



VINÍCIUS RAMOS ISRAEL SANTOS

**QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NO COMPORTAMENTO
VEICULAR DA INTERAÇÃO PNEU/PISTA: ABORDAGEM POR
METAMODELOS**

LAVRAS - MG

2021

VINÍCIUS RAMOS ISRAEL SANTOS

**QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NO COMPORTAMENTO VEICULAR DA
INTERAÇÃO PNEU/PISTA: ABORDAGEM POR METAMODELOS**

Monografia apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Francisco Scinocca
Orientador

LAVRAS - MG

2021

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Santos, Vinícius Ramos Israel.

QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NO
COMPORTAMENTO VEICULAR DA INTERAÇÃO
PNEU/PISTA: ABORDAGEM POR METAMODELOS /

Vinícius Ramos Israel Santos. - 2021.

102 p. : il.

Orientador(a): Prof. Dr. Francisco Scinocca.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2021.
Bibliografia.

1. Resistência ao rolamento. 2. Quantificação de incertezas.
3. Metamodelos. I. Scinocca, Francisco. II. Título.

VINÍCIUS RAMOS ISRAEL SANTOS

**QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NO COMPORTAMENTO VEICULAR DA
INTERAÇÃO PNEU/PISTA: ABORDAGEM POR METAMODELOS**

Monografia apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

APROVADO em 17 de Novembro de 2021

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos UFLA

Prof. Dr. Francisco Scinocca UFLA

Prof. Dr. Wander Gustavo Rocha Vieira UFLA

Prof. Dr. Francisco Scinocca

Orientador

LAVRAS - MG

2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus e Nossa Senhora Aparecida pelo dom da vida, por estarem sempre me abençoando e me guiando para o caminho correto, proporcionando que eu pudesse realizar o meu sonho de criança.

Aos meus pais, Dálnor e Gislene, por todo apoio, conselhos e carinho, nunca medindo esforços para me proporcionar as melhores condições de estudo e de vida. Obrigado por todas as orações e confiança que me passaram ao longo de todo esse tempo de estudos, sendo essenciais para o meu crescimento como pessoa e profissional. Essa conquista é de vocês também, que sempre estiveram ao meu lado para a realização dos meus sonhos, sendo fundamentais para essa importante conquista da minha vida.

Aos meus avós maternos, José e Estelina, e avós paternos (*in memoriam*), Avenor e Dailva, por todo o carinho e amor que sempre tiveram comigo em todos meus anos de vida, por todas as orações e conselhos para que eu pudesse seguir o melhor caminho e me cuidar. Vocês foram fundamentais para essa grande conquista.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica da UFLA, em especial ao meu orientador Francisco Scinocca, o qual sempre se colocou à disposição, independentemente do horário, para sanar minhas dúvidas, tornando-se um grande amigo. Agradeço pela paciência e o comprometimento que sempre teve comigo, deixando a rotina de estudos mais interessante e leve, sendo peça importante desta grande conquista da minha vida.

Aos professores da banca de TCC, Fábio Lúcio Santos e Wander Gustavo Rocha Vieira, pelas correções e conselhos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional e pessoal ao longo do curso.

Aos meus amigos de UFLA, em especial Antônio Carlos Lima Neto, Felipe Dantas Ferreira, João Pedro Barbosa da Silva, Luís Gustavo Nunes de Almeida e Peterson de Souza Alvarenga por todos os momentos de descontração, companheirismo e estudos ao longo desses anos de graduação, compartilhando conhecimentos e experiências que me fizeram crescer como pessoa e profissional.

Às pessoas com quem convivi ao longo desses anos de curso que me incentivaram na minha formação acadêmica.

RESUMO

A indústria automotiva, nos últimos anos, vem desenvolvendo pesquisas aplicadas para satisfazer aos anseios de consumidores cada vez mais exigentes, tanto em eficiência energética, quanto conforto e segurança veicular. Particularmente, os pneus automotivos desempenham uma importante área de interesse de pesquisa, para garantir a boa dirigibilidade, conforto e segurança do veículo. Na transmissão de esforços, aderência e baixa resistência ao rolamento, a fim de diminuir o consumo de combustível, os pneus têm um papel crucial para o desempenho do veículo. Assim sendo, um alto nível de confiabilidade é exigido desse componente responsáveis pela interface do solo com o veículo. No entanto, para garantir tal nível de confiabilidade na operação veicular, as incertezas inerentes dos pneus, assim como demais fatores sujeitos a variabilidade devem ser levados em consideração no projeto veicular. O presente trabalho estuda o efeito da variabilidade de fatores como temperatura ambiente, inflação no pneu, condições de solo, carga no veículo e velocidade na análise da dinâmica veicular. Modelos probabilísticos foram desenvolvidos para a análise espectral da *performance* veicular, utilizando dados experimentais encontrados na literatura. Uma abordagem por metamodelos foi utilizada, para a criação dos modelos matemáticos do comportamento veicular. Posteriormente, o Método de Monte Carlo foi incorporado aos metamodelos da dinâmica veicular para analisar o efeito da variabilidade dos parâmetros sujeitos a incertezas. Finalmente, com a presente pesquisa foi possível verificar a influência da resistência ao rolamento dos pneus automotivos na *performance* veicular, afetando o comportamento do automóvel, de modo particular, em questões relacionadas a forças de tração, centrípeta e lateral, obtendo uma variabilidade acerca do desempenho veicular nos cenários de dinâmica longitudinal e lateral.

Palavras-Chave: Resistência ao rolamento; Quantificação de incertezas; Metamodelos.

ABSTRACT

The automotive industry, in recent years, has been developing applied research to satisfy the desires of increasingly demanding consumers, both in energy efficiency, as well as vehicle comfort and safety. In particular, automotive tires play an important area of research interest, to ensure good vehicle handling, comfort and safety. In the transmission of efforts, grip and low rolling resistance, in order to reduce fuel consumption, tires play a crucial role in the vehicle's performance. Therefore, a high level of reliability is required of this component responsible for the interface between the ground and the vehicle. However, to ensure such a level of reliability in vehicle operation, the inherent uncertainties of tires, as well as other factors subject to variability must be taken into account in the vehicle design. The present work studies the effect of the variability of factors such as ambient temperature, tire inflation, soil conditions, vehicle load and speed in the analysis of vehicle dynamics. Probabilistic models were developed for the spectral analysis of vehicle performance, using experimental data found in the literature. A metamodel approach was used to create mathematical models of vehicular behavior. Subsequently, the Monte Carlo Method was incorporated into the vehicle dynamics metamodels to analyze the effect of the variability of parameters subject to uncertainties. Finally, with this research it was possible to verify the influence of rolling resistance of automotive tires on vehicle performance, affecting the behavior of the car, in particular, in issues related to traction forces, centripetal and lateral, obtaining a variability regarding performance vehicle in the longitudinal and lateral dynamics scenarios.

