sendo esse último o fator que está diretamente ligado ao consumo de combustível do veículo. (GALI, OZELO, COSTA, & CAMPOS, 2014).

Os resultados dos testes dos parâmetros descritos anteriormente devem ser apresentados por uma etiqueta (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE), conforme descrito no documento do Inmetro e ilustrada na Figura 1-2. Esta etiqueta será de uso obrigatório a partir de abril de 2015 para novas famílias de pneus e até abril de 2018 deverá abranger toda produção e comercialização de pneus no Brasil.

Essa etiqueta tem como intuito dar ao consumidor final informações básicas para uma melhor decisão na hora da compra do pneu e a oportunidade de estimar o impacto de suas escolhas na performance de seus veículos.

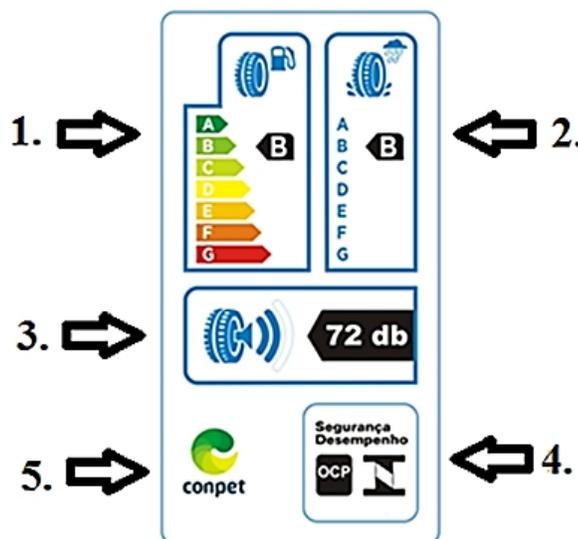


Figura 1-2 - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, segundo portaria nº 544/12 do Inmetro. Os parâmetros mostrados na etiqueta são: 1. Eficiência Energética, 2. Adesão em pista molhada, 3. Nível de Emissão de Ruído, 4. Logo do Inmetro e 5. Logo da Conpet (Programa Nacional da Racionalização do uso dos Derivados do Petróleo e Gás Natural).

O teste de aderência (distância de parada) em pista molhada é realizado seguindo a norma ISO 23.671 para automóveis de passageiros e segundo a norma ISO 15.222 para veículos comerciais (caminhões e ônibus). Este teste tem como objetivo especificar um índice de desempenho da distância de parada do pneu em solo molhado, chamado índice de chão molhado (WGI) e para sua determinação, os pneus em avaliação devem ser comparados com um pneu de referência previamente determinado e indicado na norma ISO citada.

O nível de emissão de ruído do pneu é avaliado seguindo a norma ISO 13.325 (*Coast-by-Noise*) e tem como objetivo determinar a emissão de ruídos gerados pela interação pneu-solo montado em um veículo a motor ou em um reboque.

A eficiência energética é determinada segundo a norma ISO 28.580 e tem como objetivo de medir a energia dissipada pelo pneu em rolamento livre, e assim determinar um coeficiente de

resistência ao rolamento (CRR). Este ensaio é realizado em laboratórios e em condições normais controladas.

Esse panorama acima descrito, apresenta alguns desafios técnicos hoje enfrentados pelas indústrias automotivas e de autopeças, que visa a economia de consumo de combustível e a redução de CO₂ no ambiente. Também é extremamente importante ressaltar que o pneu é um componente de segurança do veículo e tem grande impacto na dinâmica veicular, por este motivo, a busca do equilíbrio entre economia e segurança durante um desenvolvimento do pneu é fundamental, pois qualquer que seja a alteração de algum item de desempenho do produto, pode afetar diretamente na performance de outro. (COSTA, et al., 2009)

O pneu é um componente constituído, predominantemente, por compostos de borracha e faz a interação entre veículo e pavimento, sendo essa, sua principal função e fator primordial para controlar a direção do veículo, proporcionando-lhe segurança e conforto ao dirigi-lo. O pneu também tem como funções: 1. Suportar a carga do veículo, onde a pressão de ar interna e o tipo de construção são importantes fatores; 2. Gerar aderência com o pavimento em que interage; 3. Absorção dos impactos e vibrações gerados pelas irregularidades nos pavimentos de ruas e rodovias.

Os compostos de borracha possuem natureza viscoelástica, característica que ocasiona uma defasagem entre a tensão e a deformação do material, gerando assim um retardo na resposta do material a uma excitação externa e conseqüentemente a existência de uma histerese na curva tensão-deformação, que é a dissipação de energia, que geralmente ocorre na forma de calor e acumulativa se a excitação for de natureza cíclica.

No aspecto geral, resistência ao rolamento é a energia consumida para manter o pneu em movimento, e pode apresentar diferentes resultados conforme a variação de algumas condições de uso, como: pressão de inflação, carga aplicada, propriedade do material, temperatura, velocidade e do tipo de superfície do pavimento.

A resistência ao rolamento de um pneu é definida pela ISO 18.164 como a energia consumida por unidade de distância percorrida.

A resistência ao rolamento é um fenômeno que está associado à dissipação de energia que se dá predominantemente ao comportamento viscoelástico dos compostos de borracha, quando submetido a deformações cíclicas durante as revoluções do pneu em movimento.

Existem diversos estudos descritos na literatura que abordam o tema de resistência ao rolamento, sendo um desses estudos o modelo analítico de Rhyne & Cron (2012) para pneus destinados ao uso em veículos de passeio. Os parâmetros estudados por estes autores foram a área de contato, a espessura e a largura da rodagem, o raio da cintura metálica, o módulo elástico do composto da banda de rodagem, a carga vertical imposta e a pressão de inflação do pneu. Para determinar a resistência ao rolamento, os autores fizeram uma abordagem matemática simplificada que defini a interação entre o pneu e o pavimento, a qual não considerando a área total formada devido à deformação na região de interação do pneu e que muda com valores diferentes de pressão interna do pneu e com a carga imposta sobre o mesmo. Com isto, o objetivo foi desenvolver um modelo analítico baseado no modelo de Rhyne & Cron para pneus de carga, considerando-se essa área formada na região de contato pneu/pavimento devido ao fenômeno de deformação do pneu.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo analítico baseado no modelo proposto por Rhyne & Cron para obter uma estimativa de resistência ao rolamento de pneus de carga, levando em consideração alguns parâmetros, como: pressão de inflação, carga vertical imposta no pneu, espessura e largura da banda de rodagem, área de contato do pneu com o pavimento, diâmetro do pneu, o módulo elástico do composto polimérico e a razão da superfície de contato ou área efetiva de contato do pneu com o solo. Validar os resultados obtidos com o modelo analítico proposto comparando-os com resultados de um modelo numérico e com dados experimentais realizados em laboratório sob condições específicas e controladas segundo a norma ISO 28.580.

1.2 Organização do Trabalho

Essa dissertação está organizada em seis capítulos, sendo um deles dedicado à revisão bibliográfica.

O Capítulo 1 é a contextualização da problemática relacionada à preocupação das indústrias em reduzir os impactos ambientais causados pelos veículos automotores, que foi impulsionado por leis e programas federais de incentivo que visam estimular a economia de combustíveis e diminuir a emissão de gases no ambiente.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica da literatura, tendo como foco a fundamentação do conceito de resistência ao rolamento de pneus e as variáveis que impactam em seu resultado.

O Capítulo 3 apresenta toda a fundamentação teórica de dois modelos analíticos para determinação de resistência ao rolamento de pneus, sendo o primeiro o modelo proposto encontrado na literatura e o segundo o modelo proposto por esse trabalho. Além da apresentação dos passos necessários para realização do procedimento experimental, segundo a norma ISO 28.580.

O Capítulo 4 mostra o método de desenvolvimento dos modelos analíticos e sua validação através das curvas de comportamento da resistência ao rolamento variando os parâmetros de pressão e carga vertical, obtidos com modelo numérico e com os resultados experimentais.

O Capítulo 5 é a apresentação e discussão dos resultados obtidos tanto pelos dois modelos analíticos, quanto com o modelo numérico que interage com um software comercial, Abaqus utilizado para simulações em elementos finitos e com os resultados obtidos através de procedimento experimental.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e a proposta para trabalhos futuros. Sendo finalizado com as referências bibliográficas pesquisadas e citadas ao longo de todo o trabalho.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Estrutura do pneumático

A função primária de um pneu é servir como interface entre o veículo e o pavimento, gerando os esforços necessários na sua condução, sendo um fator primordial para o controle da direção do veículo, proporcionando segurança e conforto ao dirigi-lo. O pneu também tem funções básicas, como: 1. Suportar a carga do veículo, onde a pressão do ar e tipo de construção são importantes fatores para carregar e sustentar o peso dos veículos; 2. Gerar aderência com o pavimento em que interage. Neste sentido, o projeto do produto, principalmente da banda de rodagem, é extremamente importante para transmitir força do motor para mover o veículo, além de promover tração e a capacidade de frenagem em pavimentos secos e molhados; 3. Absorção das irregularidades em pavimentos, sendo este atributo um dos mais importantes benefícios do pneu, pois atuam como um sistema de molas e amortecedores para absorver os impactos e as irregularidades da superfície.

Segundo Lindemuth (2006) um pneu é predominantemente constituído por compostos de borracha tendo como matéria-prima principal os elastômeros, que são responsáveis pelas propriedades físicas de elasticidade, flexibilidade e impermeabilidade ao ar e a água. O comportamento destes compostos de borracha depende do ambiente ao qual estão expostos e das condições de uso, que influenciam diretamente em suas propriedades mecânicas iniciais, influenciando no envelhecimento do pneu ao longo de sua vida útil.

Dois fatores que influenciam no comportamento da borracha devido a sua característica viscoelástica são a temperatura e a frequência de excitação. Quando a borracha é excitada ciclicamente, dissipa energia geralmente em forma de calor, devido à sua característica viscoelástica, e por isso esse fenômeno tem grande influência na resistência ao rolamento do pneu.

Um pneu de carga, destinado para aplicação em caminhões e ônibus, é um produto constituído, em média por 19 diferentes componentes que neste trabalho foram divididos em 7 regiões, conforme demonstrado na Figura 2-1.

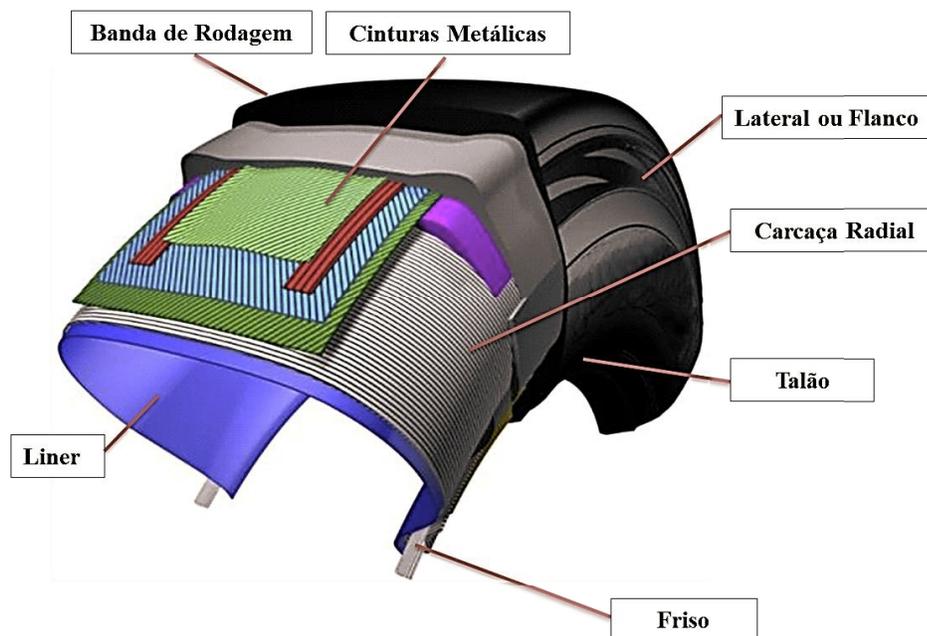


Figura 2-1 - Estrutura de um pneu de carga (GALI, OZELO, COSTA, & CAMPOS, 2014).

Cada um destes componentes demonstrados na figura anterior, tem características diferentes e é responsável por uma função mecânica específica no produto, conforme descritas abaixo:

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, além de atender às expectativas do consumidor quanto à dirigibilidade e conforto do veículo.

As **Cinturas Metálicas** são tecidos metálicos emborrachados localizados logo abaixo da rodagem e são dispostos em ângulos de 180° entre si, isso para pneus radiais. Tem como função principal manter o perfil do pneu quando inflado, além da resistência a impactos e perfurações, bem como apresenta grande influência na dinâmica da direção do veículo.

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 vão gravadas informações de fabricante e modelo, as marcações de certificações, fonte produtiva, informações técnicas de uso, etc.

A **Carcaça Radial** é um tecido metálico emborrachado que está disposto no pneu no sentido radial ao seu movimento para obter uma melhor otimização de seus fios metálicos, 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 de pneus chamados “*tubeless*” ou sem câmara. Esse componente é desenvolvido com um composto especial que proporciona a retenção do ar interno de inflação do pneu, além de evitar que a umidade contida no ar penetre no interior do pneu, causando a oxidação do metal contido na carcaça radial, o qual comprometeria o produto.

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 quando em dinâmica, principalmente em trajetos curvos. Os compostos dos componentes que formam o talão são desenvolvidos para resistirem às grandes solicitações de deformação e ao calor proveniente da interação entre pneu e roda, devido ao aquecimento dos freios.

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.

2.2 Viscoelasticidade linear

Os compostos de borracha possuem natureza viscoelástica não linear, ou seja, apresentam simultaneamente características viscosas e elásticas não lineares. Contudo, a aplicação do conceito e formulação não linear aumenta consideravelmente a complexidade do problema. De modo a simplificar a abordagem do tema, foi adotada o conceito da viscoelasticidade linear, que será abordada no decorrer desta seção.

A componente de viscosidade da borracha é a quantidade que descreve a resistência que o material oferece ao escoamento, que neste caso, pode ser determinada de acordo com a seguinte lei de Newton da viscosidade:

$$\sigma = \eta\dot{\gamma}$$

2.2.1

A componente elástica da borracha tem propriedades de sólidos, ou seja, quando aplicada uma determinada força apresenta uma deformação proporcional correspondente e quando o material deixa de ser submetido à tal força, o mesmo retorna à configuração inicial.

Materiais viscoelásticos podem ser representados como sendo modelos reológicos equivalentes, acoplando elementos de mola (representando a componente elástica, ou seja, a rigidez do sistema) e amortecedores lineares (que representam o coeficiente de viscosidade do sistema).

Atualmente para a estimativa de resistência ao rolamento, modelos numéricos são utilizados através de ferramentas de elementos finitos (FEM). Para tal, aplica-se os modelos viscoelásticos clássicos afim de determinar a energia dissipada pelos compostos de borrachas, sendo tais modelos: Maxwell e Voigt. (TOMAZINI, 2012)

O modelo de Maxwell é o modelo básico de um fluido, porque a resposta a longo prazo corresponde a uma tensão constante aplicada idêntica à de um fluido, e pode ser representado como um sistema equivalente à uma mola e um amortecedor em série, conforme ilustrado na Figura 2-2. A equação que descreve a relação entre tensão (σ) e deformação (ϵ) é dada por:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{K} \frac{d\sigma}{dt} \quad 2.2.2$$

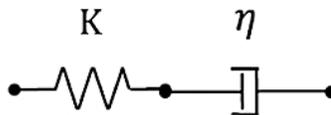


Figura 2-2 - Representação do modelo viscoelástico de Maxwell (TOMAZINI, 2012).

O modelo de Kelvin-Voigt é o modelo básico de um sólido, porque a resposta a longo prazo corresponde a uma tensão constante aplicada idêntica à de um sólido, e pode ser representado como

um sistema equivalente à uma mola e um amortecedor em paralelo, conforme ilustrado na Figura 2-3. A equação que descreve a relação entre tensão (σ) e deformação (ε) é dada por:

$$\sigma = K\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad 2.2.3$$

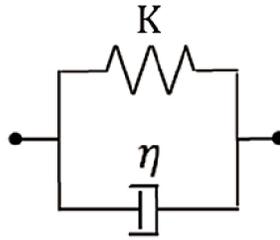


Figura 2-3 - Representação do modelo viscoelástico de Voigt (TOMAZINI, 2012).

Como nem o modelo de Kelvin-Voigt nem o de Maxwell proporcionam uma resposta viscoelástica que represente qualitativamente o comportamento de muitos materiais reais, modelos mais complexos se fazem necessário.

De modo a obter melhores resultados, o modelo generalizado de Maxwell ou Maxwell-Wiechert, pode ser utilizado para determinar a dissipação de energia pela borracha.

Esse modelo generalizado consiste na aplicação de n componentes em série e paralelo, conforme ilustrado na Figura 2-4:

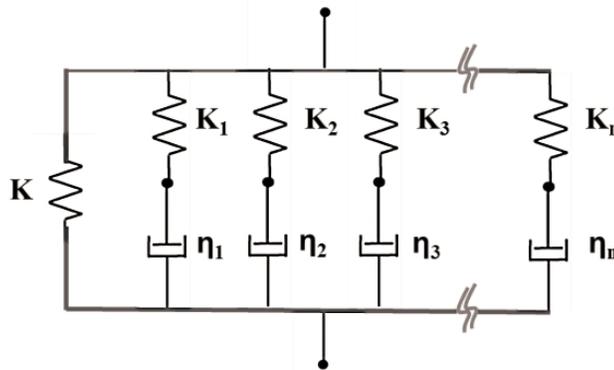
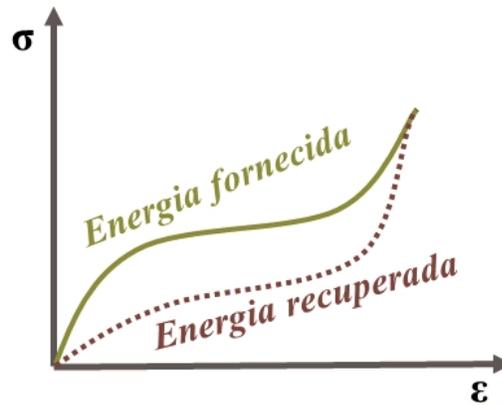


Figura 2-4 - Modelo viscoelástico Generalizado de Maxwell.