Key words: Rolling resistance; Uncertainties quantification; Metamodels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes do Pneu Automotivo	19
Figura 2: Histerese na Curva Tensão-Deformação.....	21
Figura 3: Influência da Temperatura do Ar na Resistência ao Rolamento do Pneu T1077 em Diferentes Pavimentos.....	24
Figura 4: Valores de Inclinação da Regressão Linear para Pneus Aplicados nas Réplicas de Superfícies	24
Figura 5: Influência da Temperatura no Coeficiente de Resistência ao Rolamento: a) Temperatura do Ar; b) Temperatura da Estrada; c) Temperatura do Pneu	25
Figura 6: Processo de Aquecimento do Pneu T1083 na Réplica do Pavimento ISOr20.....	26
Figura 7: Processo de Aquecimento do Pneu T1063 no Pavimento SMA8.....	27
Figura 8: Relação entre Velocidade e Coeficiente de Resistência ao Rolamento	29
Figura 9: Efeito da Área de Contato na Resistência ao Rolamento em Três Níveis de Pressão de Inflação	31
Figura 10: Influência da Carga no Coeficiente de Resistência ao Rolamento	32
Figura 11: Influência da Pressão de Inflação para Diferentes Pneus	33
Figura 12: Influência da Combinação Carga / Pressão de Inflação em Testes de Laboratório e Estrada	34
Figura 13: Representação dos Eixos Coordenados do Veículo.....	36
Figura 14: Região de Contato Pneu/Solo em Condições de Frenagem.....	38
Figura 15: Relação entre Velocidade em Diferentes Superfícies e Coeficiente de Atrito de Deslizamento	39
Figura 16: Relação entre Coeficiente de Atrito e Deslizamento em Diferentes Condições de Superfícies de Pistas	40
Figura 17: Variação dos Coeficientes de Atrito em Relação à Carga no Pneu	42
Figura 18: Algoritmo de Quantificação de Incertezas de um Sistema	46
Figura 19: Método de Monte Carlo	47
Figura 20: Fluxograma do Desenvolvimento do Projeto.....	51
Figura 21: Metamodelo Linear da Influência da Pressão de Inflação na Resistência ao Rolamento.....	59
Figura 22: Metamodelo Linear da Influência da Carga Vertical na Resistência ao Rolamento: a) Solo DAC16r20; b) Solo ISOr20; c) Solo PERSr17	62

Figura 23: Metamodelo Não Linear da Influência da Velocidade na Força de Resistência ao Rolamento.....	64
Figura 24: Histogramas da Variabilidade dos Parâmetros: a) Temperatura Ambiente; b) Pressão de Inflação; c) Peso do Veículo; d) Carga Aplicada no Pneu; e) Velocidade do Veículo; f) Deslizamento Longitudinal.....	66
Figura 25: Histogramas dos Coeficientes de Atrito de Aderência: a) Asfalto Seco; b) Asfalto Molhado; c) Asfalto Geral.....	67
Figura 26: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Temperatura: a) Força; b) Coeficiente.....	68
Figura 27: Influência da Variabilidade da Temperatura Ambiente na Força de Resistência ao Rolamento do Pneu.....	69
Figura 28: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Pressão: a) Força; b) Coeficiente.....	70
Figura 29: Influência da Variabilidade da Pressão de Inflação na Força de Resistência ao Rolamento do Pneu.....	71
Figura 30: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Carga na Superfície DAC16r20: a) Força; b) Coeficiente	72
Figura 31: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Carga na Superfície ISOr20: a) Força; b) Coeficiente	72
Figura 32: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Carga na Superfície PERSr17: a) Força; b) Coeficiente	73
Figura 33: Influência da Variabilidade da Carga na Relação Força de Resistência ao Rolamento por Temperatura Ambiente.....	74
Figura 34: Influência da Variabilidade da Carga na Relação Força de Resistência ao Rolamento por Pressão de Inflação.....	74
Figura 35: Influência da Variabilidade da Carga na Relação Coeficiente de Resistência ao Rolamento por Velocidade do Veículo	75
Figura 36: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Velocidade do Automóvel: a) Força; b) Coeficiente.....	76
Figura 37: Influência da Variabilidade da Velocidade no Coeficiente de Resistência ao Rolamento.....	77
Figura 38: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Sobreposição de Efeitos dos Parâmetros.....	78
Figura 39: Histograma da Variabilidade da Força de Tração Máxima	79

Figura 40: Influência da Variabilidade do Peso do Veículo e do Coeficiente de Resistência ao Rolamento Total na Relação Força de Tração Máxima e Coeficiente de Atrito.....	80
Figura 41: Histograma da Variabilidade da Força de Tração Máxima em Veículos com Tração Dianteira	81
Figura 42: Influência da Variabilidade do Peso do Veículo e do Coeficiente de Resistência ao Rolamento Total na Relação Força de Tração Máxima em Automóveis com Tração Dianteira e Coeficiente de Atrito de Aderência	82
Figura 43: Histograma da Variabilidade da Força Centrípeta Devido às Influências da Massa e da Velocidade do Veículo.....	83
Figura 44: Influência da Variabilidade da Massa do Veículo na Relação da Força Centrípeta e Velocidade do Veículo	84
Figura 45: Influência da Variabilidade da Velocidade do Veículo na Relação da Força Centrípeta e Massa do Veículo.....	84
Figura 46: Histograma da Variabilidade da Força Lateral do Veículo.....	85
Figura 47: Influência da Variabilidade do Peso do Veículo e da Pressão de Inflação do Pneu na Relação Força Lateral e Coeficiente de Atrito de Aderência	86
Figura 48: Influência da Variabilidade do Coeficiente de Atrito de Aderência e da Pressão de Inflação do Pneu na Relação Força Lateral e Peso do Veículo.....	87
Figura 49: Influência da Variabilidade do Coeficiente de Atrito de Aderência e do Peso do Veículo na Relação Força Lateral e Pressão de Inflação do Pneu.....	88
Figura 50: Histograma da Variabilidade do Ângulo de Deriva Devido à Influência dos Parâmetros Constituintes: a) Pressão de Inflação; b) Peso do Veículo; c) Coeficiente de Atrito; d) Sobreposição de Efeitos dos Parâmetros.....	89
Figura 51: Influência da Variabilidade dos Parâmetros na Relação Força Lateral e Ângulo de Deriva: a) Pressão de Inflação; b) Peso do Veículo; c) Coeficiente de Atrito; d) Geral	90
Figura 52: Sensibilidade dos Parâmetros Constitutivos da Força de Tração Máxima	91
Figura 53: Sensibilidade dos Parâmetros Constitutivos da Força de Tração Máxima em Veículos com Tração Dianteira	92
Figura 54: Sensibilidade dos Parâmetros Constitutivos da Força Centrípeta.....	93
Figura 55: Sensibilidade dos Parâmetros Constitutivos da Força Lateral	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação da Velocidade com Resistência ao Rolamento	30
Tabela 2: Influência do Tipo de Pista com Coeficiente de Atrito de Aderência	41
Tabela 3: Distribuição Probabilística dos Parâmetros de Entrada do Sistema	56
Tabela 4: Metamodelo Linear da Influência da Temperatura no Pneu Dianteiro	57
Tabela 5: Metamodelo Linear Relacionando a Influência da Pressão de Inflação na Resistência ao Rolamento.....	58
Tabela 6: Metamodelo Linear da Influência da Carga Vertical no Pneu T1077/Pavimento DAC16r20	60
Tabela 7: Metamodelo Linear da Influência da Carga Vertical no Pneu T1077/ Pavimento ISOr20	60
Tabela 8: Metamodelo Linear da Influência da Carga Vertical no Pneu T1077/ Pavimento PERSr17	61
Tabela 9: Metamodelo da Influência da Velocidade na Resistência ao Rolamento.....	63
Tabela 10: Valores dos Coeficientes dos Metamodelos	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. JUSTIFICATIVA	16
3. OBJETIVOS	17
3.1. Objetivo Geral.....	17
3.2. Objetivos Específicos	17
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1. Influência da Temperatura na Resistência ao Rolamento do Pneu	22
4.2. Influência da Velocidade, Carga Vertical e Pressão de Inflação na Resistência ao Rolamento.....	28
4.3. Dinâmica Veicular	35
4.3.1. Dinâmica Longitudinal	36
4.3.2. Dinâmica Vertical e Lateral	36
4.4. Propriedades Trativas	37
4.5. Influência da Velocidade na Dinâmica Longitudinal	39
4.6. Influência das Condições de Superfície de Estrada na Dinâmica Longitudinal	40
4.7. Influência da Carga Vertical na Dinâmica Longitudinal.....	41
4.8. Técnicas de Metamodelagem	42
4.9. Método de Monte Carlo.....	46
4.10. Análise de Sensibilidade	48
4.11. Fontes de Incertezas e Variabilidades.....	49
5. MATERIAIS E MÉTODOS	51
5.1. Metodologia Aplicada	51
5.2. Criação dos Metamodelos	52
5.3. Análise de Aderência dos Metamodelos.....	53
5.4. Simulação de Monte Carlo.....	54
5.5. Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Entrada do Sistema.....	55

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
6.1. Metamodelos na Dinâmica Veicular	56
6.1.1. Metamodelo da Temperatura Aplicado à Resistência ao Rolamento	56
6.1.2. Metamodelo da Pressão de Inflação Aplicado à Resistência ao Rolamento	58
6.1.3. Metamodelo da Carga Vertical Aplicado à Resistência ao Rolamento	59
6.1.4. Metamodelo da Velocidade Aplicado à Resistência ao Rolamento	62
6.2. Análise da Quantificação de Incertezas dos Parâmetros de Entrada	65
6.3. Efeitos da Temperatura Ambiente na Resistência ao Rolamento	68
6.4. Efeitos da Pressão de Inflação na Resistência ao Rolamento	70
6.5. Efeitos da Carga Vertical na Resistência ao Rolamento	71
6.6. Efeitos da Velocidade na Resistência ao Rolamento.....	76
6.7. Efeitos Gerais dos Parâmetros na Resistência ao Rolamento.....	77
6.8. Análise da Quantificação de Incertezas na Dinâmica Veicular	78
6.8.1. Análise da Quantificação de Incertezas na Força Máxima de Tração.....	79
6.8.2. Análise da Quantificação de Incertezas na Força Tração em Veículos de Tração Dianteira.....	81
6.8.3. Análise da Quantificação de Incertezas na Força Centrípeta.....	83
6.8.4. Análise da Quantificação de Incertezas na Força Lateral.....	85
6.8.5. Análise da Quantificação de Incertezas no Ângulo de Deriva	89
6.9. Análise de Sensibilidade	91
6.9.1. Análise de Sensibilidade da Força de Tração Máxima	91
6.9.2. Análise de Sensibilidade da Força de Tração Máxima em Veículos de Tração Dianteira.....	92
6.9.3. Análise de Sensibilidade da Força Centrípeta	93
6.9.4. Análise de Sensibilidade da Força Lateral.....	94
7. CONCLUSÃO.....	95
7.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a indústria automotiva passou a ter uma grande preocupação acerca de fatores ligados ao consumo de combustível, conforto e segurança veicular. Desse modo, pesquisas relacionadas envolvendo os pneus automotivos aumentaram, uma vez que maiores potências e velocidades eram atingidas pelos veículos, assim como a exigência de uma maior eficiência energética.

O presente projeto tem por finalidade investigar o efeito da inerente variabilidade dos parâmetros de entrada da análise veicular, tais como temperatura ambiente, pressão de inflação, carga, velocidade do veículo, rugosidade de solos na *performance* de pneus automotivos. As incertezas, são advindas tanto da inerente variabilidade do processo de fabricação do pneu, quanto em sua utilização nos mais diversos tipos de aplicação. Sabe-se da literatura, que as propriedades dos pneus estão intimamente ligadas a dinâmica veicular, podendo sua variabilidade afetar profundamente a *performance* do veículo nas mais diversas questões como consumo de combustível, dirigibilidade, segurança, conforto, frenagem e força trativa.

Os pneus são considerados elementos funcionais cruciais para a transmissão de forças longitudinal, lateral e vertical entre o veículo e o solo, sendo que as propriedades do pneu devem ser o mais constante possível e, portanto, previsível pelo motorista. Assim como suas propriedades de transmissão de força estática e dinâmica, o modo de utilização pretendido do veículo também deve ser contemplado (REIMPELL, STOLL, BETZLER, 2001; GILLESPIE, 1992).

É de extrema importância ressaltar que o pneu é um componente de segurança do veículo e possui grande impacto no cenário da dinâmica veicular, desse modo, a busca do equilíbrio entre economia de combustível, aderência e confiabilidade durante um desenvolvimento do pneu é de crucial importância, pois qualquer alteração de algum item de desempenho do produto, pode afetar diretamente a *performance* de outro (GALI, 2015).

Desse modo, o pneu sendo um componente constituído, predominantemente, por elastômero com cintas estabilizadoras é responsável por realizar a interação entre veículo e pista, sendo essa, sua principal função e fator primordial para controlar a dirigibilidade veicular, garantindo segurança e conforto tanto para o motorista quanto aos passageiros, absorvendo os impactos e vibrações gerados pelas irregularidades nas superfícies de ruas e rodovias por meio

das suas propriedades mecânicas de rigidez e amortecimento (GALI, 2015; GILLESPIE, 1992; REIMPELL, STOLL, BETZLER, 2001).

Os compostos de borracha, isto é elastoméricos, de pneus automotivos possuem natureza viscoelástica, característica que ocasiona uma defasagem entre o esforço e a deformação do material, gerando assim uma defasagem na resposta do material a uma excitação externa e, conseqüentemente a existência de uma histerese na curva tensão-deformação, a qual consiste em uma dissipação de energia, que geralmente ocorre na forma de calor e acumulativa se a excitação for de natureza cíclica (GALI, 2015; RAO, KUMAR, BOHARA, 2006; WONG, 2001; GILLESPIE, 1992; YOKOTA, HIGUCHI, KITAGAWA, 2012).

Em termos gerais, a resistência ao rolamento consiste na 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 solo, contribuindo para a redução do consumo de combustível (GALI, 2015; CHO et al., 2013; EJSMONT et al., 2018; EJSMONT et al., 2016; TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013; d'AMBROSIO, VITOLO, 2018; SINA, YAZDI, ESFAHANIAN, 2019).

É interessante compreender a necessidade de realizar uma análise eficaz e satisfatória de pneus automotivos, visto que esses estão diretamente ligados à *performance* veicular, principalmente relacionados às questões de conforto, dirigibilidade, segurança, forças e consumo de combustível do veículo.

2. JUSTIFICATIVA

A escolha deste tema em questão para a realização do Trabalho de Conclusão de Curso deve-se a inexistência de literatura com esse tipo de análise de variabilidade. Dessa forma, o presente trabalho busca realizar uma abordagem integrada e multidisciplinar, analisando as várias frentes da interação de vários parâmetros tanto para questões relacionadas à dinâmica veicular, quanto em materiais viscoelásticos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Analisar e investigar o efeito da variabilidade e incertezas associadas em pneus automotivos, bem como tais fatores afetam o comportamento dinâmico do veículo.