Devido ao comportamento viscoelástico da borracha citado anteriormente, é gerado um retardo na resposta do material a uma excitação externa e conseqüentemente resultando numa defasagem entre a tensão e a deformação do material. Essa tal defasagem é conhecida como histerese na curva tensão-deformação (Figura 2-5) e é responsável pela dissipação de energia.



$$\text{Energia Fornecida} = \text{Energia Dissipada} + \text{Energia Recuperada}$$

Figura 2-5 - Representação da histerese na curva tensão-deformação.

Geralmente a energia é dissipada em forma de calor e ocorre de forma acumulativa se a excitação for de natureza cíclica.

Através da defasagem entre a tensão e deformação do composto de borracha (Figura 2-6), é possível determinar o módulo elástico (E') e o módulo dissipativo ou de perda (E'') do composto:

$$E' = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right) \cos \delta = E^* \cos \delta \quad 2.2.4$$

$$E'' = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right) \sin \delta = E^* \sin \delta \quad 2.2.5$$

A relação entre o módulo elástico e o módulo dissipativo é por:

$$\left(\frac{E''}{E'}\right) = \frac{E^* \sin \delta}{E^* \cos \delta} = \tan \delta \quad 2.2.6$$

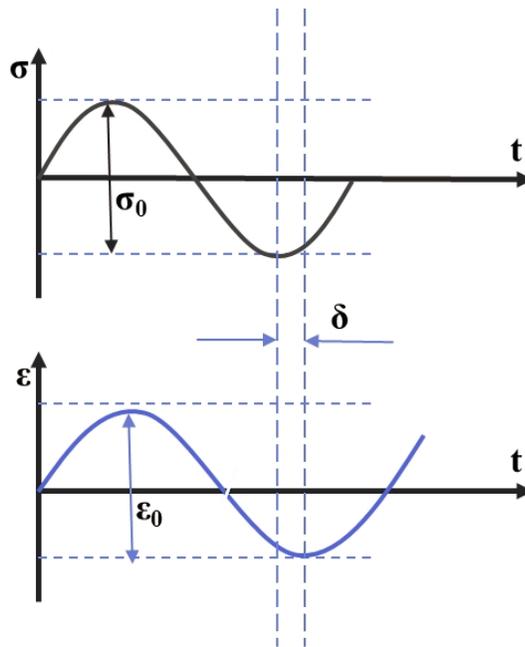


Figura 2-6 - Defasagem entre a tensão e deformação do composto de borracha.

2.3 Fundamentos da resistência ao rolamento

A partir da segunda metade do século 20, principalmente na América do Norte, aumentou o interesse em pesquisas focadas no entendimento e redução da resistência ao rolamento. Apesar dos grandes avanços já alcançados neste tema e simultaneamente na evolução das performances dos pneus, uma melhor compreensão da física e principalmente do comportamento dos materiais que constituem um pneumático é essencial para fornecer às indústrias deste ramo, ferramentas robustas para que tragam benefícios ainda maiores ao produto.

Segundo LaClair (2006) as pessoas de modo geral entendem melhor o conceito de resistência ao rolamento de pneus quando mencionada uma experiência que muitos já viveram, como por exemplo: andar de bicicleta. Isso porque ao utilizar esse veículo de duas rodas é possível perceber a diferença da quantidade de esforço necessário para mantê-lo em movimento quando utilizada com pneus sub-inflados, pois nesta configuração é necessário a realização de um maior esforço físico (fornecer maior energia ao sistema) para manter o movimento. A razão para tal fenômeno é que a resistência ao rolamento aumenta com a diminuição da pressão do pneumático.

De acordo com Hall e Moreland (2001) são numerosas as perdas que podem contribuir para a ineficiência de um veículo motorizado, e vastos e contínuos são os esforços em andamento para reduzir tais perdas contidas em cada componente do veículo. De forma simplificada, a energia consumida pelo veículo é dissipada de seis formas básicas (em ordem decrescente de aproximada importância):

- a) Perdas do trem de potência durante o fornecimento de energia (incluindo perda por dissipação térmica do motor, perda no sistema de exaustão de gases e resfriamento do motor);
- b) Resistência ao rolamento, sendo o pneu um grande fator de impacto neste quesito;
- c) Arrasto aerodinâmico;
- d) Energia de frenagem (inércia de translação e rotação dissipada como calor pelos freios);
- e) Atritos no sistema do trem de potência enquanto parado;
- f) Acessórios.

A parcela de consumo de energia do veículo causado pela resistência ao rolamento do pneu, que é a energia necessária para manter o pneu em movimento, varia com de condição de uso, tais como: o tipo de pneu, pressão de inflação, carga aplicada, propriedade do material, temperatura, velocidade e superfície do pavimento.

Segundo a norma ISO 18.164 a definição de resistência ao rolamento de um pneu é a energia consumida por unidade de distância percorrida e tem as mesmas unidades de força ($J/m=N$).

O fenômeno de resistência ao rolamento está associado com a dissipação de energia que se dá predominantemente ao comportamento viscoelástico dos compostos de borracha, quando submetido a deformações cíclicas durante a utilização do pneu.

Para veículos comerciais, o pneu tem cerca de dezenove componentes ilustrados na Figura 2-1, é um produto formado por diferentes materiais (elastômeros, metais e têxteis) que têm diferentes funções mecânicas, as quais tem grande influência no desempenho do produto. No entanto, apenas os compostos de borracha têm contribuição significativa na resistência ao rolamento, por conseguinte, metais e componentes têxteis, geralmente não são considerados nas análises numéricas.

Há regiões do pneu que contribuem de forma mais significativa na resistência ao rolamento do que outros. Através de análise numérica, é possível avaliar e determinar a contribuição de cada região ou componente do pneu e assim desenvolver novas tecnologias com o intuito de reduzir a dissipação de energia especificamente sobre as áreas mais impactantes. A Figura 2-7 mostra a contribuição da resistência ao rolamento de cada região de um pneu radial do segmento de caminhões e ônibus, de medida 295/80 R22.5, escolhida para realização deste estudo.

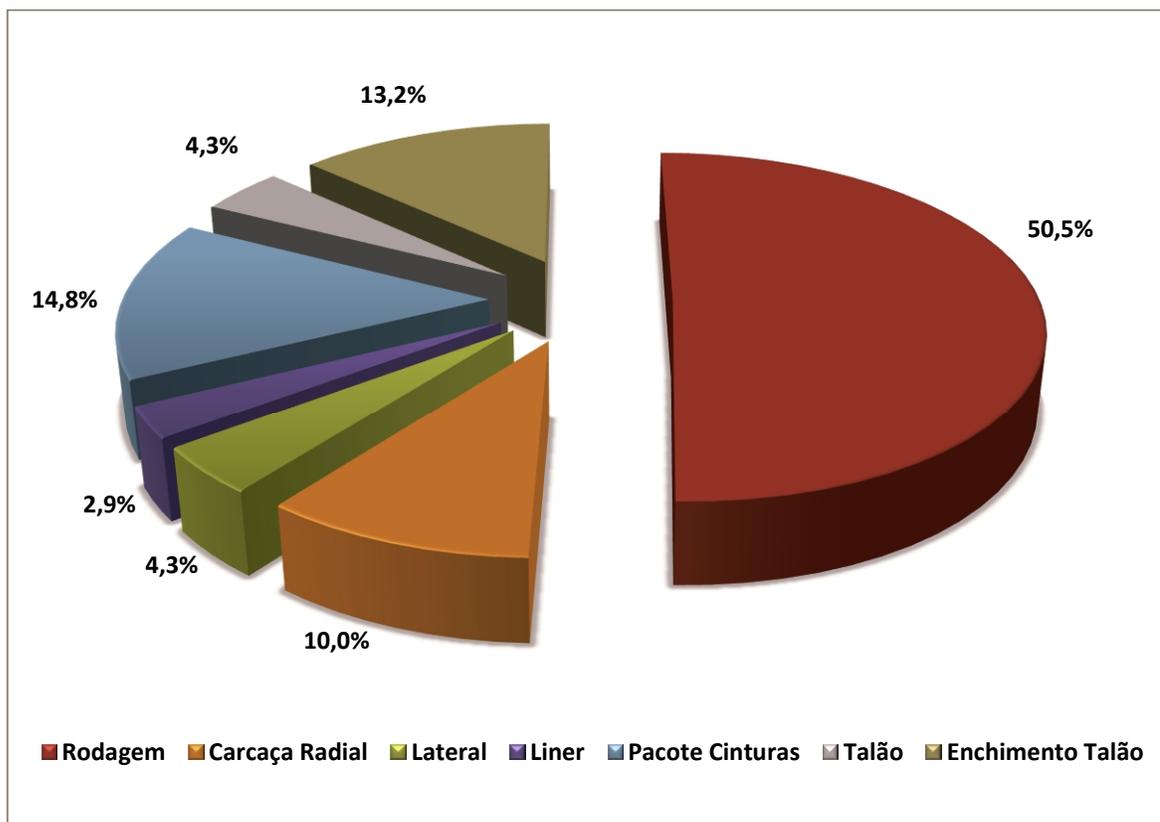


Figura 2-7 - Contribuição de RR por componentes obtidos através de modelo numérico de um pneu comercial de medida 295/80 R22.5 (GALI, OZELO, COSTA, & CAMPOS, 2014).

Através da na figura acima, é possível concluir que a banda de rodagem é o componente do pneu que tem maior impacto na resistência ao rolamento, pois aproximadamente 50% de toda RR é gerada na banda de rodagem onde se concentra grande volume de composto de borracha sob deformação cíclica.

Uma redução de resistência ao rolamento de pneus de carga em torno de 10%, pode proporcionar uma melhora de consumo de combustível em torno de 1,5% a 3,0%. Para os pneus de passageiros a redução no consumo de combustível é menor, também reduzindo a resistência ao rolamento em torno de 10%, pode-se obter uma redução em torno de 0,5% a 1,5% no consumo de combustível. (HALL & MORELAND, 2001).

O resultado de resistência ao rolamento é influenciado por parâmetros como: a carga vertical, pressão de inflação interna do pneu e a velocidade. LaClair (2006) aborda a relação entre esses parâmetros e os fenômenos físicos a ela associados.

Por exemplo, a resistência ao rolamento aumenta quase que proporcionalmente à carga vertical imposta ao pneu devido ao aumento dos níveis de flexão e cisalhamento que ocorrem em sua estrutura. Sendo assim, foi convencionado um coeficiente de resistência ao rolamento (CRR), descrito na Eq. (2.3.1) e é definido por unidades expressa quer seja por uma percentagem ou por mil usando as unidades de força por tonelada de carga, indicado como "kgf por tonelada". Deste modo, podendo também um coeficiente de 0,008 CRR ser expresso como 0,8% ou 8 kgf/t.

$$CRR = \frac{F_R}{F_Z}, \quad 2.3.1$$

onde F_Z é a carga vertical imposta ao pneu e F_R a resistência ao rolamento do pneu.

Segundo LaClair (2006), embora o efeito de carga sobre a resistência ao rolamento do pneu seja aproximadamente linear, que resultaria em um CRR constante, o aumento da dissipação de energia é acompanhado por um aumento de temperatura do pneu, resultando em um coeficiente de

perda de histerese menor para os elastoméricos e por isso o efeito da diminuição do coeficiente de resistência ao rolamento com o aumento da carga vertical, conforme exemplificado pela Figura 2-8.

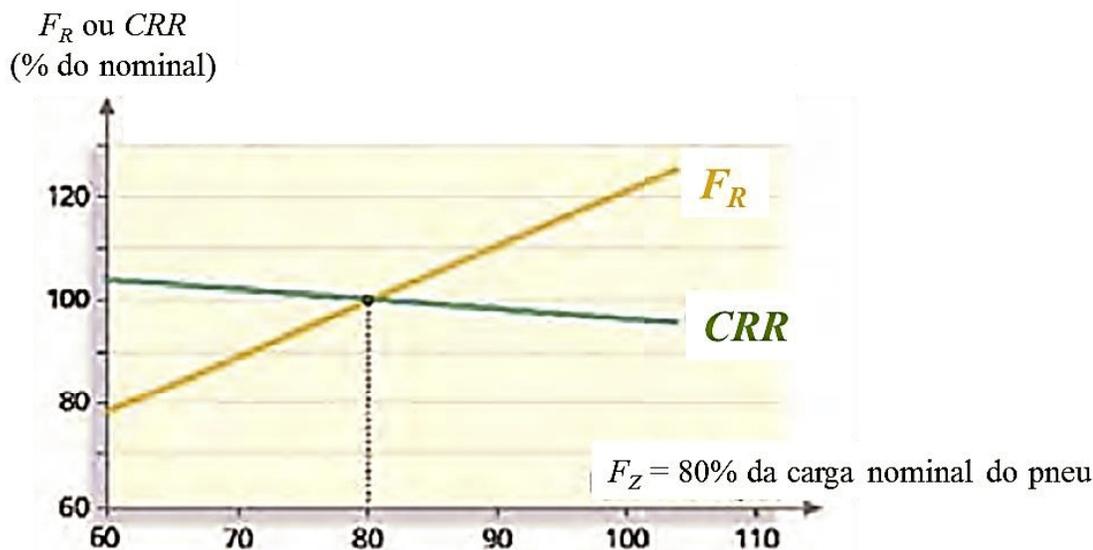


Figura 2-8 - Efeito da carga vertical na resistência ao rolamento de um pneu destinado ao carro de passageiros. A resistência ao rolamento é plotada em relação a carga vertical, considerando-a como 80% da máxima carga permitida para o pneu. (LACLAIR, 2006)

Analisando a Figura 2-8 percebe-se um fenômeno de inversão dos resultados, pois quando analisa-se a curva amarela é possível ver que a resistência ao rolamento (F_R) aumenta proporcionalmente com o aumento da carga vertical imposta (F_Z), porém o mesmo não ocorre com o coeficiente (CRR), que apresenta um efeito contrário, tem seu valor diminuído em relação ao mesmo aumento da carga vertical.

Esse mesmo fenômeno de inversão dos resultados quando comparadas as curvas de resistência ao rolamento com o coeficiente de resistência ao rolamento de pneu, foi também abordado por Lambillotte (2011) durante o evento “Tire Technology EXPO 2011”. Onde o autor verificou esse comportamento enquanto pesquisava o potencial de economia de combustível quando utilizado uma pressão de inflação ideal para o pneu. Na Figura 2-9 são ilustradas as curvas plotadas onde percebe-se a redução de coeficiente de resistência ao rolamento quando é acrescido o valor da carga vertical imposta no pneu P205/60R16.

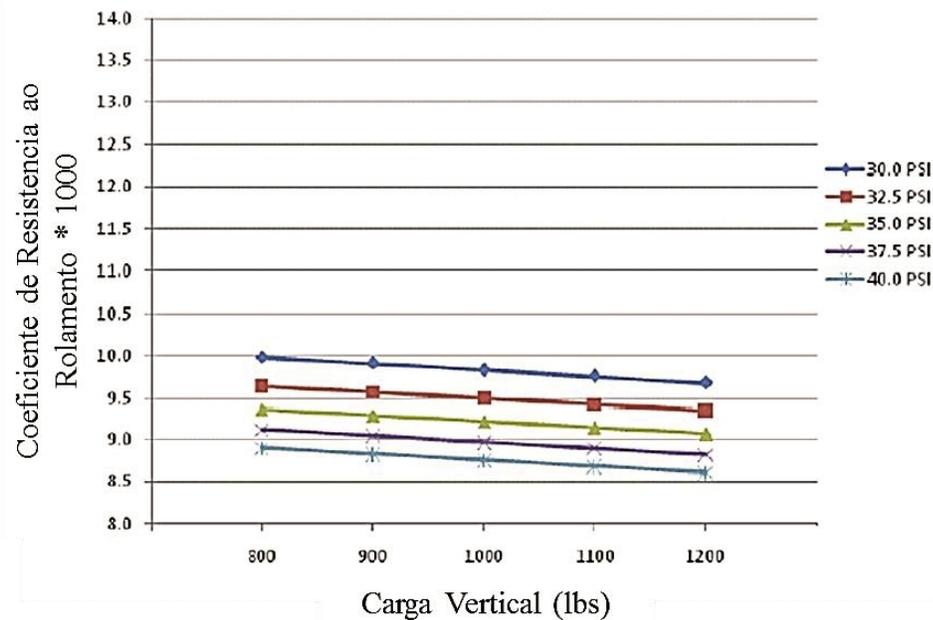


Figura 2-9 - Gráfico do coeficiente de resistência ao rolamento de um pneu de utilização em veículos de passageiros, variando pressão e carga vertical (LAMBILLOTTE, 2011).

Reduzindo a pressão de inflação afeta as deformações globais do pneu de um modo semelhante ao de um aumento da carga vertical. O aumento das tensões de flexão e de cisalhamento resulta em uma maior resistência ao rolamento. No entanto, em alguns casos, a redução das tensões de compressão na banda de rodagem pode compensar as deformações de flexão, de tal forma que reduzindo a pressão tem pouco efeito sobre a resistência ao rolamento e, em alguns casos, a resistência ao rolamento pode sim diminuir (LACLAIR, 2006).

Como os pneus destinados aos veículos de carga, que geralmente apresentam uma estrutura blocada em seu desenho de rodagem, são mais propensos a exibir este fenômeno, uma vez que os blocos da rodagem tendem a deformar-se mais do que na compressão sob sulcos longitudinais. Já para os desenhos de rodagem onde é predominante sulcos longitudinais, a rigidez adicional devida a incompressibilidade da borracha reduz as tensões de compressão devido à carga na banda de rodagem. Devido o mesmo efeito, uma parte das tensões associadas com a flexão podem realmente serem maiores, no caso de pneus com sulcos longitudinais contínuos, o qual tendem aumentar a resistência ao rolamento com a diminuição da pressão de inflação. Já para pneus destinados a carros de passageiros, a pressão de inflação não é usualmente alta o suficiente para que a compressão da

rodagem seja considerada uma fonte significativa de dissipação total de energia. A Figura 2-10 demonstra um típico efeito da pressão na resistência ao rolamento para ambos pneus (destinados a veículos de passageiros e de carga).

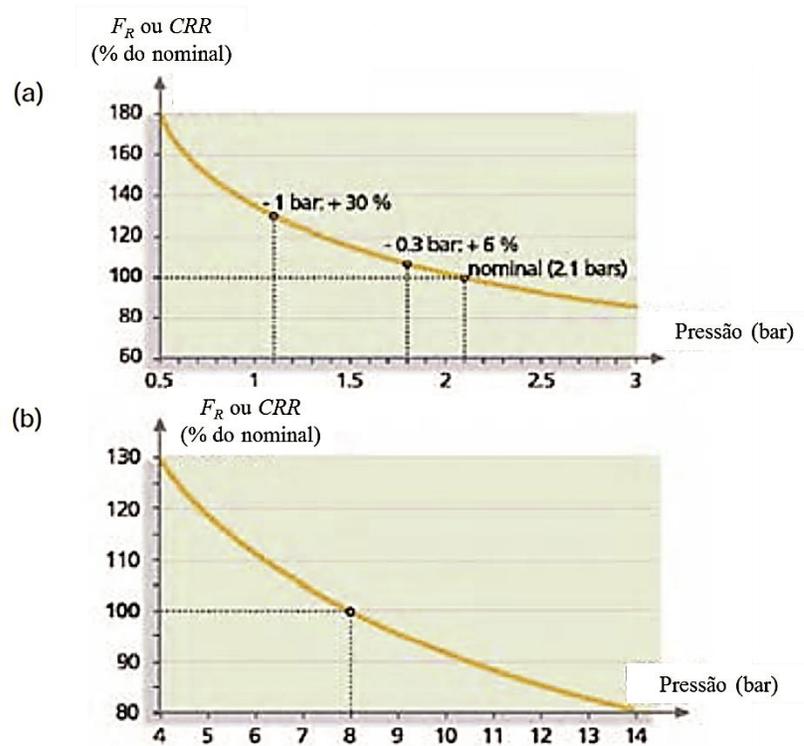


Figura 2-10 – Influência da pressão de inflação do pneu na resistência ao rolamento para (a) pneus destinados aos veículos de passageiros e (b) para pneus destinados aos veículos de carga. A resistência ao rolamento é plotada como sendo uma porcentagem do valor nominal de pressão de inflação do pneu. (LACLAIR, 2006)

Com o aumento da velocidade ocorrem alguns efeitos que influenciam na resistência ao rolamento dos pneus. Em geral, a resistência ao rolamento aumenta como resultado das vibrações excitadas pela deformação cíclica do pneu em altíssimas velocidades, estágios onde ocorrem as ondas estacionárias ou “stand waves”. Além disso, o aumento da velocidade faz com que a frequência de deformação aumente, o que tende a aumentar a temperatura e diminuir a tangente de perda ($\tan \delta$) dos materiais de borracha. A influência combinada destes efeitos provoca, no geral, um aumento da resistência ao rolamento conforme aumenta a velocidade, mas existem alguns casos em que a resistência ao rolamento pode diminuir como resultado da dependência da temperatura

no $\tan \delta$ ou devido à construção do pneu. A influência da variação de velocidade na resistência ao rolamento, é em geral, para velocidades baixas e médias, muito menor quando comparada a influência que os outros parâmetros, como a carga vertical e pressão de inflação.

A Figura 2-11 ilustra o típico efeito da velocidade na resistência ao rolamento para dois pneus destinados ao uso em veículos de passageiros. O pneu com a marcação externa na direção circunferencial, chamada de “*capped crown*”, diminui a formação de ondas estacionárias em altas velocidades, diminuindo a respectiva deformação e dissipação de energia.

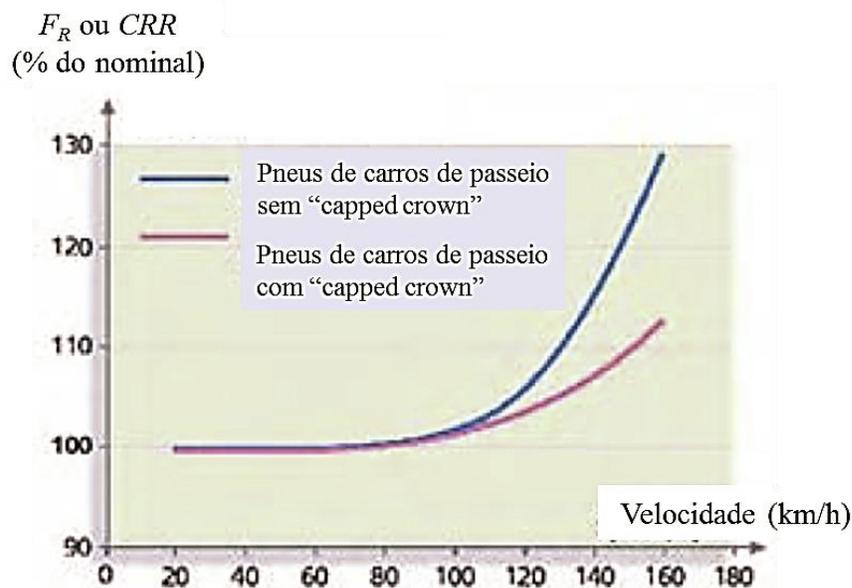


Figura 2-11 - Efeito da velocidade na resistência ao rolamento, o qual é plotada com sendo uma porcentagem da velocidade medida a 80 km/h. (LACLAIR, 2006)

Para caracterizar a resistência ao rolamento de um pneu, é importante determinar os efeitos da carga vertical, da pressão de inflação e da velocidade, incluindo as interações entre esses parâmetros.

Existem vários trabalhos focados em resistência ao rolamento, especialmente após a introdução de novas normativas e leis de incentivo, ambos apresentados no Capítulo 1, tornando a pesquisa um pouco mais complicada. Foram encontrados trabalhos bem diversificados e que estudam a influencia na resistência ao rolamento pelos materiais que constituem o pneu, pelo meio

ao qual o pneu é submetido, pelas alterações geométricas no pneu e por fim trabalhos focados nas influencias dos parâmetros do veículo, como: pressão, velocidade e carga. Trabalhos esses explicados a seguir.

Soluções para o contato entre uma superfície rugosa e corpos curvos são formuladas a partir do pressuposto de que as deformações em superfícies rugosas e onduladas são puramente plásticas e elásticas, respectivamente. A utilização desse modelo é possível estabelecer uma relação entre carga aplicada, propriedades mecânicas e de superfície dos materiais e o tamanho da efetiva região de contato. Este artigo faz o desenvolvimento teórico do contato de uma esfera com outra esfera, considerando superfícies lisa e rugosa. (YIP & VERNART, 1971)

Schuring (1974) faz uma análise sobre o torque gerado por um pneu quando utilizado em diversas condições de operação, como: o ângulo de escorregamento, deslizamento longitudinal, carga vertical, velocidade e tipo de pneu. Essa análise é confrontada com os resultados obtidos em testes que permitem a determinação da quantidade de energia consumida pelo pneu, sendo os testes de rolamento livre e de dirigibilidade e frenagem. Com esse trabalho ele procura estimar o quanto é possível de economia de combustível através da utilização de pneus de baixa dissipação de energia.

Schuring (1994) em outro trabalho, aborda em seu artigo dados empíricos publicados e que sugerem uma relação linear entre as perdas geradas durante o rolamento do pneu e o consumo de combustível do veículo. Segundo este trabalho desde 1925 vários estudos apontavam o pneu como um dos responsáveis pelo aumento de consumo ou diminuição da eficiência energética dos veículos automotores. Após discutida essa relação entre pneus e veículos, é criada pelo autor uma regra simples que visa obter uma estimativa de quanto será a economia de combustível diminuindo as perdas intrínsecas ao rolamento de um pneu.

Hublau e Barillier (2008) tem como objetivo em seu artigo fundamentar matematicamente a norma ISO 18164, a qual descreve a forma de medição de RR em uma máquina de laboratório. Este trabalho foi dividido em duas partes, sendo a primeira uma demonstração das equações de resistência ao rolamento de um pneu em movimento em um tambor, e em seguida, compara essas equações às utilizadas na norma.

Com base em trabalhos anteriores que mostram a relação entre o coeficiente de resistência ao rolamento do pneu com o consumo de combustível de veículos, Bradley e Delaval (2013)

desenvolvem uma equação empírica que permite que os consumidores tenham a oportunidade de obter uma estimativa do impacto de suas escolhas de pneus no consumo de combustível do veículo, apenas utilizando informações da etiqueta de eficiência energética do pneu e o peso do veículo.

Cho, et al. (2013) aborda o modelamento numérico 3-D de um pneu para a determinação da resistência ao rolamento, e a distribuição de temperatura gerada no pneu devido à histerese, propriedade intrínseca aos compostos viscoelásticos.

Vários trabalhos mostram o impacto da resistência ao rolamento na economia de combustível do veículo, porém no trabalho apresentado por Costa, et al. (2009) mostra o dilema entre a economia de combustível com a distância de parada do veículo em piso molhado. O foco do estudo é mostrar a importância do equilíbrio entre economia e segurança, pois os autores abordam como apenas mudando o composto da banda de rodagem de um pneu, afim de diminuir o RR, pode trazer consequências como uma maior distância de parada. Esse equilíbrio entre o desempenho esperado pelo pneu e as novas exigências de legislação e do cliente, são hoje o grande desafio das empresas automotivas e autopeças.

Gillespie (1992), aborda três equações para determinar a resistência ao rolamento com base em parâmetros do veículo. As variáveis nessas equações são: pressão de inflação do pneu, velocidade e carga.

A primeira equação é considerada para velocidades mais baixas e o coeficiente aumenta de forma aproximadamente linear e varia com a velocidade, conforme demonstrado a seguir:

$$F_{RR} = 0,01 \left(1 + \frac{V}{100} \right), \quad 2.3.2$$

onde V é a velocidade em mph.

Já para as faixas de velocidade mais amplas, foi desenvolvida uma segunda equação:

$$F_{RR} = f_0 + 3,24 * f_s \left(\frac{V}{100} \right)^{2,5}, \quad 2.3.3$$

onde V é a velocidade em mph, f_0 é um coeficiente de base e f_s um coeficiente de efeito de velocidade. Os coeficientes f_0 e f_s dependem da pressão de inflação e são determinadas a partir do gráfico ilustrado na Figura 2-12.

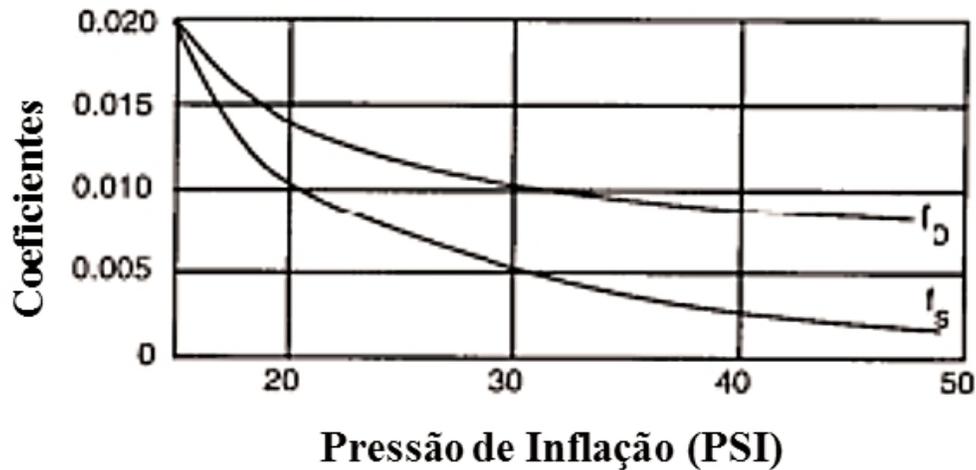


Figura 2-12 - Coeficientes para a equação 2.3.3 (GILLESPIE, 1992).

Similares equações para estimação de resistência ao rolamento de pneus de caminhão, tanto os radiais quanto os diagonais, são apresentadas a seguir:

$$F_{RR} = (0,0041 + 0,000041V)C_r, \quad \text{Pneus Radiais} \quad \mathbf{2.3.4}$$

$$F_{RR} = (0,0066 + 0,000046V)C_r, \quad \text{Pneus Diagonais} \quad \mathbf{2.3.5}$$

onde V é a velocidade em mph e C_r é o coeficiente relativo ao tipo de superfície do pavimento, veja Tabela 2-1:

Superfície do Pavimento	C_r
Concreto Liso	1.0
Concreto Desgastado e Asfalto Frio	1.2
Asfalto Quente	1.5

Tabela 2-1 - Coeficiente relativo ao tipo de Superfície do Pavimento para as equações 2.3.4 e 2.3.5 (GILLESPIE, 1992).

LaClair (2006) aborda o tema resistência ao rolamento no livro *“The Pneumatic Tire”* editado pelo departamento de transporte americano, dando uma visão geral sobre o tema e discutindo sobre tópicos como: causas e efeitos físicos da resistência ao rolamento, projetos e fatores de uso que impactam a resistência ao rolamento, métodos preditivos e de medição, e como a resistência ao rolamento de um pneumático impacta no consumo de combustível de um veículo.

No trabalho de Hall & Moreland (2001) são discutidos sobre os fundamentos da resistência ao rolamento de pneus. Abrangendo de forma sucinta e didática temas como: o impacto da RR na economia de combustível em veículos, medição do RR em pneus em laboratório, efeito dos parâmetros como: pressão, carga e velocidade na resistência ao rolamento, modelamento numérico e viscoelasticidade.

Buscando responder à pergunta de quanto mais baixa a resistência ao rolamento de um pneu pode chegar, Rhyne & Cron (2012) desenvolveram um modelo analítico simplificado, que leva em consideração alguns parâmetros de projeto do pneu, tais como: área de contato, a espessura e a largura da rodagem, o raio da cintura metálica, o módulo elástico do composto da banda de rodagem, a carga vertical imposta e a pressão de inflação do pneu, visando estimar a mínima resistência ao rolamento de um pneumático. Permitindo também entender o comportamento de RR do pneu, através de curvas obtidas com o modelo analítico, em relação à variação de pressão de inflação e a carga vertical imposta ao pneu.

Estes dois últimos artigos foram a base para o desenvolvimento desta pesquisa de mestrado, em especial sendo o último, o que serviu de base para o desenvolvimento do modelo analítico proposto neste trabalho.

3 Fundamentação teórica

3.1 Modelo analítico de Rhyne & Cron

Rhyne & Cron (2012) desenvolveram um modelo analítico muito simples onde é possível estimar o mínimo Resistência ao Rolamento (RR), indicando alguns parâmetros do pneu, tais como: área de contato, espessura e largura da rodagem, raio da cintura metálica, módulo elástico do composto da banda de rodagem, carga aplicada e pressão de inflação do pneu.

Conforme definido pela ISO 18.164, a RR de um pneu é a energia dissipada ou consumida por uma unidade de distância percorrida e pode ser descrita de uma maneira simplificada como sendo o produto da magnitude de deformação, pelo volume do material deformado e pela propriedade de perda do material, conforme demonstrado na Figura 3-1.

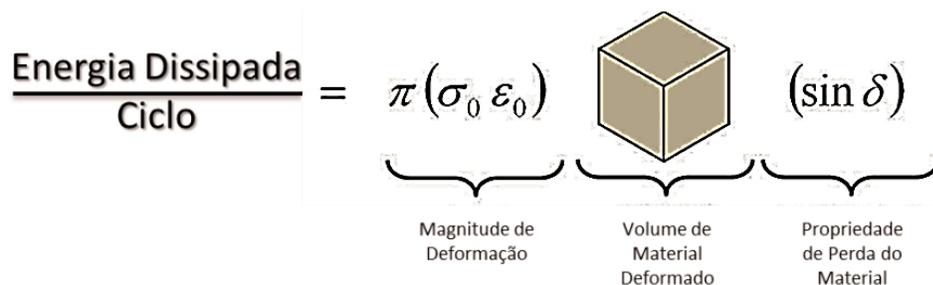
$$\frac{\text{Energia Dissipada}}{\text{Ciclo}} = \underbrace{\pi(\sigma_0 \varepsilon_0)}_{\text{Magnitude de Deformação}} \underbrace{\text{Volume de Material Deformado}}_{\text{Volume de Material Deformado}} \underbrace{(\sin \delta)}_{\text{Propriedade de Perda do Material}}$$


Figura 3-1 - Energia dissipada do pneu (RHYNE & CRON, 2012).