3.2. Objetivos Específicos

Analisar os efeitos da variabilidade e incertezas dos parâmetros de entrada da análise, tais como temperatura ambiente, pressão de inflação, carga, que está intimamente associada ao número de passageiros presentes no veículo e o próprio peso do automóvel, velocidade e condições de estrada, as quais estão relacionadas ao coeficiente de atrito. Para isso será realizado:

- Pesquisar dados experimentais sobre a influência dos parâmetros que influenciam a resistência ao rolamento e, posteriormente, realizar a criação de metamodelos;
- Analisar a variabilidade desses parâmetros por meio da Simulação de Monte Carlo;
- Analisar o comportamento dinâmico do veículo a partir da variabilidade de seus parâmetros.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As propriedades dos pneus contribuem significativamente para o alcance dos requisitos operacionais do veículo em termos de dinâmica de condução, conforto e eficiência. De modo geral, influenciam no comportamento dinâmico do veículo, sendo que mudanças em suas propriedades acarretam alterações em fatores de segurança, conforto, consumo de combustível, afetando a *performance* automotiva. Portanto, para ser possível alcançar os objetivos desejados de modo eficaz, o desenvolvimento de pneus é feito em estreita cooperação entre o fabricante do veículo e o fabricante do pneu (PACEJKA, 2012; STRIGEL et al., 2019; GILLESPIE, 1992).

O pneu é um componente constituído, predominantemente, por compostos de borracha, sendo o responsável por realizar a interação entre veículo e pista, tendo como sua principal função e fator primordial para controlar a direção do veículo, proporcionando-lhe segurança e conforto ao dirigi-lo. O pneu possui outras funções, tais como: suportar a carga do veículo, na qual a pressão de ar interna e o tipo de construção são importantes fatores; gerar aderência com o solo em que há contato; absorção dos impactos e vibrações gerados pelas irregularidades nos pavimentos de ruas e rodovias (REIMPELL, STOLL, BETZLER, 2001; GALI, 2015; GILLESPIE, 1992).

Os pneus, que utilizam a pressão do ar armazenado no seu interior para suportar carga, apresentam como elementos principais a carcaça, responsável por ser a estrutura suportante do pneu, e a banda de rodagem, a qual é a estrutura responsável por realizar o contato com o solo, transmitindo esforços longitudinais de tração e frenagem, conforme ilustrado pela Figura 1. Além disso, é capaz de absorver esforços transversais ocasionados pela ação do vento ou por forças de inércia em curvas e pistas inclinadas lateralmente (LEAL, ROSA, NICOLAZZI, 2012; JAZAR, 2008).

Figura 1: Componentes do Pneu Automotivo



Fonte: VIAS SEGURAS, 2021

Toda transmissão de forças do pneu para o solo, sejam longitudinais, laterais ou verticais, é realizada pelo atrito existente na zona de contato da banda de rodagem com o solo. Desse modo, procura-se obter o máximo possível de aderência nas mais diversas condições de piso, seja ele de asfalto, concreto, pedra, terra, seco ou molhado. Sendo essa aderência dependente do composto do pneu e do tipo de pavimento de pista (LEAL, ROSA, NICOLAZZI, 2012; REIMPELL, STOLL, BETZLER, 2001; GILLESPIE, 1992; JAZAR, 2008).

O comportamento da banda de rodagem depende do composto da borracha utilizada e do desenho das ranhuras, já que ambos afetam a aderência no piso. Em pista seca, o máximo de aderência é obtido com um pneu totalmente liso, visto que este coloca em contato com o solo o máximo possível de borracha. No entanto, a menor presença de água torna esse tipo de pneu extremamente perigoso, uma vez que o fenômeno de aquaplanagem pode ocorrer, sendo que o nível de atrito é influenciado, afetando a *performance* do veículo como um todo. Entretanto em situações de chuva e piso liso, o desenho da banda de rodagem do pneu é vital, pois somente por meio das suas ranhuras é possível escoar a água existente sobre o piso de forma a permitir o contato pneu/pista (LÖWER et al., 2020; GILLESPIE, 1992; WONG, 2001; LEAL, ROSA, NICOLAZZI, 2012; JAZAR, 2008).

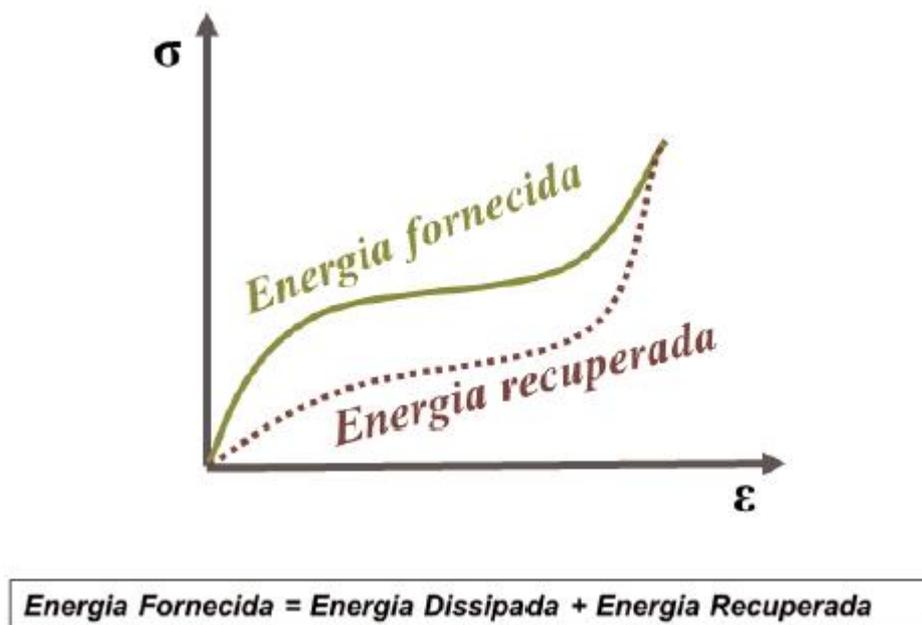
De um modo geral, o desenho da banda de rodagem deve possibilitar duas funções: a primeira é propiciar uma drenagem adequada, e a segunda é possuir uma aderência em relação à superfície da pista, principalmente em superfícies irregulares. Quanto à aderência do pneu, a banda de rodagem deve possuir uma quantidade de arestas razoavelmente bem definidas de

modo a se amoldar nas irregularidades do piso e prover um meio mecânico para transmissão de força, adicionalmente às forças de atrito. Estas bordas devem ser transversais para uma carga de tração e frenagem e longitudinais para curvas. Uma vez que diversas manobras são efetuadas tanto em aceleração como em frenagem em curvas, são adotadas ranhuras diagonais que melhor absorvem os esforços resultantes (LEAL, ROSA, NICOLAZZI 2012; LÖWER et al., 2020; JAZAR, 2008).

Relativamente ao desenho da banda, há uma série de fatores conflitantes para se chegar à melhor configuração, tais como ruído, absorção de cargas de frenagem e aceleração e boa drenagem da água por meio dos sulcos do pneu. A influência da altura de camada de água é pequena quando analisada na faixa de velocidade de 30 km/h. No entanto, em velocidades mais elevadas, a influência da altura de água presente no pavimento aumenta, uma vez que ocorre o preenchimento das ranhuras da banda de rodagem do pneu. Assim, os fabricantes de pneus desenvolveram modelos matemáticos com solução numérica, de forma que, com o auxílio de programas computacionais, conseguem chegar a configuração de desenho que melhor satisfaça estes quesitos conflitantes (LÖWER et al., 2020; LEAL, ROSA, NICOLAZZI, 2012; WONG, 2001).

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 (GALI, 2015). Tal fato, ocasiona 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, conforme representado pela Figura 2. Sendo que o conseqüente aumento da temperatura é capaz de reduzir a resistência à abrasão e a resistência à fadiga em relação à flexão do material do pneu, tornando um fator limitante no desempenho do pneu. A quantidade de energia dissipada, representada pela área englobada pelo laço da histerese, depende das características mecânicas do pneu, sendo que essa perda energética na borracha diminui à medida que a temperatura aumenta (GALI, 2015; GILLESPIE, 1992; JAZAR, 2008; YOKOTA, HIGUCHI, KITAGAWA, 2012; RAO, KUMAR, BOHARA, 2006; WONG, 2001; LEAL, ROSA, NICOLAZZI, 2012).