Porém o trabalho de Rhyne & Cron é desenvolvido tendo como foco o primeiro termo da Figura 3-1, na magnitude de deformação. Os outros termos são considerados constantes pelos autores.

As deformações parasitas, como deformações nos sulcos da banda de rodagem, existentes no pneu durante o teste de RR em laboratório são assumidas como muito pequenas e por esse motivo, não tendo relevância no resultado. Somente as deformações predominantes, ou seja, que são

responsáveis por grande parte da dissipação de energia, existentes na banda de rodagem do pneu serão levadas em conta neste modelo proposto por Rhyne & Cron.

Para simplificar o modelo, somente a banda de rodagem do pneu (componente que representa aproximadamente 50% de toda RR gerada em um pneu 295/80 R22,5) é considerada para o desenvolvimento do modelo analítico. As duas deformações predominantes na banda de rodagem, que são levadas em conta no modelo analítico são: os esforços de compressão e de cisalhamento longitudinal.

Também é considerado que o material da banda de rodagem é puramente elástico e linear, e que portanto, suas propriedades e deformação são independentes da frequência de excitação, da temperatura e da tensão imposta ao sistema.

Conforme visto anteriormente, entre as duas deformações predominantes na banda de rodagem, está a deformação devida à tensão de compressão, sendo considerada que sua magnitude é diretamente dependente da pressão de inflação interna do pneu, pois a rodagem e a cintura metálica são consideradas como sendo uma membrana flexível afim de simplificar o modelo, conforme demonstrado Figura 3-2:

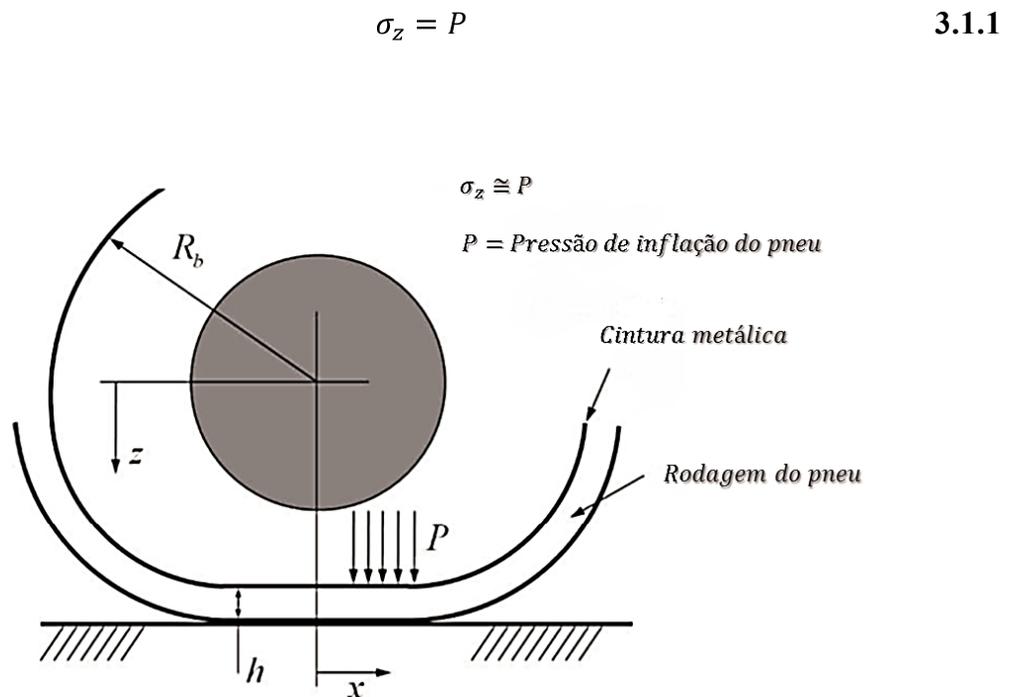


Figura 3-2 - Tensão de compressão imposta na banda de rodagem (RHYNE & CRON, 2012).

A outra deformação dominante na banda de rodagem é a gerada pela tensão cisalhamento longitudinal, aumentando linearmente conforme área de contato do pneu com o solo aumenta. É inversamente proporcional ao aumento do diâmetro do pneu. A tensão de cisalhamento é ilustrada pela Figura 3-3.

O cálculo da deformação de cisalhamento é dado por:

$$\gamma_{xz} = \frac{x}{R_B}, \quad 3.1.2$$

onde x é a distância do centro da área de contato da rodagem com o solo e R_B é o raio da cintura metálica do pneu.

Sendo $x = \frac{L}{2}$, considerando o sistema estacionário, ou seja, o modelo analítico não considera a abordagem dinâmica para o sistema, a máxima deformação de cisalhamento para o problema é dada por:

$$\gamma_{xz} = \frac{L}{2R_B}, \quad 3.1.3$$

onde L é comprimento total da área de contato do pneu com o solo.

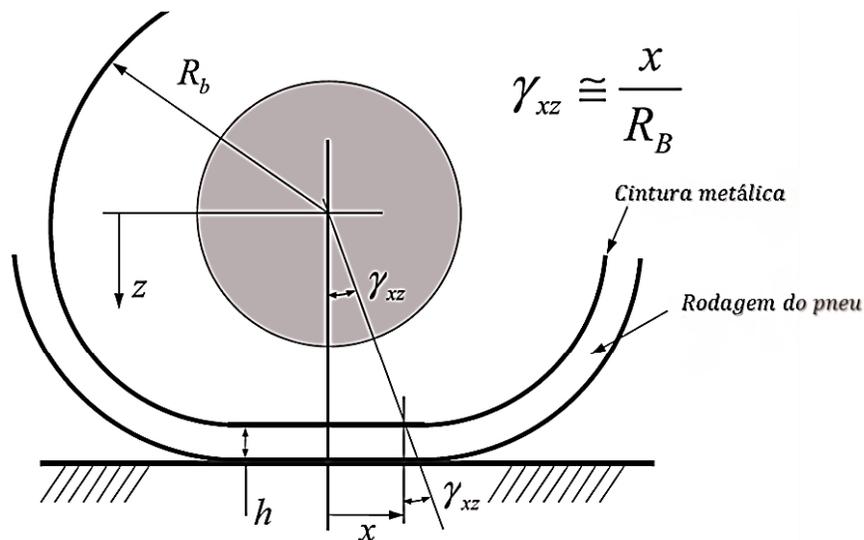


Figura 3-3 – Esforço de cisalhamento longitudinal imposta na banda de rodagem do pneu, em contato com o pavimento. (RHYNE & CRON, 2012)

O cálculo da equação da densidade de energia de deformação é dado por:

$$E = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad 3.1.4$$

Rhyne & Cron consideram as tensões normais na banda de rodagem nas direções longitudinais e laterais nulas para o problema. Sendo assim pode-se escrever os tensores de tensão e de deformação para a banda de rodagem conforme demonstrado a seguir, usando a lei de Hooke, onde E' é o módulo elástico do composto da rodagem e ν é o coeficiente de Poisson:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{E'x}{3R_B} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{E'x}{3R_B} & 0 & -P \end{bmatrix} \quad \varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\nu P}{E'} & 0 & \frac{x}{2R_B} \\ 0 & \frac{\nu P}{E'} & 0 \\ \frac{x}{2R_B} & 0 & -\frac{P}{E'} \end{bmatrix} \quad 3.1.5$$

Baseado nos tensores dados na Eq. (3.1.5), tem-se a energia de deformação por unidade de volume:

$$E_{loss} = \int \sigma_{zz} d\varepsilon_{zz} + 2 \int \sigma_{xz} d\varepsilon_{xz} \quad 3.1.6$$

As deformações na rodagem do pneu são consideradas sendo senoidais e essa consideração é razoável para deformações que podem ser representadas usando a série de Fourier para os termos harmônicos. A tensão e deformação podem ser escritas respectivamente:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \text{sen}(\omega t) \quad 3.1.7$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \text{sen}(\omega t - \delta), \quad 3.1.8$$

onde ω é a velocidade angular do pneu e δ é o ângulo de defasagem entre a tensão e deformação no material da rodagem. É importante ressaltar que para altas velocidades pode ocorrer um fenômeno chamado de ondas estacionárias, onde aumentariam de forma significativa as deformações e conseqüentemente a dissipação de energia, e por isso as equações (3.1.7) e (3.1.8) precisariam ser revistas.

O cálculo da densidade de energia de deformação para um ciclo do pneu é dado por:

$$E_{loss} = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sigma(t) \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} dt \quad \mathbf{3.1.9}$$

Porém, inserindo a deformação e tensão descritos pelas Eq. (3.1.7) e (3.1.8) na Eq. (3.1.9), tem-se:

$$E_{loss} = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sigma_0 \sin(\omega t) \varepsilon_0 \omega \cos(\omega t - \delta) dt, \quad \mathbf{3.1.10}$$

e integrando a Eq. (3.1.10) obtém-se a seguinte relação:

$$E_{loss} = \left\{ \left[\frac{1}{2} t \sin(\delta) - \frac{\cos(\delta - 2\omega t)}{4\omega} \right] \sigma_0 \varepsilon_0 \omega \right\}_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \quad \mathbf{3.1.11}$$

$$E_{loss} = \sigma_0 \varepsilon_0 \pi \sin(\delta) \quad \mathbf{3.1.12}$$

Sendo:

$$\sigma_0 \varepsilon_0 = \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + 2\sigma_{xz} \varepsilon_{xz}, \quad \mathbf{3.1.13}$$

tem-se a energia dissipada por unidade de volume do material deformado em um ciclo:

$$E_{loss} = (\sigma_{zz}\varepsilon_{zz} + 2\sigma_{xz}\varepsilon_{xz}) \pi \sin(\delta) \quad \mathbf{3.1.14}$$

Agora acrescentando as amplitudes de tensão e deformação da Eq. (3.1.5) na Eq. (3.1.14), temos como resultado a energia dissipada por unidade de volume do material deformado em um ciclo:

$$E_{loss} = \left(\frac{P^2}{4E'} + \frac{E'l^2}{12R_B^2} \right) \pi \sin(\delta) \quad \mathbf{3.1.15}$$

Nota-se que o primeiro termo da Eq. (3.1.15) representa a parcela do esforço de compressão na rodagem do pneu e o segundo a parcela do esforço de cisalhamento.

Como a definição de resistência ao rolamento é a energia dissipada por unidade de distância percorrida pelo pneumático, a Eq. (3.1.15) deve ser multiplicada pelo volume de material deformado e pela distância percorrida em uma volta do pneu.

O volume do material deformado pode ser estimado conforme demonstrado:

$$V = 2\pi R_B W h (csr), \quad \mathbf{3.1.16}$$

onde W é a largura da rodagem, h é a espessura de borracha entre a cintura metálica do pneu até a superfície da rodagem, e csr (contact surface ratio) é a razão de superfície efetiva de contato do pneu com o solo (área total de contato do pneu menos os sulcos e canais existentes no desenho da banda de rodagem) dividido pela área total de contato do pneu.

A distância percorrida em uma volta do pneu é dada por:

$$\frac{Distância}{Ciclo} = 2\pi R_B \quad \mathbf{3.1.17}$$

A área de contato do pneu com o solo é assumida como sendo retangular, e a carga atuante no pneu F_z é assumida como sendo igual à pressão de inflação na região de contato entre o pneu e o pavimento, ou seja, desprezando-se o efeito da rigidez da cintura metálica à resistência a flexão do pneu.

Sendo assim, o comprimento dessa área de contato considerando apenas o pneu em regime estacionário, o qual não leva em consideração as diferentes deformações em dinâmica que o pneu é submetido quando em frenagem, aceleração ou manobras em curvas, pode ser escrito da seguinte forma:

$$L = \frac{F_z}{PW} \quad \mathbf{3.1.18}$$

Agora com todas as definições necessárias apresentadas, pode-se calcular a resistência ao rolamento gerada devido à deformação cíclica do pneu:

$$F_r = \left(\frac{P^2W}{4E'} + \frac{E'F_z^2}{12P^2R_B^2W} \right) \pi(cs r)h \sin(\delta) \quad \mathbf{3.1.19}$$

Sendo a resistência ao rolamento expressa na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) por um coeficiente, afim de normalizar os resultados de resistência ao rolamento obtidos. Portanto divide-se a Eq. (3.1.19) pela carga aplicada no pneu (F_z) e multiplica-se por 1000, e assim obtém-se o coeficiente de resistência ao rolamento (CRR) para o mesmo pneu:

$$CRR = 1000 \left(\frac{P^2W}{4E'F_z} + \frac{E'F_z}{12P^2R_B^2W} \right) \pi(cs r)h \sin(\delta) \quad \mathbf{3.1.20}$$

Os resultados obtidos para um determinado pneu, através do modelo analítico de Rhyne & Cron são demonstrados e discutidos no capítulo 5.

3.2 Modelo analítico proposto

Para o desenvolvimento do novo modelo analítico para estimar a resistência ao rolamento de pneus proposto nesse trabalho, são utilizadas as mesmas considerações (hipóteses e simplificações) apresentadas no modelo analítico de Rhyne & Cron, conforme discutido na seção 3.1.

A principal diferença entre os dois modelos está no entendimento de como se dá a interação do pneu com o pavimento. O modelo proposto considera que na região onde acontece a interação entre pneu e pavimento, forma-se uma superfície de contato e não somente um ponto de contato, conforme é tratado durante o desenvolvimento do modelo de Rhyne & Cron.

Essa mudança permitiu uma melhor aproximação entre os testes experimentais e o modelo analítico.

As equações de (3.1.1) à (3.1.5) utilizadas na fundamentação teórica do modelo de Rhyne & Cron, são também utilizadas para o desenvolvimento do modelo analítico proposto.

Portanto, sendo a densidade de energia de deformação uma relação da área entre tensão e deformação (Figura 3-4), pode-se então determiná-la através da seguinte equação:

$$E_0 = \frac{\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}}{2} \quad 3.2.1$$

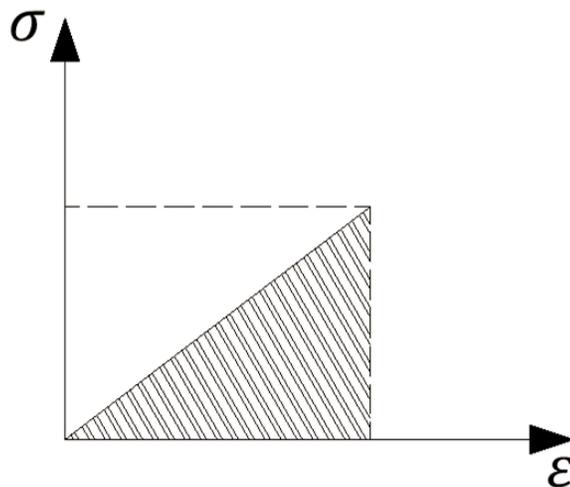


Figura 3-4 - Relação entre tensão e deformação.

A energia de deformação total devido a um determinado amassamento do pneu em contato com o pavimento é dada por:

$$E_T = \int_V E_0 dV \quad 3.2.2$$

Substituindo E_0 na Eq. (3.2.2), é obtida a equação de energia de deformação:

$$E_T = \int_V \frac{\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}}{2} dV \quad 3.2.3$$

Utilizando os tensores de tensão e deformação apresentados na Eq. (3.1.6) na Eq. (3.2.3), tem-se a energia de deformação total:

$$E_T = \frac{\sigma_{zz}\varepsilon_{zz}}{2} \int_V dV + \sigma_{xz}\varepsilon_{xz} \int_V dV \quad 3.2.4$$

O cálculo do volume é baseado na área formada pelo contato do pneu com o pavimento, conforme demonstrado na Figura 3-5, é dado por:

$$\int_V dV = csrWhR_B \int_{-\alpha}^{\alpha} d\theta, \quad 3.2.5$$

$$\int_V dV = csrWhR_B 2\alpha \quad 3.2.6$$

onde csr (*contact surface ratio*) é a razão de superfície efetiva de contato do pneu com o solo (área total de contato do pneu menos os sulcos e canais existentes no desenho da banda de rodagem) dividido pela área total de contato do pneu e W a largura da rodagem.

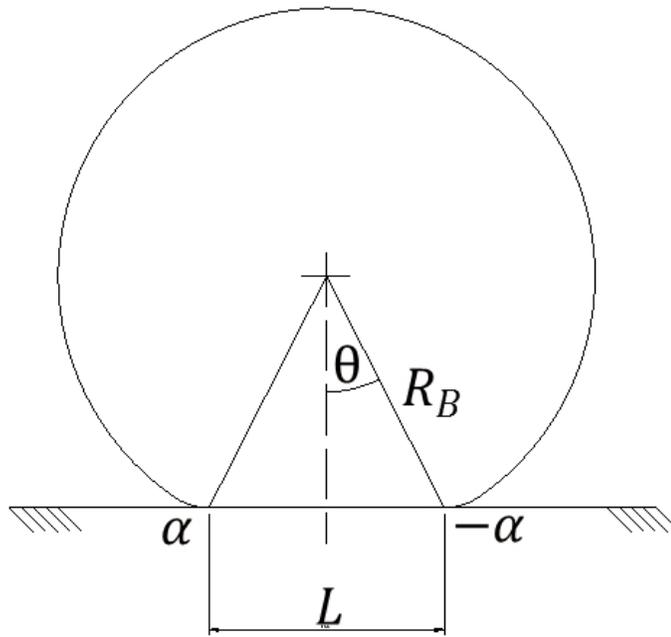


Figura 3-5 - Área de contato devido ao amassamento do pneu sobre o pavimento.

Substituindo a Eq. (3.2.6) na Eq. (3.2.4), tem-se:

$$E_T = \frac{\sigma_{zz}\epsilon_{zz}}{2}(csrWhR_B2\alpha) + \sigma_{xz}\epsilon_{xz}(csrWhR_B2\alpha) \quad 3.2.7$$

Inserindo as amplitudes de tensão e deformação obtidos pela Eq. (3.1.5) na equação de energia total acima descrita, obtém-se:

$$E_T = \frac{p^2}{2E'}(csrWhR_B2\alpha) + \frac{x^2E'}{6R_B^2}(csrWhR_B2\alpha) \quad 3.2.8$$

Partindo das mesmas primícias de Rhyne & Cron, onde é assumido que a carga atuante no pneu é igual à pressão de inflação na região de contato entre o pneu e o pavimento, desde que, seja desprezado o efeito da rigidez da cintura metálica a resistência a flexão do pneu. E também que o pneu é apenas analisado em regime estacionário, o qual não leva em consideração as diferentes

deformações em dinâmica que o pneu é submetido quando em frenagem, aceleração ou manobras em curvas, tem-se as seguintes relações:

$$\alpha = \frac{L}{2R_B}, \quad 3.2.9$$

$$L = \frac{F_z}{WP}, \quad 3.2.10$$

$$2x = L, \quad 3.2.11$$

tem-se a equação final da energia de deformação total devido a um amassamento do pneu em contato com o pavimento:

$$E_T = \frac{PF_z}{2E'} csr h + \frac{F_z^3 E'}{24R_B^2 P^3 W^2} csr h \quad 3.2.12$$

O cálculo da energia de deformação total durante um ciclo do pneu (uma volta completa), é dado por:

$$E_{Tciclo} = \int_0^{2\pi} E_T d\theta \quad 3.2.13$$

$$E_{Tciclo} = E_T \cdot 2\pi \quad 3.2.14$$

Substituindo a Eq. (3.2.12) na Eq. (3.2.14), obtém-se a energia total de deformação em um ciclo do pneu:

$$E_{Tciclo} = \left(\frac{PF_z}{2E'} csr h + \frac{F_z^3 E'}{24R_B^2 P^3 W^2} csr h \right) 2\pi \quad 3.2.15$$

Para obter a energia dissipada em um ciclo, é inserida a propriedade da borracha da banda de rodagem do pneu:

$$E_{Dciclo} = E_{Tciclo} \cdot \tan \delta \quad 3.2.16$$

Inserindo a Eq. (3.2.15) na Eq. (3.2.16), obtém-se a energia total dissipada em uma volta do pneu em contato com uma superfície:

$$E_{Dciclo} = \left(\frac{PF_z}{2E'} csr h + \frac{F_z^3 E'}{24R_B^2 P^3 W^2} csr h \right) 2\pi \cdot \tan \delta \quad 3.2.17$$

Para obter a resistência ao rolamento (F_r), divide-se a energia total dissipada em um ciclo do pneu pela distância percorrida durante esse mesmo ciclo. E sendo a distância percorrida em um ciclo calculada por:

$$D_{ciclo} = 2\pi R_B, \quad 3.2.18$$

tem-se a resistência ao rolamento (F_r):

$$F_r = \left(\frac{PF_z}{2E'R_B} + \frac{F_z^3 E'}{24R_B^3 P^3 W^2} \right) csr \cdot h \cdot \tan \delta \quad 3.2.19$$

E do mesmo modo que foi apresentada no modelo analítico de Rhyne, a resistência ao rolamento pode ser expressa por meio de um coeficiente de resistência ao rolamento (CRR) e expresso por quilograma / tonelada. Portanto, dividindo-se a Eq. (3.2.19) pela carga aplicada no

pneu (F_z) e multiplicando por 1000, obtendo-se o coeficiente de resistência ao rolamento (CRR) para o mesmo pneu:

$$CRR = 1000 \left(\frac{P}{2E'R_B} + \frac{F_z^2 E'}{24R_B^3 P^3 W^2} \right) csr \cdot h \cdot \tan \delta \quad 3.2.20$$

Os resultados obtidos pela aplicação dos dados levantados de um pneu de carga (295/80R22,5) no modelo proposto, serão apresentados e discutidos no capítulo 5.

3.3 Procedimento de teste

O procedimento de teste usado para medição da resistência ao rolamento de pneus destinados ao uso de carros de passageiros, caminhões e ônibus, e sob condições controladas em laboratório, é a definido pela norma internacional ISO 28580. Norma que está referenciada na portaria do Inmetro 544/12, e que tem como objetivo medir a quantidade de energia dissipada ou o consumo energético para manter o pneu numa velocidade constante.

O teste de RR para pneus é realizado em uma máquina chamada de roda estrada (Figura 3-6), que consiste num tambor de aço tracionado por um motor elétrico, no qual o pneu fica rodando em contato com a superfície desse tambor em velocidade constante de 80Km/h, à uma carga vertical que é definida como sendo 80% (para pneus de carro de passageiros) e 85% (para pneus de caminhões e ônibus) da carga máxima descrita na lateral do pneu e durante um determinado tempo estipulado pela norma ISO (dependendo da aplicação do pneu), para estabilização do procedimento.

Ao final do tempo de estabilização, mede-se a potência fornecida pelo motor para manter o pneu rodando a uma velocidade constante e assim pode-se calcular a resistência ao rolamento do pneu.

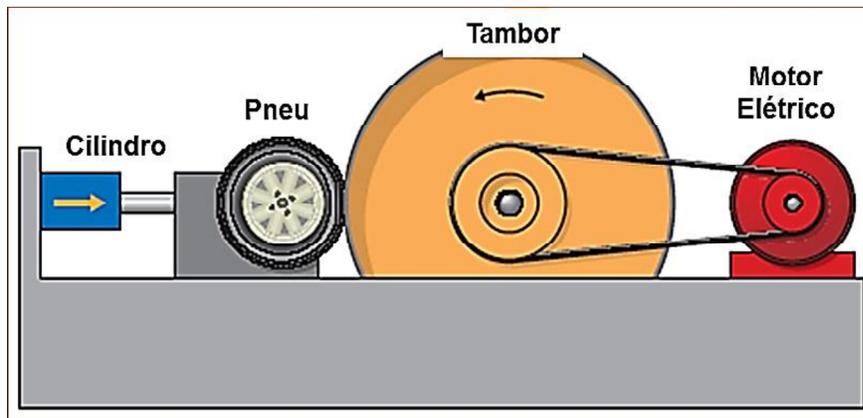


Figura 3-6 - Desenho esquemático da máquina para medição da Resistência ao Rolamento de pneus (LACLAIR, 2006).

As condições de teste para a determinação da resistência ao rolamento de um pneu, variam de acordo com sua aplicação e tamanho, conforme demonstrado na tabela Tabela 3-1.

	TIPO DE PNEUS POR APLICAÇÃO				
	Veículo de Passageiro		Caminhões e Ônibus		
	Normal	Reforçado	LI ≤ 121	LI > 121	LI > 121
Símbolo de Velocidade	Todos		Todos	J (100km/h) ou menos	K (110km/h) ou mais
Velocidade de teste (km/h)	80		80	60	80
Carga % da máxima carga indicada na lateral do pneu	80%		85%		
Pressão de Inflação (kPa)	210	250	Pressão correspondente à máxima carga, conforme indicado na lateral do pneu.		
Roda Nominal Código do Diâmetro	Todos		Todos	< 22,5	≥ 22,5
Tempo de Estabilização do teste (min)	30		50	150	180

Tabela 3-1 - Condições para realização do teste em laboratório para determinação da resistência ao rolamento de pneus, segundo a norma internacional ISO 28580. Onde LI é “load index” ou índice de carga do pneu.

A resistência ao rolamento (F_r) é calculada usando os valores obtidos testando o pneu sob condições especificadas na norma ISO 28580 e subtraindo as perdas parasitas (F_{pl}), tais como: atrito do equipamento, lubrificações e inércia, que são obtidas realizando o procedimento de

medição de CRR em laboratório, porém com a máquina em vazio, ou seja, sem que o pneu a ser testado esteja montado no equipamento.

Na Figura 3-7 estão algumas orientações de medição de alguns parâmetros a serem medidos na máquina de teste para o cálculo de resistência ao rolamento.

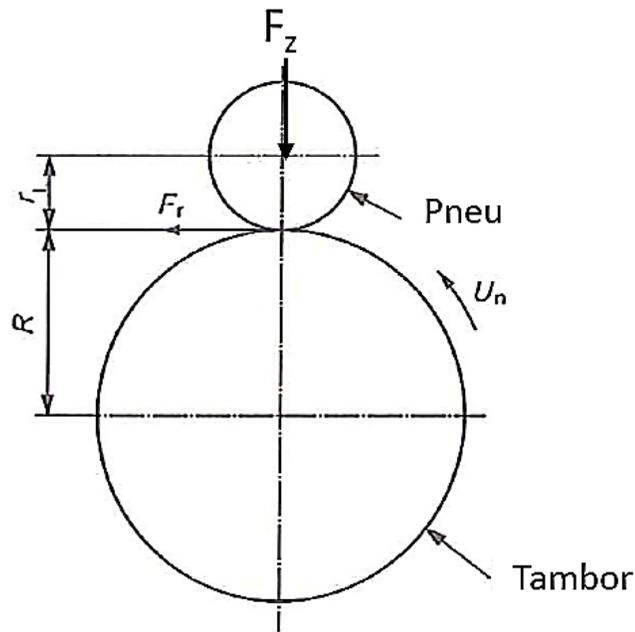


Figura 3-7 - Orientação para medição de resistência ao rolamento em laboratório (Norma ISO 28580).

A norma ISO indica quatro metodologias possíveis para a medição e determinação da resistência ao rolamento em laboratório sob condições controladas, sendo elas:

Método da Força: onde a força de reação gerada pela interface entre o pneu e o tambor é medida no cilindro da máquina roda estrada e sendo a resistência ao rolamento, F_r (expressa em newtons), calculada pela seguinte equação:

$$F_r = F_t \left(1 + \frac{r_L}{R} \right) - F_{pl}, \quad \mathbf{3.3.1}$$

onde:

F_t é a força de reação medida no cilindro da máquina roda estrada, e expressa em newtons;

r_L é a distância entre o centro do pneu até a superfície de interação com o tambor e é expressa em metros;

R é o raio do tambor sendo expresso em metros;

F_{pl} é a força gerada devido às perdas parasitas, sendo expressa em newton, e que é medida com o pneu rodando livre de carga. A perda parasita para o método da força é calculada conforme a Eq. 3.3.2.

$$F_{pl} = F_t \left(1 + \frac{r_L}{R} \right) \quad 3.3.2$$

Método do Torque: onde o torque gerado pelo tambor durante o ensaio é medido para o cálculo da F_r , que é determinada pela seguinte equação:

$$F_r = \frac{T_t}{R} - F_{pl}, \quad 3.3.3$$

onde:

T_t é o torque gerado durante o ensaio, necessário para manter o pneu à uma velocidade constante, e expresso em newtons;

R é o raio do tambor sendo expresso em metros;

F_{pl} é a força gerada devido às perdas parasitas, sendo expressa em newton, e que é medida com o pneu rodando livre de carga. A perda parasita para o método do torque é calculada conforme a Eq. 3.3.4.

$$F_{pl} = \frac{T_t}{R} \quad 3.3.4$$

Método da Desaceleração: é aquele onde é medida a desaceleração relativa entre o tambor e o pneu montado na máquina de teste, para assim calcular a F_r , que é determinada pela seguinte equação:

$$F_r = \frac{I_D}{R} \left(\frac{\Delta\omega_V}{\Delta t_V} \right) + \frac{RI_T}{R_r^2} \left(\frac{\Delta\omega_V}{\Delta t_V} \right) - F_{pl}, \quad 3.3.5$$

onde:

I_D é a inércia em rotação do tambor de teste, expressa em quilograma metro quadrado;

R é o raio do tambor sendo expresso em metros;

Δt_V é tempo de incremento escolhido para a medição, expresso em segundos;

$\Delta\omega_V$ é o incremento de velocidade angular para o tambor de teste, sem o pneu, expresso em radiando por segundo;

I_T é a inércia de rotação do pneu montado na roda da máquina, sendo expressa em quilogramas metro quadrado;

R_r é o raio do pneu em rotação, expresso metros;

F_{pl} é a força gerada devido às perdas parasitas, sendo expressa em newton, e que é medida com o pneu rodando livre de carga. A perda parasita para o método da desaceleração é calculada conforme a Eq. 3.3.6.

$$F_{pl} = \frac{I_D}{R} \left(\frac{\Delta\omega_{D0}}{\Delta t_0} \right) + \frac{I_T}{R_r} \left(\frac{\Delta\omega_{T0}}{\Delta t_0} \right), \quad 3.3.6$$

onde:

Δt_0 é tempo de incremento escolhido para a medição da perda parasita sem o pneu montado na máquina e é expresso em segundos;

ω_{D0} é a velocidade angular do tambor de teste, sem o pneu montado na máquina e é expressa em radiando por segundo;

ω_{T0} é a velocidade angular do pneu sem carga atuando sobre ele e é expressa em radiando por segundo;

Método da Potência: no qual é medida a potência dissipada pelo motor elétrico para manter o pneu rodando a velocidade constante. Essa foi a metodologia aplicada neste trabalho para a definição da resistência ao rolamento experimental.

O cálculo da F_r é dado pela seguinte equação:

$$F_r = \frac{3,6V \cdot A}{U_n} - F_{pl} \quad 3.3.7$$

onde:

V é a tensão medida no motor elétrico durante o teste e é expresso em volts;

A é a corrente medida no motor elétrico durante o teste e é expressa em amperes;

U_n é a velocidade do tambor medida durante o teste e expressa em quilômetros por hora;

F_{pl} é a força gerada devido às perdas parasitas, sendo expressa em newton, e que são medidas com o pneu rodando livre de carga. A perda parasita para o método da potência é calculada conforme a Eq.3.3.8.

$$F_{pl} = \frac{3,6V \cdot A}{U_n} \quad 3.3.8$$

Segundo a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), a resistência ao rolamento é expressa através de um coeficiente, afim de normalizar os resultados obtidos, portanto o coeficiente de resistência ao rolamento (CRR) é determinado pela seguinte equação:

$$CRR = \frac{F_r}{F_z} \quad 3.3.9$$

Somente temperaturas $\geq 20^\circ\text{C}$ e $\leq 30^\circ\text{C}$ são aceitáveis. Para as medições de CRR realizadas com temperaturas dentro deste intervalo, porém diferentes de 25°C , se faz necessário realizar uma correção para a temperatura conforme equação (3.3.10):

$$F_{r25} = F_r [1 + K_t (t_{amb} - 25)] \quad \mathbf{3.3.10}$$

onde:

F_r é a resistência ao rolamento expressa em newtons;

t_{amb} é a temperatura ambiente expressa em graus Celsius;

K_t é uma constante com os seguintes valores:

- 0,008 para pneus de carro de passageiros;
- 0,010 para pneus de caminhões e ônibus com $LI \leq 121$;
- 0,006 para pneus de caminhões e ônibus com $LI > 121$;

Os resultados dos ensaios obtidos a partir de diferentes diâmetros do tambor podem ser comparados usando a fórmula teórica (3.3.11) e (3.3.12):

$$F_{r02} = K_r F_{r01} \quad \mathbf{3.3.11}$$

$$K_r = \sqrt{\frac{(R_1/R_2)(R_2 + r_T)}{(R_1 + r_T)}} \quad \mathbf{3.3.12}$$

onde:

R_1 é o raio do tambor 1 expresso em metros;

R_2 é o raio do tambor 2 expresso em metros;

r_T é o raio nominal do pneu a ser testado expresso em metros;

F_{r01} é o valor de resistência ao rolamento medido através do tambor 1 expresso em newtons;

F_{r02} é o valor de resistência ao rolamento medido através do tambor 2 expresso em newtons;

A norma ISO define condições e parâmetros de medição da resistência ao rolamento de pneus, porém neste trabalho foram extrapolados os parâmetros de pressões e cargas definidas pela norma, afim de obter uma análise mais completa do comportamento da resistência ao rolamento do pneu de carga (através de curvas plotadas em um gráfico) em relação às várias condições de pressão e carga vertical imposta sobre o pneu.

4 Materiais e métodos

4.1 Validação da implementação do modelo analítico

Depois de entendida e descrita toda fundamentação teórica do modelo analítico de Rhyne & Cron para determinação de resistência ao rolamento de pneus de veículo de passageiro, o mesmo foi implementado em MatLab versão R2008a e plotadas as curvas de componentes de dissipação de energia na banda de rodagem (cisalhamento e compressão) e do coeficiente de resistência ao rolamento variando pressão de inflação e carga vertical imposta ao pneu.

Essas curvas plotadas através da implementação do modelo em MatLab foram comparadas às publicadas no artigo escrito por Rhyne & Cron, afim de verificar e validar a implementação e para posteriormente utilizá-la para levantar as curvas de resistência ao rolamento com os parâmetros definidos para um pneu de carga utilizando o mesmo modelo analítico de Rhyne & Cron.

4.2 Levantamento dos parâmetros do pneu de carga 295/80R22.5

Para estudar o comportamento da resistência ao rolamento de um pneu de carga foi definida a medida 295/80R22.5 por ser a principal medida utilizada no segmento de caminhões e ônibus e seus parâmetros foram medidos em um pneu comumente comercializado e fornecido pela empresa fabricante.

As medições e determinação dos parâmetros foram realizadas conforme descritas a seguir:

- A pressão de inflação (P) foi definida dentro de um intervalo (0 a 1 Mpa) que contemplasse situação real de mercado, porém com uma certa extrapolação das pressões reais de utilização pelo mercado.