Figura 2: Histerese na Curva Tensão-Deformação



Fonte: GALI, 2015

Os veículos de passeio possuem pneus com baixa histerese a fim de reduzir a resistência ao rolamento e a baixa temperatura de operação, uma vez que o nível de histerese dos pneus afeta inversamente a distância de parada. Um pneu de alta histerese, por sua vez, desgasta-se mais rapidamente e possui uma vida útil mais curta (JAZAR, 2008; RAO, KUMAR, BOHARA, 2006; EJSMONT et al., 2016).

Visto que o efeito da histerese faz com que a borracha carregada não se recupere totalmente após a remoção da carga, o pneu não sendo perfeitamente elástico, apresenta um amortecimento interno e apenas parte do trabalho é recuperado ao ser descarregado. O atrito interno é provocado pela deformação do pneu na zona de contato, esta deformação faz com que as lonas da carcaça movam entre si e este movimento, embora pequeno, solicita, por cisalhamento, a borracha que separa as lonas consumindo energia. A banda de rodagem também é deformada e, ficando sujeita a solicitações mecânicas, contribuindo com uma parcela do consumo de energia (LEAL, ROSA, NICOLAZZI, 2012; d'AMBROSIO, VITOLO, 2018; JAZAR, 2008; WONG, 2001).

No aspecto geral, resistência ao rolamento é a contribuição, devido ao pneu, para as forças resistentes que se opõem ao movimento do veículo e, em geral, é definida como a dissipação de energia por unidade de distância de um pneu, sendo causada principalmente pela energia necessária para a deformação da roda e do solo. Tal força pode apresentar diferentes

resultados conforme a variação de algumas condições de uso, tais como pressão de inflação, carga aplicada na roda, propriedades do material, temperatura, velocidade do veículo e do tipo de superfície do pavimento. 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 (GALI, 2015; CHO et al., 2013; EJSMONT et al., 2018; EJSMONT et al., 2016; TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013; d'AMBROSIO, VITOLO, 2018; SINA, YAZDI, ESFAHANIAN, 2019; YOKOTA, HIGUCHI, KITAGAWA, 2012; RAO, KUMAR, BOHARA, 2006; WONG, 2001; GILLESPIE, 1992).

O contato pneu-pista e a deformação do pneu são responsáveis pela aderência, relacionada à tração, bem como pela resistência ao rolamento, relacionada à dissipação de energia, ambas correlacionadas à utilização de energia. Em geral, um aumento na propensão de um pneu para dissipar energia é benéfico do ponto de vista da aderência e prejudicial para a resistência ao rolamento, embora os dois fenômenos sejam dissociados, uma vez que estão relacionados a diferentes faixas de frequência de excitação. O papel complexo desempenhado pelo pneu o torna central para a segurança automotiva e a economia de combustível. De posse da geometria, estrutura e composição de um pneu, a tendência de dissipar energia depende de diversos fatores diferentes, tais como temperatura, pressão de inflação, velocidade do veículo, e condições de carga e características da superfície da estrada (d'AMBROSIO, VITOLO, 2018; EJSMONT et al., 2018; TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013).

Segundo d'AMBROSIO, VITOLO (2018), uma variação de 10% na resistência ao rolamento, aumenta o consumo de combustível em cerca de 1% para a condução urbana e aproximadamente 2% para rodovia. A análise de diferentes modelos de veículos e ciclos de condução mostram que a resistência ao rolamento tem um efeito relativo maior em veículos leves.

4.1. Influência da Temperatura na Resistência ao Rolamento do Pneu

A resistência ao rolamento do pneu é uma das mais importantes forças restritivas atuando no movimento de um veículo, sendo influenciada pela construção do pneu, desgaste do pneu, carregamento, pressão de inflação, velocidade, textura e irregularidades presentes na superfície da pista, além de ser influenciada pela temperatura do pneu, temperatura ambiente e

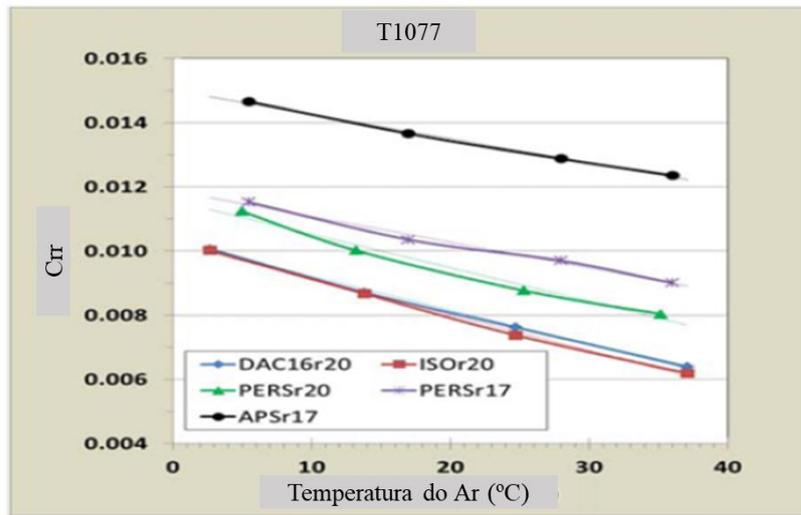
temperatura da pista (EJSMONT et al., 2018; GILLESPIE, 1992; SANDBERG, RAMDEN, GAMBERG, 2004; CHO et al., 2013; EJSMONT et al., 2016; RAO, KUMAR, BOHARA, 2006; WONG, 2001; GILLESPIE, 1992).

O termo temperatura é um fator de controle de grande importância relativo à resistência ao rolamento em pneus veiculares. Existem três tipos de temperatura que devem ser consideradas como fatores importantes no controle térmico do rolamento do pneu, sendo temperatura do ar ambiente, temperatura de pavimento e temperatura do pneu. A temperatura do pneu é dependente de diversos fatores, mais notadamente da perda de energia no pneu, efeito de arrefecimento do ar de certa temperatura e certo fluxo de ar, radiação solar, temperatura da pista e, muitas vezes, o resfriamento por neve ou água presentes no pavimento. A temperatura da pista é controlada pela temperatura do ar, radiação solar, vento e precipitação, além da possibilidade de ser influenciada pelo rolamento dos pneus, sendo que essa temperatura influencia a temperatura do pneu consideravelmente e as características dinâmicas do pavimento, tais como rigidez e histerese, afetando a resistência ao rolamento do pneu (EJSMONT et al., 2018; SANDBERG, RAMDEN, GAMBERG, 2004; YOKOTA, HIGUCHI, KITAGAWA, 2012).

Para aspectos de simplificação é desejável averiguar a média das temperaturas da superfície de certas regiões do pneu, tais como: banda de rodagem, ombro do pneu, paredes laterais, talão do pneu e a temperatura do ar inflado no pneu. O conhecimento da relação entre resistência ao rolamento e temperaturas do ar/pista/pneu é importante para avaliações da *performance* do veículo, especialmente consumo de combustível. A influência da temperatura do ar na resistência ao rolamento dos pneus de automóveis pode ser notada tanto em testes realizados em laboratório quanto em estrada (YOKOTA, HIGUCHI, KITAGAWA, 2012; JAZAR, 2008; EJSMONT, OWCZARZAK, 2019).