- A carga vertical imposta ao pneu (F_z) foi também definida dentro de um intervalo (400N a 4100N) que contemplasse situações reais de mercado, considerando uma certa extrapolação das cargas utilizadas no mercado;
- A espessura da banda de rodagem (h) foi medida através de uma seção cortada do pneu;
- A largura da banda de rodagem (W) foi medida diretamente do pneu;
- A razão de superfície de contato do pneu com o solo (csr) foi definida utilizando a área de contato do pneu, a qual foi obtida prensando o pneu com pressão e carga nominal a uma mesa que contém sensores piezoelétricos;
- O raio da cintura metálica do pneu (R_B) foi medido através de uma seção cortada do pneu;
- A propriedade polimérica do composto da banda de rodagem ($\tan \delta$) é definida pela Eq. (2.2.6);
- O módulo elástico do composto de borracha da banda de rodagem (E') foi determinado laboratório em físico-químico através do ensaio com Instron dinâmico;

4.3 Obtenção das curvas de resistência ao rolamento para o pneu de carga segundo Modelo Analítico de Rhyne e Cron

Através do modelo analítico de Rhyne e Cron e com os parâmetros agora definidos para o pneu de carga 295/80R22.5, foram plotadas as curvas de resistência ao rolamento através da implementação do modelo em MatLab.

Sendo o objetivo entender o comportamento do pneu quanto a variação dos valores de pressão de inflação e de carga vertical imposta, foram plotadas 8 curvas que descrevem o comportamento do pneu em relação à resistência ao rolamento considerando 8 cargas verticais diferentes, para simular o uso do pneu em condições de uso com carregamentos do veículo diversos.

Segundo o manual de normas técnicas ALAPA (Associação Latino Americano de Pneus e Aros), a pressão nominal indicada para o pneu 295/80R22.5 é de 0,86Mpa, por isso para o presente estudo foi considerada um intervalo de 1Mpa para pressão de inflação do pneu, afim de obter dados extrapolados (tanto para mais quanto para menos) e assim reproduzir condições reais de uso.

De acordo com a ALAPA a máxima carga vertical permitida para o pneu 295/80R22.5 é de 35.500N, sendo assim para o presente estudo foram consideradas as seguintes cargas verticais: 4.000N, 6.000N, 8.000N, 10.000N, 19.000N, 35.500N e 41.000N, afim de obter curvas com valores extrapolados (tanto para mais quanto para menos) e assim reproduzir condições reais de uso.

4.4 Obtenção das curvas de resistência ao rolamento para o pneu de carga segundo Modelo Numérico

Para a obtenção das curvas de resistência ao rolamento segundo o modelo numérico, foram necessárias duas etapas:

- Primeiramente foi desenvolvido um modelo em elementos finitos (FEM) auxiliado pela utilização do software comercial Abaqus[®], e o mesmo foi baseado em uma estrutura real do pneu 295/80R22.5, tendo uma discretização bem complexa (aproximadamente 139.000 elementos e 257.000 nós). No modelo FEM também foram considerados, em sua grande maioria, elementos hexaédricos e todos os componentes que formam a estrutura do pneu foram caracterizados em laboratório à uma temperatura de 70° C e a uma frequência de 10Hz.No entanto esta análise numérica demanda muito tempo, além da necessidade de um computador potente devido ao alto custo matemático que se dá pela complexidade do modelo de FEM.
- Para a obtenção da resistência ao rolamento foi utilizado um software de pós-processamento desenvolvido pela empresa que cedeu o pneu e os laboratórios para a realização dos estudos desse trabalho. Esse software é baseado em um modelo viscoelástico linear e que através das deformações e tensões calculadas com o modelo FEM, permite determinar o valor absoluto de resistência ao rolamento, bem como

avaliar o consumo de energia e a contribuição de cada componente na resistência ao rolamento total do pneu.

4.5 Obtenção das curvas experimentais para validação dos resultados

A obtenção das curvas experimentais de resistência ao rolamento para o pneu 295/80R22.5 foram realizadas em laboratório seguindo a norma ISO 28.580. A seguir são descritas as seguintes condições de teste:

- O ensaio foi realizado numa máquina conhecida como roda estrada (Figura 3-6), que consiste em um volante cilíndrico (tambor) com um diâmetro de no mínimo 1,7m;
- Temperatura ambiente referência = 25°C;
- Pressão de inflação do pneu = como o intuito era obter curvas que apresentassem o comportamento do pneu, foram medidas as resistências ao rolamento, segundo a metodologia da potência, para 10 pressões diferentes: 0,34Mpa, 0,41Mpa, 0,48Mpa, 0,55Mpa, 0,62Mpa, 0,69Mpa, 0,76Mpa, 0,86 Mpa, 0,93Mpa e 1Mpa;
- Velocidade = 80 km/h;
- Carga vertical = a mesma consideração para a definição das pressões foi aplicada na definição das cargas verticais. Foram obtidas curvas para 8 cargas, sendo elas: 4.000N, 6.000N, 8.000N, 10.000N, 19.000N, 27.000N, 35.500N e 41.000N;
- Tempo de estabilização do ensaio = 180 minutos;

Após os 180 minutos de estabilização do ensaio devido à temperatura do pneu, foi medida a potência no inversor do motor gerada para manter o pneu rodando em cada uma das condições acima descrita, e aplicada na Eq. (3.3.7) para a determinação de cada resistência ao rolamento. Ao todo foram realizadas 80 medições para a obtenção das curvas experimentais para o pneu 295/80R22.5.

4.6 Obtenção das curvas de resistência ao rolamento para o pneu de carga segundo Modelo Analítico Proposto

Para obtenção das curvas de resistência ao rolamento segundo o modelo analítico proposto foram realizados os mesmos procedimentos e utilizados os mesmos parâmetros usados para a implementação do modelo de Rhyne & Cron.

Portanto também foram plotadas 8 curvas que descrevem o comportamento do pneu em relação à resistência ao rolamento que correspondem às 8 cargas verticais diferentes, para simular o uso do pneu em veículo em condições diversas.

Baseando-se no manual de normas técnicas ALAPA, onde descreve a pressão nominal (referente à máxima carga permitida para o pneu) indicada para o pneu 295/80R22.5 como sendo 0,86Mpa. Portanto foi determinado para o presente estudo, um intervalo de 1Mpa de pressão, afim de obter dados extrapolados (tanto para mais quanto para menos) e assim reproduzir condições reais de uso.

Como já utilizado para a obtenção das curvas através do modelo analítico de Rhyne & Cron, para o modelo proposto também consideradas as seguintes cargas verticais: 4.000N, 6.000N, 8.000N, 10.000N, 19.000N, 35.500N e 41.000N, afim de obter curvas com valores extrapolados (tanto para mais quanto para menos) e assim reproduzir condições reais de uso.

Com todos os parâmetros definidos e as curvas de resistência ao rolamento plotadas, os resultados são apresentados e discutidos a seguir.

5 Resultados e discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através de dois modelos analíticos, o numérico e o experimental para um pneu 295/80R22,5, que foi utilizado como referência nos estudos deste trabalho.

Com toda fundamentação teórica dos modelos analíticos apresentada no capítulo 3, os mesmos foram implementados em MatLab para o levantamento das curvas de resistência ao rolamento de pneus de carga.

Afim de verificar e validar essa implementação do modelo analítico de Rhyne & Cron foram comparadas duas curvas apresentadas no artigo dos autores com as mesmas curvas obtidas através da implementação em MatLab.

As curvas plotadas nas Figura 5-1 e Figura 5-2 referem-se aos componentes de dissipação de energia na banda de rodagem, e as curvas plotadas nas Figura 5-3 e Figura 5-4 ilustram o coeficiente de resistência ao rolamento variando a carga vertical aplicada no pneu.

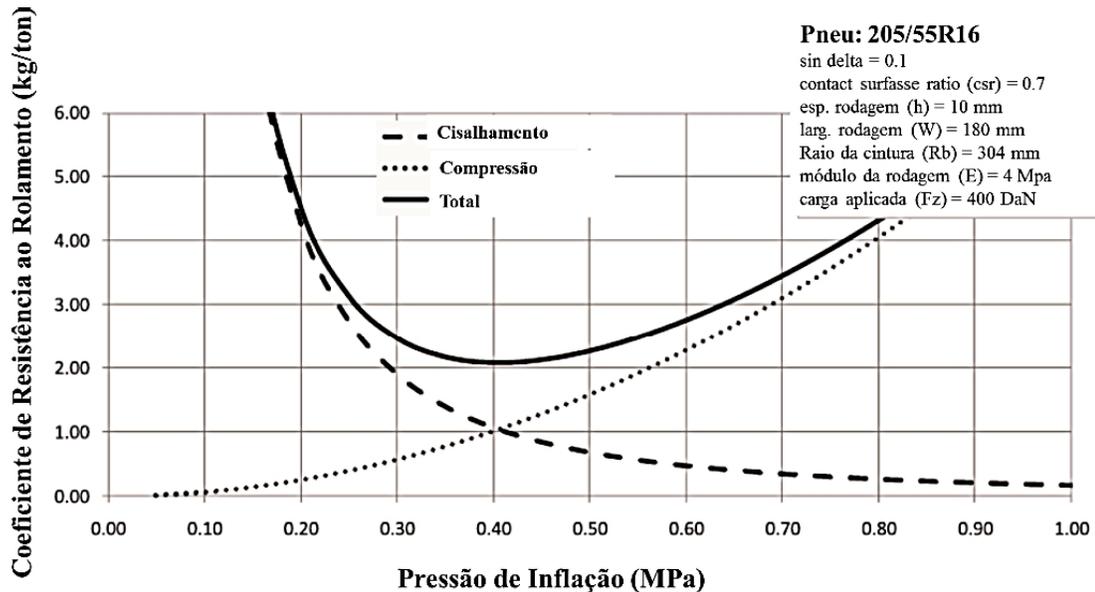


Figura 5-1 – Componentes de dissipação de energia na banda de rodagem. As curvas acima foram obtidas com dados geométricos e de material de um pneu de passeio 205/55R16. (RHYNE & CRON, 2012)

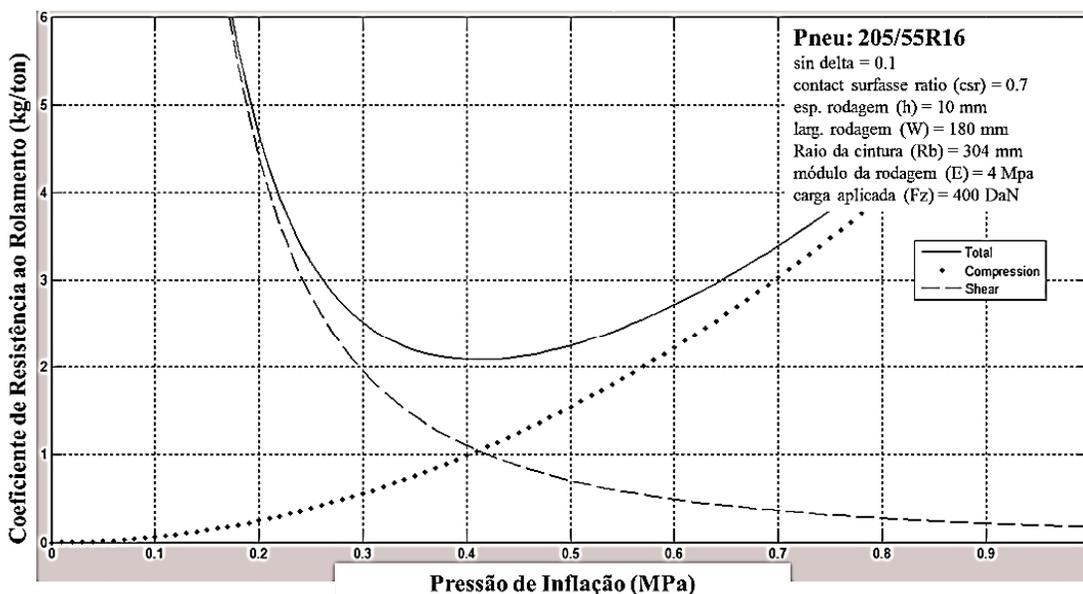


Figura 5-2 - Componentes de dissipação de energia na banda de rodagem, plotados através do programa em MatLab desenvolvido para este trabalho. Para a plotagem das curvas acima, foram utilizados os dados geométricos e de material de um pneu de passeio 205/55R16 apresentados no artigo de Rhyne & Cron.

Nos dois gráficos anteriores, os termos de compressão e de cisalhamento da Eq. (3.1.20) são plotados individualmente em relação a pressão de inflação interna do pneu. Analisando os gráficos é possível notar que para baixas pressões a parcela da tensão de cisalhamento tem maior contribuição na resistência ao rolamento e conforme a pressão sobe, a tensão de compressão tem sua contribuição aumentada e a de cisalhamento diminui proporcionalmente.

O coeficiente de resistência ao rolamento total (somatória da compressão e de cisalhamento) apresenta um valor mínimo quando as condições dos dois componentes são iguais.

Baseado na Eq. (3.1.20), foram plotados o coeficiente de resistência ao rolamento (*CRR*) versus a pressão de inflação, variando as cargas verticais impostas ao pneu (F_z) (Figura 5-3 e Figura 5-4).

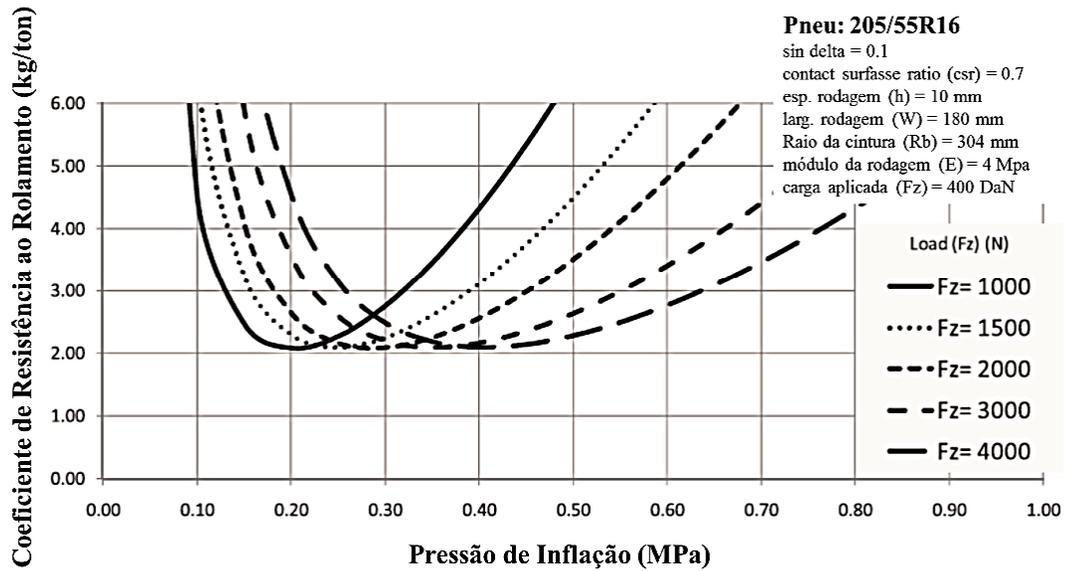


Figura 5-3 – Coeficiente de resistência ao rolamento variando a carga vertical aplicada no pneu. As curvas acima foram obtidas com dados geométricos e de material de um pneu de passeio 205/55R16. (RHYNE & CRON, 2012)

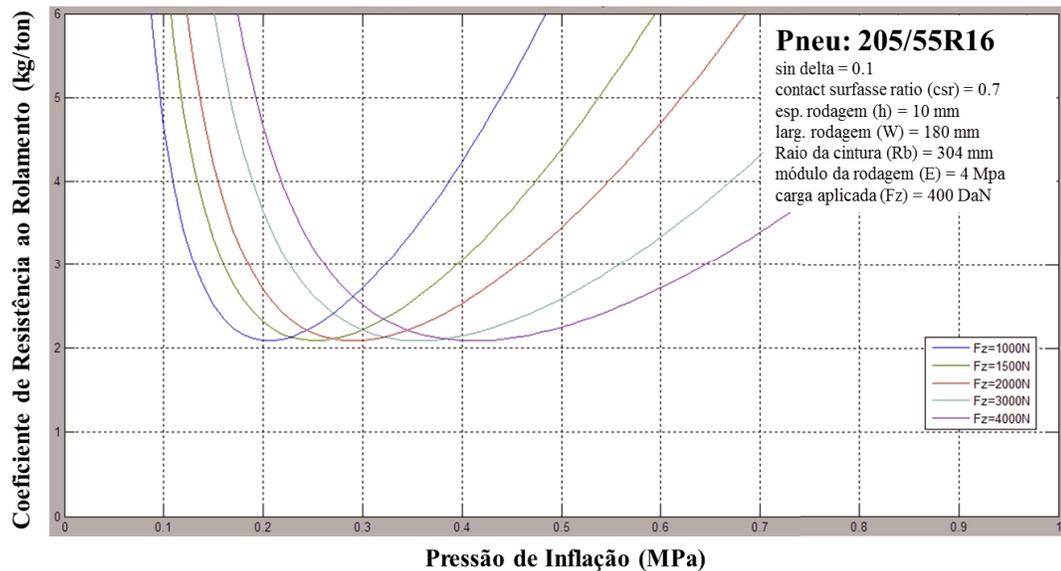


Figura 5-4 - Coeficiente de resistência ao rolamento variando a carga vertical aplicada no pneu, plotado através do programa de MatLab desenvolvido para este trabalho. Para a plotagem das curvas acima, foram utilizados os dados geométricos e de material de um pneu de passeio 205/55R16 apresentados no artigo de Rhyne & Cron.