Embora a influência da temperatura nos coeficientes de resistência ao rolamento seja, geralmente, semelhante para todos os pneus testados, a magnitude da influência, isto é, inclinação das curvas, pode diferir até 40%. A Figura 3 compara a influência da temperatura para diferentes pavimentos, evidenciando que a diferença de inclinação é claramente visível (EJSMONT et al., 2018).

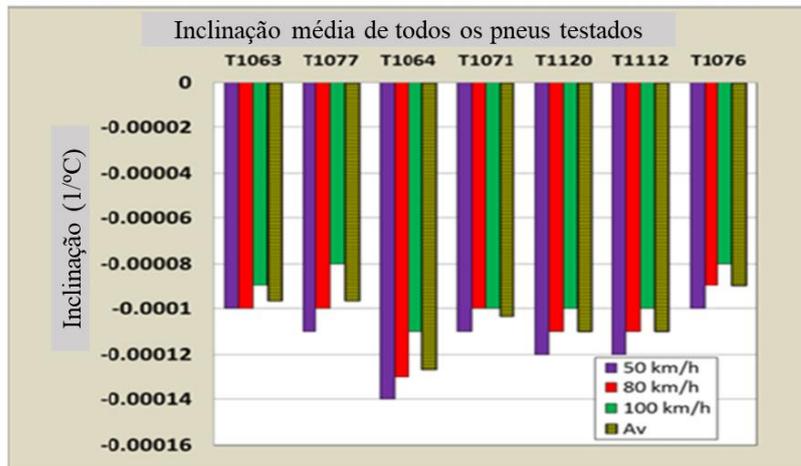
Figura 3: Influência da Temperatura do Ar na Resistência ao Rolamento do Pneu T1077 em Diferentes Pavimentos



Fonte: Adaptado de EJSMONT et al., 2018

De acordo com a Figura 4, é possível notar que em baixas velocidades, a influência da temperatura é geralmente um pouco mais pronunciada do que em altas velocidades, sendo que alguns pneus apresentam uma maior influência da temperatura na resistência ao rolamento quando comparados aos demais testados.

Figura 4: Valores de Inclinação da Regressão Linear para Pneus Aplicados nas Réplicas de Superfícies



Fonte: Adaptado de EJSMONT et al., 2018

O valor da inclinação da linha de regressão fornece uma boa indicação da influência da temperatura para pneus de automóveis testados próximos a temperatura de 25°C, porém de acordo com as normas ISO 28580, a correção de temperatura deve ser baseada na Equação (4.1) (EJSMONT et al., 2018).

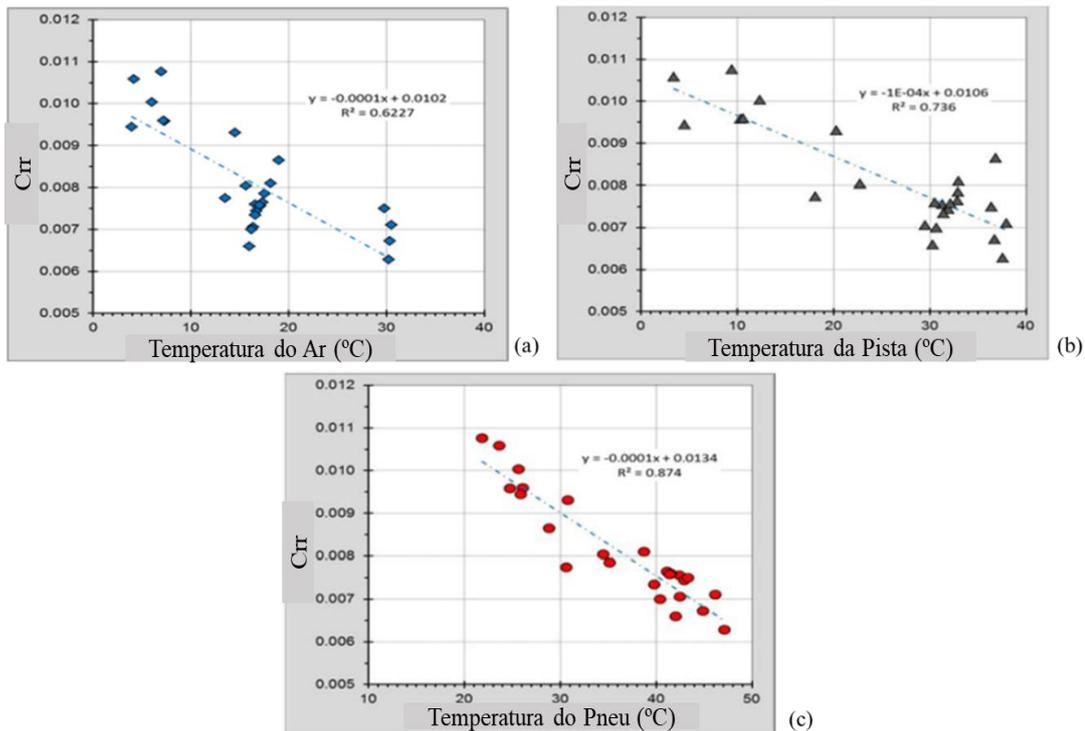
$$F_{r25} = F_r [1 + K_t (t_{amb} - 25)] \quad (4.1)$$

Sendo os termos, F_{r25} : Força de resistência ao rolamento a 25°C; F_r : Força de resistência ao rolamento à temperatura ambiente; K_t : Coeficiente de influência de temperatura baseado na temperatura do ar; t_{amb} : Temperatura ambiente.

O levantamento da Equação (4.1) baseia-se no pressuposto de que a relação entre a resistência ao rolamento e a temperatura é não linear e diminui com o aumento da temperatura.

A temperatura do pneu na estrada é influenciada pela temperatura do pavimento, a qual depende da temperatura do ar, da radiação solar e da precipitação recente. Além disso, devido à maior inércia térmica, a temperatura da estrada pode não alterar tão rapidamente quanto a temperatura do ar. Desse modo, na Figura 5 são apresentados os coeficientes de resistência ao rolamento correlacionando com a temperaturas do ar, da estrada e do pneu, respectivamente.

Figura 5: Influência da Temperatura no Coeficiente de Resistência ao Rolamento: a) Temperatura do Ar; b) Temperatura da Estrada; c) Temperatura do Pneu



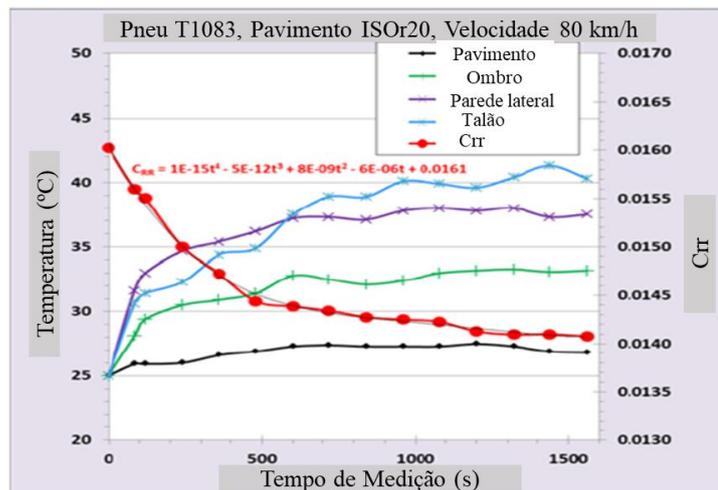
Fonte: Adaptado de EJSMONT et al., 2018

Ao analisar a Figura 5, nota-se que as temperaturas do ar, da estrada e dos pneus influenciam consideravelmente a resistência ao rolamento. Para a temperatura do ar, o coeficiente de determinação é baixo ($R^2 = 0,623$); no caso da temperatura da estrada, o coeficiente é relativamente maior ($R^2 = 0,736$). No entanto, para a temperatura do pneu medida na parede lateral do pneu, esse coeficiente apresenta o maior valor dentre os listados ($R^2 = 0,874$).

A resistência ao rolamento dos pneus está associada a perdas de energia, que ocorrem principalmente na estrutura do pneu e, em menor grau, no asfalto da pista. A maior parte da energia é dissipada como calor, induzindo o aumento da temperatura dos pneus, desde que o efeito de resfriamento não seja igual ao fluxo de energia térmica. Durante o período de aquecimento do pneu em uso normal, um aumento de temperatura leva a um aumento da pressão de inflação, que por sua vez, resulta em uma menor resistência ao rolamento (EJSMONT et al., 2018; EJSMONT, OWCZARZAK, 2019; RAO, KUMAR, BOHARA, 2006; EJSMONT et al., 2016).

A Figura 6 apresenta o processo de aquecimento do pneu T1083 no solo ISOr20, sendo que durante um período cronometrado de medições, o coeficiente de resistência ao rolamento caiu do valor inicial de 0,0160 para o valor estável de 0,0141 ao fim do teste. Ao mesmo tempo, a temperatura do ombro do pneu aumentou para 33,2°C, a temperatura da parede lateral para 37,5°C, o talão do pneu para 40,3°C. Por fim, a temperatura da superfície da réplica aumentou para 26,8°C, isto é, apenas 1,8°C. Sendo o solo ISOr20 considerado uma réplica laminada de poliéster desenvolvida com base na superfície da pista de referência ISO 10844.

Figura 6: Processo de Aquecimento do Pneu T1083 na Réplica do Pavimento ISOr20

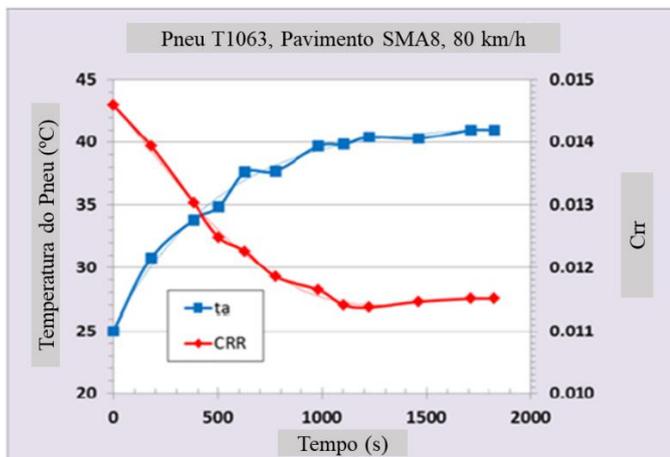


Fonte: Adaptado de EJSMONT et al., 2018

Os dados apresentados na Figura 7 exprimem que a diminuição da resistência ao rolamento é maior do que durante as medições em laboratório. Ao mesmo tempo, a temperatura do pneu, mais especificamente nas paredes laterais, aumenta mais do que durante os testes laboratoriais. Tal fato pode ser explicado pelo efeito de resfriamento que atua no pneu durante os testes de laboratório, uma vez que durante as medições reais, o pneu de teste é filtrado do fluxo de ar pela câmara de proteção, de modo que o efeito de resfriamento seja menor. Sendo

o pneu T1063 destinado para lama e neve que também, tendo sua referência de acordo com a ISO 11819-2. Enquanto o pavimento SMA8 é considerado um solo típico, moderno utilizados em países europeus.

Figura 7: Processo de Aquecimento do Pneu T1063 no Pavimento SMA8



Fonte: Adaptado de EJSMONT et al., 2018

As medições realizadas pela TUG (Universidade Técnica de Gdansk - Polônia) apontam forte influência da temperatura na resistência ao rolamento. Os testes apontam que a temperatura mais importante é a da estrutura do pneu, neste caso representada pela temperatura da parede lateral do pneu, retratando que a temperatura tem uma influência muito importante nas forças de resistência ao rolamento.

Uma vez que as condições de carga dos pneus dianteiro e traseiro são separadas e medidas da fase de aquecimento, o valor de aquecimento dos pneus diferem entre si, consequentemente os coeficientes de resistência ao rolamento dos pneus dianteiro e traseiro diferem, porque os estados de equilíbrio térmico desses pneus são diferentes no momento da medição desse coeficiente. Considerando que existem diferenças nas condições de carga e nos fatores térmicos do ambiente entre os pneus dianteiros e traseiros, e que as temperaturas ambiente e da superfície da estrada podem variar devido ao clima, é provável que, à medida que os fatores ambientais variarem, a temperatura média interna da banda de rodagem sofra uma variação, afetando o coeficiente de resistência ao rolamento do pneu (YOKOTA, HIGUCHI, KITAGAWA, 2012).

Sendo assim, com o aumento da temperatura dos pneus, ocorre uma redução do coeficiente de resistência ao rolamento, uma vez que o pneu estará se aproximando da sua condição ótima de aquecimento, reduzindo os desgastes e melhorando a *performance* veicular (EJSMONT et al., 2018).

4.2. Influência da Velocidade, Carga Vertical e Pressão de Inflação na Resistência ao Rolamento

A resistência ao rolamento dos pneus é um dos parâmetros mais importantes que caracterizam a interação entre os pneus e as superfícies da estrada. Sob certas condições de tráfego, tais como baixa e moderada velocidade constante de direção, a resistência ao rolamento pode ser responsável por 25% a 30% do consumo de energia do veículo, isto é, consumo de combustível. A maior parte da dissipação de energia no pneu em funcionamento é devida às perdas histeréticas, que são dependentes da deflexão do pneu, portanto, da carga e da pressão de inflação (EJSMONT et al., 2016; RAO, KUMAR, BOHARA, 2006; WONG, 2001; GILLESPIE, 1992; SANDBERG, RAMDEN, GAMBERG, 2004).

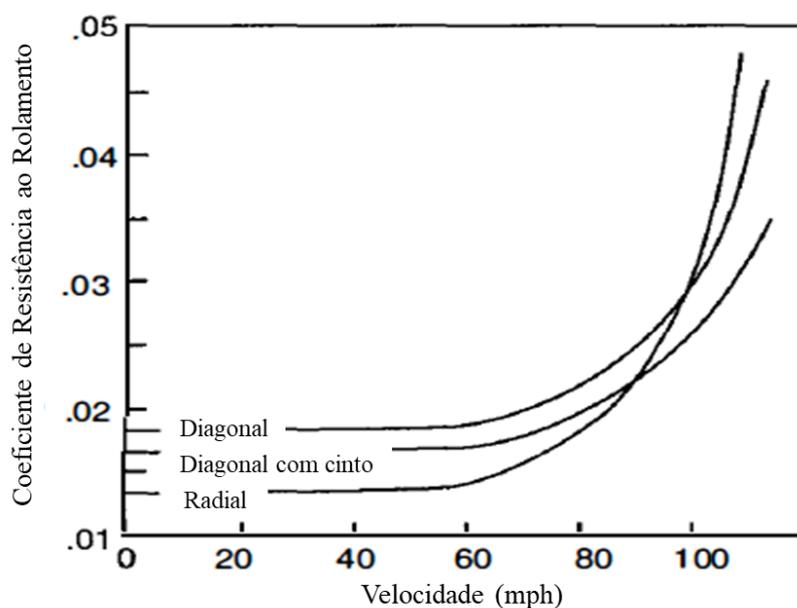
EJSMONT et al. (2016) e EJSMONT, OWCZARZAK (2019) realizaram testes experimentais em laboratório utilizando instalações de rodas com tambores, na qual geralmente os pneus rodam na superfície externa do tambor para obtenção da resistência ao rolamento. Uma limitação significativa para os representativos desses métodos é a possibilidade de ajustar as superfícies de réplicas das estradas em tambores externos, mas essas, na melhor das hipóteses, reproduzem a textura do pavimento da estrada, não sua rigidez e histerese. Enquanto as medições de estradas são muito mais complicadas do que os testes realizados em laboratório, devido a um número crescente de fatores, tal como rugosidade da superfície da pista, que podem causar erros substanciais, geralmente acima dos valores medidos (EJSMONT et al., 2016; YOKOTA, HIGUCHI, KITAGAWA, 2012).