Na Figura 5-4 pode-se observar que a variação da carga vertical imposta não influencia no valor mínimo de CRR , porém observa-se que uma variação do valor de pressão de inflação na qual ocorre o mínimo valor mínimo de CRR . Este mesmo fenômeno é o mesmo observado no trabalho de Rhyne & Cron (Figura 5-3).

Após a validação dos resultados da implementação do modelo analítico em MatLab, foram definidos os seguintes parâmetros para um pneu de carga 295/80R22.5: pressão de inflação, carga vertical imposta ao pneu, espessura e largura da banda de rodagem, área de contato do pneu com o solo, diâmetro do pneu, módulo elástico do composto polimérico e a relação de cheio/vazio do desenho de rodagem do pneu. Para obtenção desses valores, as medições foram realizadas em laboratório sob condições controladas e previamente definidas segundo norma ISO 28.580.

Na Figura 5-5 são apresentados os parâmetros necessário para o cálculo do modelo analítico, utilizando uma seção do pneu 295/80R22.5

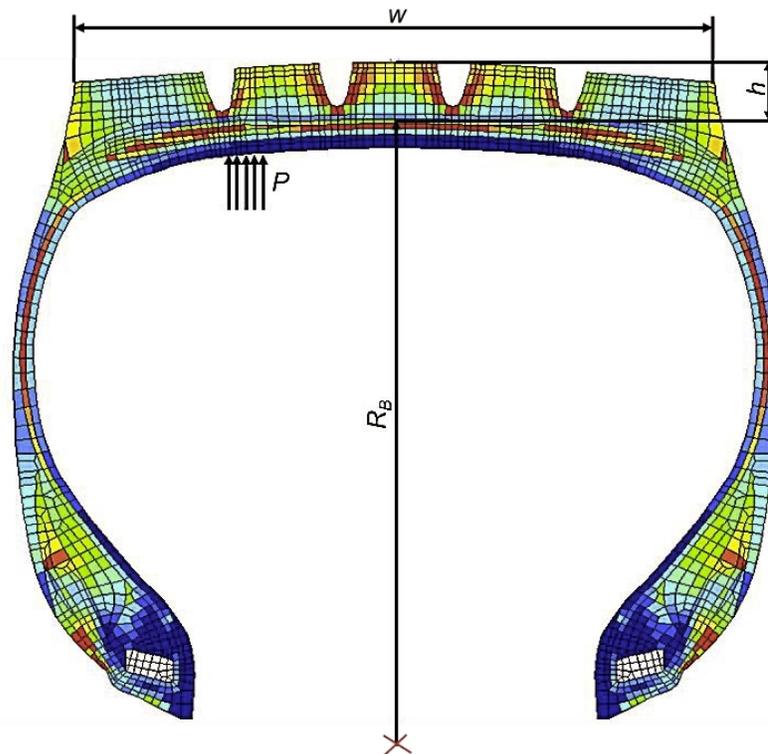


Figura 5-5 – Medição dos parâmetros necessário para o modelo analítico, utilizando uma seção do pneu 295/80R22.5. (GALI, OZELO, COSTA, & CAMPOS, 2014). P : Pressão de inflação = variando de 0 a 1 Mpa com discretização de 0.1 Mpa; F_z : Carga vertical aplicada no pneu = variando de 400N a 4100N sem discretização definida; h : Espessura da banda de rodagem = 21mm; W : Largura da banda de rodagem = 243mm; csr : Razão da superfície de contato do pneu com o solo = 0,72; R_B : Raio da cintura metálica do pneu = 507,5mm; $\tan \delta$: Propriedade polimérica do composto da banda de rodagem = 0,158; E : Módulo elástico do composto de borracha da banda de rodagem = 7.1 Mpa;

Com todos os parâmetros do pneu de carga necessários para o modelo analítico já definidos, foram plotadas as curvas dos componentes de dissipação de energia na banda de rodagem, afim de entender o comportamento desse pneu de carga quanto a contribuição de cada uma delas (Figura 5-6).

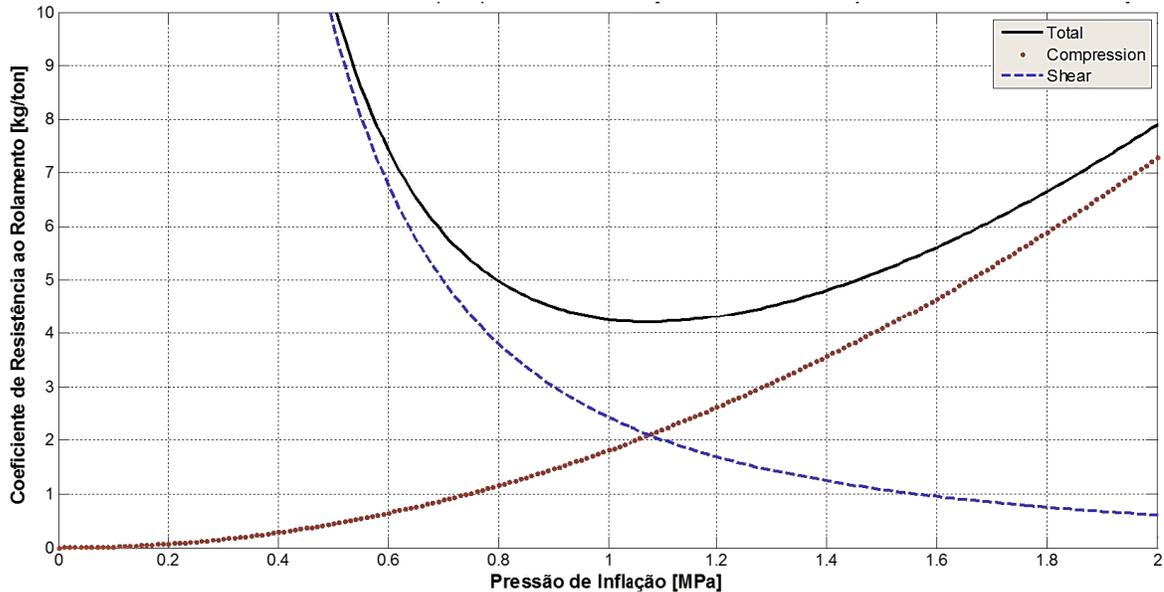


Figura 5-6 - Componentes de dissipação de energia na banda de rodagem para um pneu de carga 295/80R22.5, segundo modelo analítico de Rhyne & Cron.

Na Figura 5-6 observa-se um comportamento muito semelhante ao do pneu de passeio, ou seja, que para baixas pressões a parcela da tensão de cisalhamento tem maior contribuição na resistência ao rolamento e conforme a pressão é elevada, a tensão de compressão tem sua contribuição aumentada se tornando a componente de maior contribuição na resistência ao rolamento.

A seguir foram plotadas as curvas de resistência ao rolamento (F_r) variando pressão de inflação interna e carga vertical aplicada para o pneu 295/80R22.5, utilizando o modelo analítico de Rhyne & Cron. (Figura 5-7).

Como todos os resultados foram obtidos através de um pneu que é comercializado e seus valores são de propriedade intelectual da empresa que me permitiu realizar todo o estudo com seu

produto e em seus laboratórios, os resultados de F_r serão plotados nos gráficos com seus valores em escala normalizada variando entre 0 e 1.

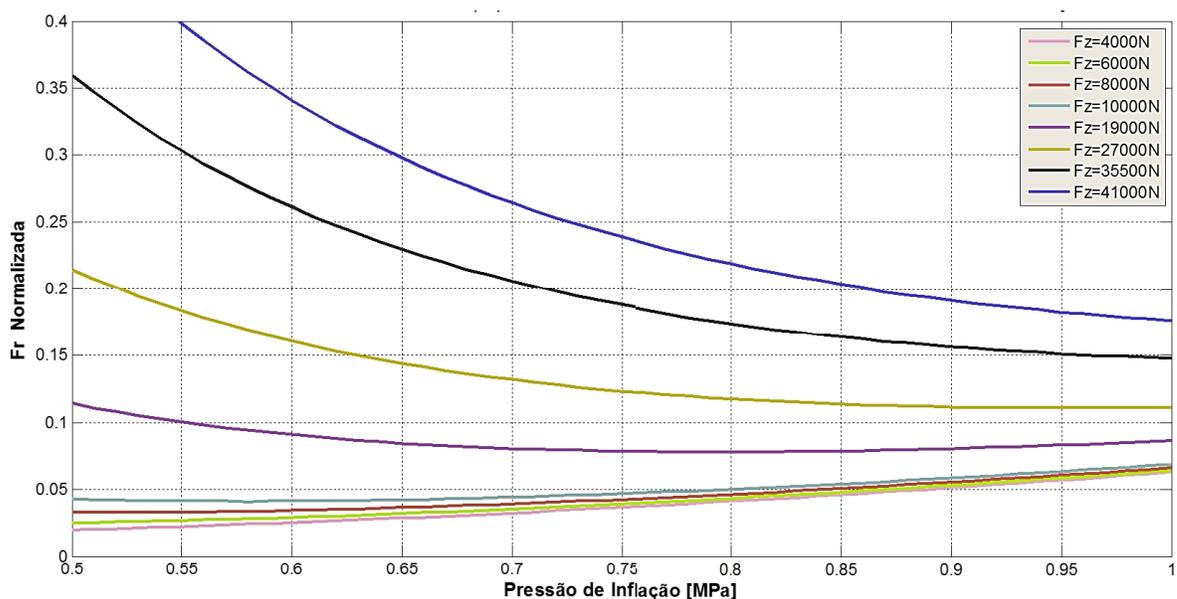


Figura 5-7 - Resistência ao rolamento, com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, variando pressão de inflação e carga vertical aplicada no pneu 295/80R22.5, utilizando modelo analítico de Rhyne & Cron.

Para validar os resultados obtidos com o pneu de carga, utilizando o modelo analítico de Rhyne, foram plotadas as mesmas curvas de F_r com os mesmos parâmetros do pneu, através de modelo numérico (Figura 5-8).

Em geral análises numéricas são realizadas através do método de elementos finitos (FEM). Usando a teoria da FEM e de viscoelasticidade é possível desenvolver ferramentas eficientes para prever o valor absoluto de resistência ao rolamento, bem como avaliar o consumo de energia e a contribuição na resistência ao rolamento para cada componente específico na estrutura do pneu (ver Figura 2-1 e Figura 2-7).

No entanto esta análise numérica demanda de tempo e de um computador potente devido ao alto custo matemático gerado pela complexidade do modelo de elemento finitos (Figura 5-5). O desenvolvimento desse modelo FEM é baseado em uma estrutura de um pneu protótipo pré-

definido, ou seja, já com um projeto do pneu bem avançado e com discretização complexa, conforme já discutido no Capítulo 4.4.

O modelo numérico utilizado para a análise de resistência ao rolamento, foi desenvolvido pela mesma empresa que cedeu o pneu e os laboratórios, e é baseado em um modelo viscoelástico linear que interage com o modelo FEM, utilizando as deformações e tensões geradas para as condições de contorno definidas durante a construção do modelo, para assim calcular o valor absoluto de resistência ao rolamento, bem como avaliar o consumo de energia e a contribuição de cada componente na resistência ao rolamento total do pneu.

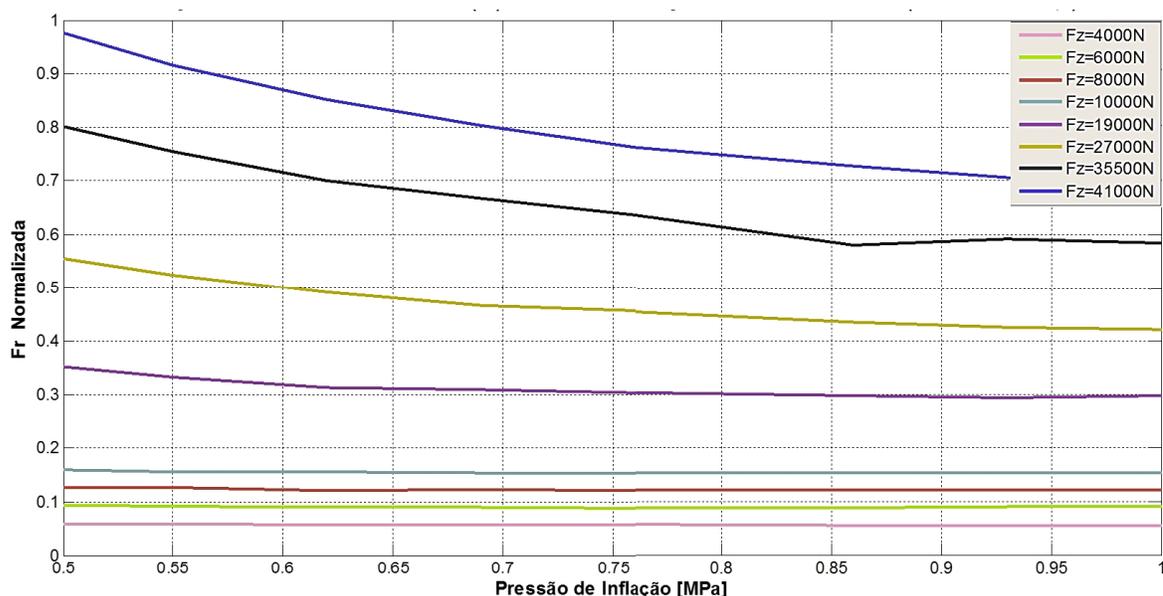


Figura 5-8 - Resistência ao rolamento, com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, variando pressão de inflação e carga vertical aplicada no pneu 295/80R22.5, utilizando modelo numérico.

Comparando os resultados do modelo analítico de Rhyne & Cron com o modelo numérico, percebe-se uma diferença de comportamento. As curvas da Figura 5-7 apresentam um comportamento de redução de resistência ao rolamento com o aumento da pressão de inflação até o ponto de inflexão no qual o aumento da pressão de inflação do pneu, implica no aumento da resistência ao rolamento. No entanto, as curvas da Figura 5-8 apresentam uma tendência de

estabilização do valor da resistência ao rolamento a partir de uma determinada pressão (variando conforme a carga vertical imposta, F_z).

Antes da realização do procedimento experimental para obtenção das curvas, foram realizadas 6 medições com o mesmo pneu e com os mesmos parâmetros descritos na norma ISO 28.580: pressão de inflação interna de 125 psi, 85% da carga vertical máxima permitida para o pneu 295/80R22.5 e com velocidade de 80 km/h, afim de verificar a repetitividade dos resultados (Figura 5-9).

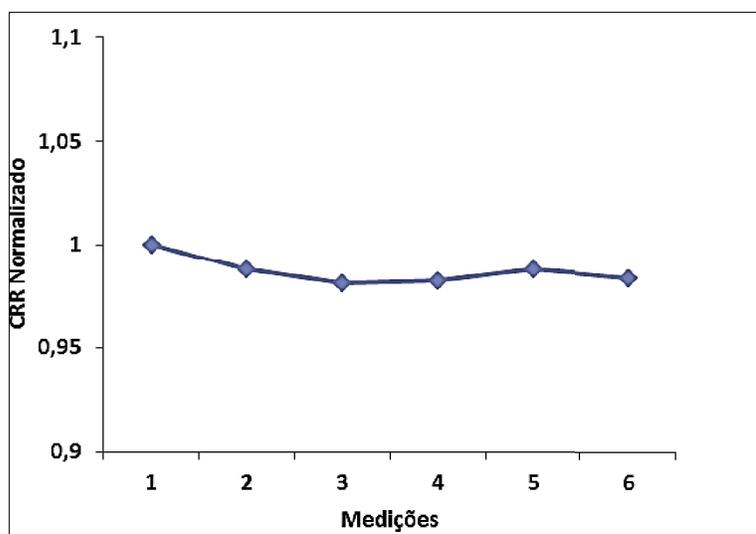


Figura 5-9 - Levantamento estatístico de 6 medições do *CRR*, com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, de um mesmo pneu 295/80R22.5 para verificar a repetitividade dos resultados obtidos em laboratório. Desvio padrão = 0,007.

Pela Figura 5-9 conclui-se que a metodologia de medição e determinação de resistência ao rolamento experimental tem boa repetitividade dos resultados.

Para a verificação de qual modelo, analítico ou numérico, apresentava comportamento de resistência ao rolamento com maior representatividade, realizou-se o levantamento em laboratório das curvas experimentais para o pneu 295/80R22.5 (Figura 5-10) considerando os mesmos parâmetros de pressão de inflação e carga vertical aplicada, conforme condições de teste descritas na norma ISO 28580.

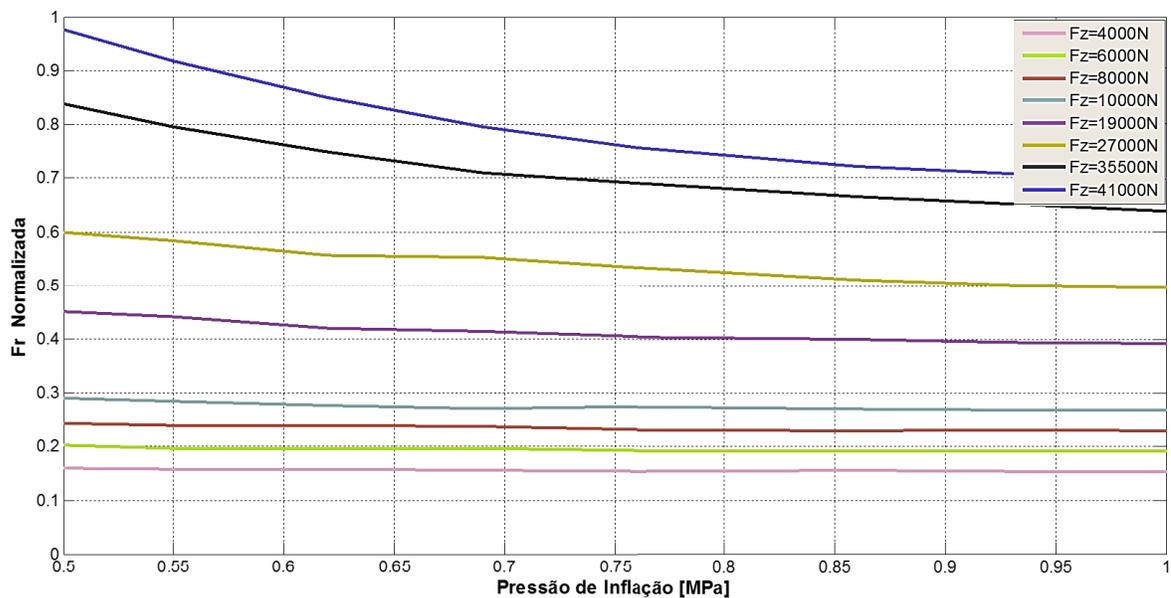


Figura 5-10 - Resistência ao rolamento, com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, variando pressão de inflação e carga vertical aplicada no pneu 295/80R22.5, curvas experimentais conforme condições da norma ISO 28580.

Comparando-se os gráficos dos dois modelos (analítico de Rhyne & Cron e o modelo numérico) com os resultados experimentais, percebeu-se que o modelo analítico não apresentou boa correlação quanto ao comportamento das curvas de resistência ao rolamento, quando aplicado com os parâmetros do pneu carga.

Analisando mais profundamente o modelo analítico de Rhyne & Cron, verificou-se que os autores utilizaram uma abordagem matemática simplificada no cálculo do volume deformado na região de interação entre o pneu e o pavimento, a qual não leva em conta a área total formada devido à essa deformação e que muda com a variação dos valores de pressão interna do pneu e com a carga imposta sobre o mesmo.

Baseado nesse princípio e afim de obter resultados com maior proximidade aos resultados experimentais foi proposto um novo modelo analítico, levando-se em consideração a área gerada na região de interação pneu/pavimento para o cálculo de integral de volume.

Na Figura 5-11 foram plotadas as curvas de resistência ao rolamento (F_r) variando pressão de inflação interna e carga vertical imposta para o mesmo pneu 295/80R22.5, utilizando o novo modelo analítico proposto nesse trabalho.

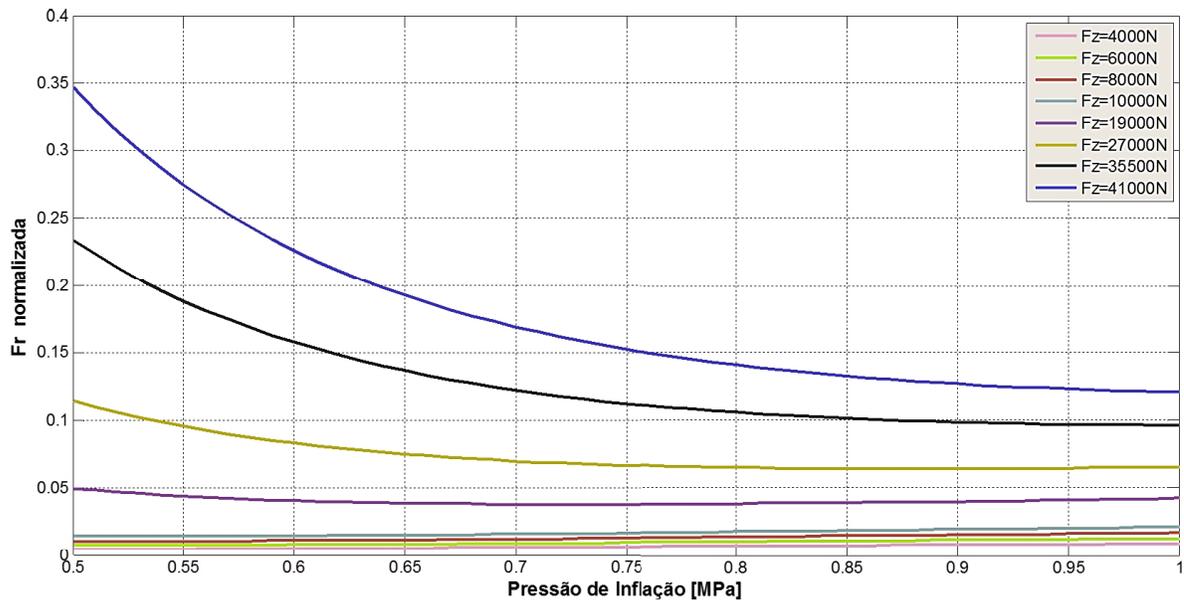


Figura 5-11 - Resistência ao rolamento, com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, variando pressão de inflação e carga vertical aplicada no pneu 295/80R22.5, utilizando o modelo analítico proposto.

Comparando o gráfico plotado através do modelo analítico proposto (Figura 5-11) com o modelo numérico (Figura 5-8) e com os resultados experimentais (Figura 5-10), verifica-se que o novo modelo analítico apresenta uma correlação satisfatória quanto ao comportamento da resistência ao rolamento, ou seja, apresenta a mesma tendência de estabilização do valor da resistência ao rolamento a partir de uma determinada pressão (variando conforme a carga vertical aplicada, F_z) que é verificada nos modelos numérico e experimental.

Quanto ao valor absoluto de resistência ao rolamento, o modelo analítico apresenta limitações por ser um modelo simplificado que não considera todos os componentes do pneu, dando ênfase na banda de rodagem por ser o componente que tem maior influência no resultado total de resistência ao rolamento (Figura 2-7). Por este motivo os valores encontrados são menores do que o modelo numérico, que possui uma maior interação entre todos os elementos que influenciam nessa variável.

Durante o desenvolvimento do modelo analítico de resistência ao rolamento de pneus de carga foi observado que as curvas plotadas referentes ao comportamento do coeficiente de resistência ao rolamento (CRR) apresentavam uma inversão nos resultados a partir de uma pressão de 0,5 Mpa, Figura 5-12.

Para baixas pressões, quanto maior a carga vertical imposta no pneu, maior será o coeficiente de resistência ao rolamento, porém a partir da zona de inflexão das curvas de CRR, para pressões mais altas, o coeficiente de resistência ao rolamento diminui com o aumento da carga vertical imposta no pneu.

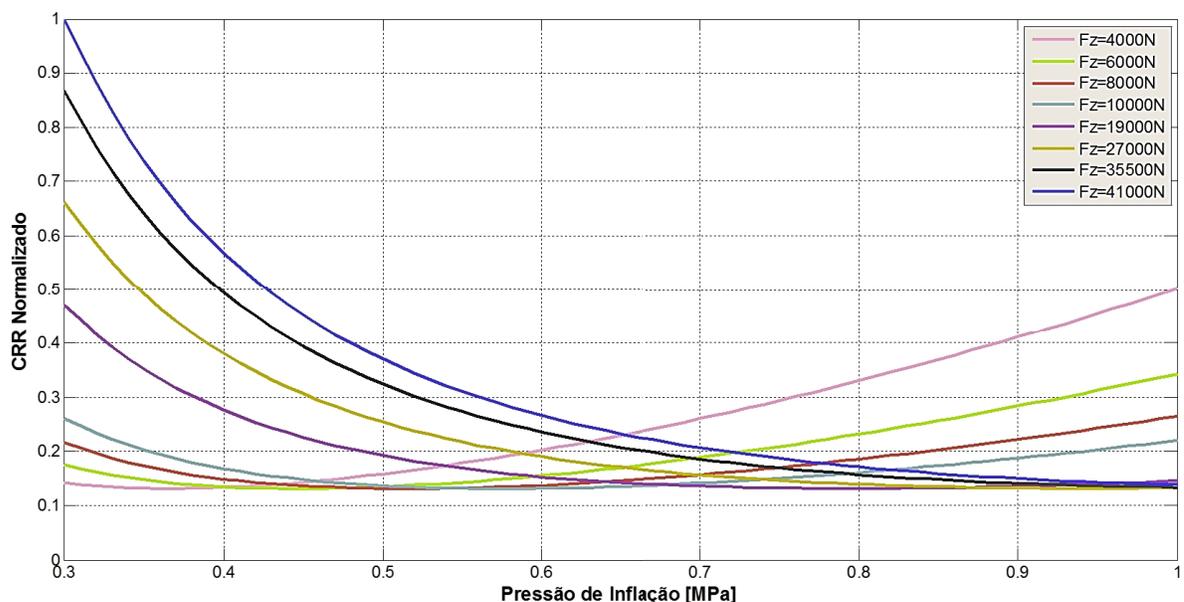


Figura 5-12 - Coeficiente de Resistência ao Rolamento, com escala normalizada entre os valores de 0 a 1, obtido através do modelo analítico de Rhyne & Cron para um pneu de carga 295/80R22.5.

O fenômeno de inversão dos resultados de resistência ao rolamento observado no gráfico anterior, foi discutido e também observado nos trabalhos de LaClair (2006) e Lambillotte (2011), conforme foi visto no capítulo 2 (ver Figura 2-8 e Figura 2-9).

O coeficiente de resistência ao rolamento é definido e descrito pela norma ISO 28.580, onde as condições de teste são determinadas e especificadas, e tal coeficiente tem como intuito a normalização da publicação dos resultados obtidos em laboratório. Porém não é muito eficaz para análise comportamental de pneus em relação à resistência ao rolamento, variando os valores de pressão de inflação e carga vertical imposta no pneu.

Testes experimentais são uma etapa essencial no desenvolvimento do produto, contudo modelos preditivos podem ser considerados com uma ferramenta muito rica para o desenvolvimento de produtos, a fim de economizar tempo e custos. Além disso, modelos preditivos

também podem indicar as regiões críticas na estrutura do pneu e ajudar na avaliação de outros parâmetros de projeto (como por exemplo o envelhecimento do pneu), buscando melhorar o desempenho e integridade do produto. Isso porque, o envelhecimento do pneu e a vida útil do composto de borracha é diretamente afetado pela dissipação de energia interna e o mapa de temperatura resultante.

Os modelos numéricos e analíticos têm funções específicas no desenvolvimento de produtos, as quais são definidas devido as suas limitações.

Modelos analíticos podem proporcionar resultados rápidos e de baixo custo, que auxiliam na definição estrutural do pneu ou na análise se uma alteração operacional pode proporcionar uma melhoria ou não, sobre a dissipação de energia do produto. Esses modelos não são indicados para um estudo onde o número absoluto se faça necessário, mas é uma boa ferramenta para estudos com valores relativos e que permita uma análise comportamental do pneu em várias condições de contorno, porém é necessário que a análise analítica seja realizada com um pneu de referência já validado.

Apesar da resistência ao rolamento ser um fenômeno complexo para ser modelado analiticamente, novos modelos analíticos vêm sendo propostos ao longo dos anos com melhor qualidade de resultados obtidos.

Modelos numéricos, por outro lado, podem fornecer valores de resultados detalhados e estimar o desempenho do produto com maior correlação com o resultado real. No entanto, eles exigem maior tempo de preparação e análise, devido ao alto custo matemático que se dá pela complexidade do modelo e da riqueza de detalhes e informações que são consideradas na análise.

Com base nos estudos deste mestrado, foi escrito e apresentado um artigo que aborda as atuais exigências de mercado, como novas leis e programas de incentivo que buscam alavancar os estudos sobre a economia de combustível e consequentemente sobre a resistência ao rolamento (RR) em pneumáticos. Um modelo analítico preditivo e simplificado de RR é também apresentado, junto aos resultados obtidos através dele.

Buscando validar tal modelo analítico, seus resultados foram comparados aos resultados de outro modelo analítico e numérico já consolidados e finalizado comparando-o com os dados experimentais obtidos em testes realizados em laboratórios (GALI, OZELO, COSTA, & CAMPOS, 2014).

6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e perspectivas futuras do presente trabalho. No início, são abordadas as conclusões baseadas no objeto de estudos, seguindo da proposta apresentada e dos resultados obtidos. Por fim, uma breve introdução da direção sugerida para pesquisas futuras.

6.1 Conclusões

Comparando os resultados do modelo analítico de Rhyne & Cron com os resultados experimentais, verificou-se que o modelo analítico não apresentou boa correlação quanto ao comportamento das curvas de resistência ao rolamento plotadas implementando os parâmetros do pneu carga 295/80R22.5.

Fazendo uma análise das possíveis causas, foi constatado que os autores consideraram uma abordagem muito simples para o cálculo do volume deformado na região de interação entre o pneu e o pavimento. Desta forma, a área total na região de contato, que é impactada pela variação da pressão e da carga vertical imposta ao pneu, não foi implementada de forma eficaz no cálculo de energia dissipada.

Baseado nesse princípio e afim de obter resultados com maior proximidade aos resultados experimentais, foi proposto um novo modelo analítico que considera essa área total gerada pela deformação na região de interação pneu e o pavimento.

Através dos resultados obtidos pelo modelo analítico proposto, concluiu-se que a contribuição proposta a respeito da área de contato apresentou resultados de comportamento da resistência ao rolamento com satisfatória correlação com o comportamento real do pneu.

Quanto ao valor absoluto de resistência ao rolamento, o modelo analítico apresenta limitações por ser um modelo simplificado que não considera todos os componentes que constitui um pneu, tendo ênfase na banda de rodagem (por ser o componente com maior contribuição no valor total de

resistência ao rolamento). Por este motivo os valores encontrados pelo modelo analítico são menores aos obtidos com o modelo numérico.

Os modelos numéricos podem fornecer valores de resultados mais detalhados e estimar o desempenho do produto com maior correlação com o resultado experimental, porém exigem maior tempo de preparação, análise e maior custo matemático, pois são modelos de alta complexidade que precisam de dados mais completos do projeto de pneu.

Apesar da resistência ao rolamento ser um fenômeno complexo de ser modelado analiticamente, novos modelos analíticos vêm sendo propostos ao longo dos anos e com melhor qualidade em seus resultados. Sendo assim, podem ser considerados como uma boa ferramenta de análise comportamental em várias condições de contorno, durante o desenvolvimento do projeto de um pneu, além de proporcionarem resultados rápidos e de baixo custo.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros é sugerido continuar os estudos para complementar o modelo analítico proposto modelando outras partes do pneu que não foram consideradas nesse estudo, como por exemplo, a lateral do pneu e o talão.

Também podem ser estudados os efeitos dinâmicos do pneu, ou seja, quando em manobras de curvas, frenagem e aceleração, para inclui-los no cálculo e complementar a análise da resistência ao rolamento de um pneu qualquer.

E pode-se ser estudado os efeitos vibracionais na resistência ao rolamento do pneu, quando em dinâmica.

Referências

BRADLEY, C. R., & DELAVAL, A. (January-March de 2013). On-Road Fuel Consumption Testing to Determine the Sensitivity Coefficient Relating Changes in Fuel Consumption to Changes in Tire Rolling Resistance. *Tire Science and Technology, TSTCA*, pp. 2-20.

CHO, J. R., LEE, H. W., JEONG, W. B., JEONG, K. M., & KIM, K. W. (14 de September de 2013). Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire. *International Journal of Solids and Structures*, pp. 86-96.

COSTA, A. L., CALHABEU, A. M., LUZZETTI, E. G., MARI, L. A., TAKIMOTO, M. M., & GALI, M. G. (2009). Truck tires: Fuel savings vs. safety. *9º COLLOQUIUM INTERNACIONAL SAE BRASIL DE FREIOS*. Gramado.

GALI, M. R., OZELO, R. R., COSTA, A. L., & CAMPOS, J. M. (2014). Rolling Resistance: Technological Advances and the Current Outlook for Commercial Vehicles. *8º COLLOQUIUM INTERNACIONAL SAE BRASIL DE SUSPENSÕES E IMPLEMENTOS RODOVIÁRIO*. Caxias do Sul.

GILLESPIE, T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

HALL, D. E., & MORELAND, J. C. (January de 2001). Fundamentals of Rolling Resistance. *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 74, pp. 525-539.

HUBLAU, V., & BARILLIER, A. (April - June de 2008). The Equations of the Rolling Resistance of a Tire Rolling on a Drum. *Tire Science and Technology, TSTCA*, pp. 146-155.

LACLAIR, T. J. (2006). Rolling Resistance. Em J. D. A. N. Gent, *The Pneumatic Tire* (pp. 475-532). National Highway Traffic Safety Administration.

LAMBILLOTTE, B. D. (15 de Fevereiro de 2011). TIRE TECHNOLOGY EXPO 2011. *The California Energy Commission's Fuel Efficient Tire Program*.

LINDEMUTH, B. E. (2006). An Overview of Tire Technology. Em A. N. Gent, & J. D. Walter, *The Pneumatic Tire* (pp. 1-27). National Highway Traffic Safety Administration.

RHYNE, T. B., & CRON, S. M. (October-December de 2012). A Study on Minimum Rolling Resistance. *Tire Science and Technology*, pp. 220-233.

SCHURING, D. J. (4 de November de 1974). Power Requirements of Tires and Fuel Economy. *Tire Science and Technology, TSTCA*, pp. 261-285.

SCHURING, D. J. (July-September de 1994). Effect of Tire Rolling Loss on Vehicle Fuel Consumption. *Tire Science and Technology, TSTCA*, pp. 148-161.

TOMAZINI, R. B. (2012). **Caracterização do Comportamento Viscoelástico de Materiais Elastoméricos**. *Trabalho de Graduação*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

YIP, C. F., & VERNART, S. E. (19 de January de 1971). An elastic analysis of the deformation of rough spheres, rough cylinders and rough annuli in contact. Fonte: IOP Science.