O conhecimento do efeito da velocidade, da pressão de inflação e da carga na resistência ao rolamento do pneu é importante para a otimização da operação do veículo, sendo possível realizar a modelagem da dinâmica do veículo e o desenvolvimento técnico de pneus e pavimentos de estradas, visto que não são variáveis independentes. É retratado que cargas mais altas requerem pressão de inflação mais alta para determinar a interface adequada pneu/superfície da estrada, boa economia de combustível e ótima resistência ao desgaste e danos (EJSMONT et al., 2016; TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013; EJSMONT et al., 2018; d'AMBROSIO, VITOLO, 2018).

O coeficiente de resistência ao rolamento é diretamente proporcional à velocidade devido ao aumento do trabalho de flexão e vibração no corpo do pneu, embora o efeito seja pequeno em velocidades moderadas e baixas, sendo, geralmente, considerado constante para o cálculo. Desse modo, a influência da velocidade se torna mais pronunciada quando a velocidade

é combinada com a menor pressão de inflação. A Figura 8 apresenta uma relação entre a velocidade e o coeficiente de resistência ao rolamento de um pneu radial. O aumento acentuado do coeficiente em altas velocidades é causado por uma onda estacionária de alta energia desenvolvida na carcaça do pneu logo atrás da área de contato do pneu, sendo que se persistir por períodos moderados, poderá resultar em uma falha catastrófica. Diante disso, a formação de uma onda estacionária é um dos principais efeitos que limitam a velocidade nominal de um pneu. Os pneus modernos classificados para alta velocidade normalmente incluem estabilizadores na área dos ombros para controlar o desenvolvimento de ondas estacionárias (GILLESPIE, 1992; EJSMONT et al., 2018; EJSMONT et al., 2016; TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013).

Figura 8: Relação entre Velocidade e Coeficiente de Resistência ao Rolamento



Fonte: Adaptado de GILLESPIE, 1992

De posse dos dados adquiridos, observa-se que o coeficiente de resistência ao rolamento é aproximadamente constante dentro da faixa de velocidade de 0 a 70 mph, que seria equivalente a 112,7 km/h, não alterando significativamente esse coeficiente. Embora o efeito de variabilidade da resistência ao rolamento seja pequeno em velocidades moderadas e baixas, a influência da velocidade se torna mais pronunciada quando a mesma é combinada com uma menor pressão de inflação. Além disso, pode-se inferir que, para pressão constante de inflação, o aumento da resistência ao rolamento sob cargas verticais mais altas indica aumento da área de contato entre pneu e solo (GILLESPIE, 1992; TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013; EJSMONT et al., 2018; EJSMONT et al., 2016).

No entanto, segundo CHO et al. (2013), o aumento da velocidade provoca uma redução na resistência ao rolamento do pneu automotivo, uma vez que diminuem as perdas histeréticas totais, aumentam as taxas de geração de calor, devido ao aumento da temperatura máxima do pneu. Dessa forma, o pneu em altas velocidades garante uma melhor *performance* veicular, com menor consumo de combustível e menor desgaste de borracha, uma vez que seu coeficiente de resistência ao rolamento será menor. Essa relação entre velocidade e resistência ao rolamento pode ser observada por meio da Tabela 1.

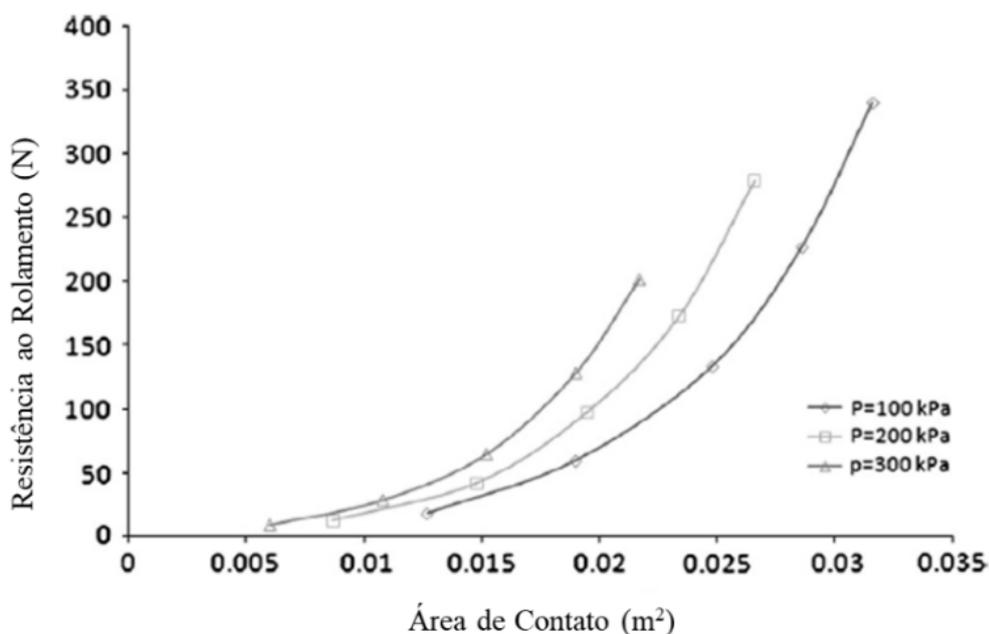
Tabela 1: Relação da Velocidade com Resistência ao Rolamento

Itens	Velocidade [km/h]					
	40	60	80	100	120	140
Perda Histerética Total [J]	78,78	78,09	77,41	76,89	76,42	75,96
Taxa de Geração de Calor [W]	468,59	696,70	920,92	1143,36	1363,61	1581,34
Resistência ao Rolamento [N]	42,15	41,78	41,42	41,14	40,89	40,64
Pico de Temperatura Máxima [°C]	58,83	65,62	72,66	79,06	85,05	90,89

Fonte: O autor (Adaptado de CHO et al., 2013)

A resistência ao rolamento em função da área de contato foi investigada por TAGHAVIFAR, MARDANI (2013), uma vez que a área de contato do pneu é um importante parâmetro para discutir a resistência ao rolamento com a velocidade, sendo que os resultados significaram aumento da resistência ao rolamento devido ao aumento da área de contato, conforme representado na Figura 9. A cada uma das três pressões de inflação, o aumento da carga vertical causava aumento da área de contato. Dessa maneira, o aumento da carga vertical com valor constante da pressão de inflação resulta no aumento da deflexão e deformação do pneu, o que, por sua vez, fornece aumento da resistência ao rolamento do pneu. Sendo que alterações no tamanho do pneu, na carga aplicada na roda ou na pressão de inflação do pneu têm um efeito direto na área de contato do pneu e, portanto, também no comportamento dinâmico do pneu (STRIGEL et al., 2019; GILLESPIE, 1992).

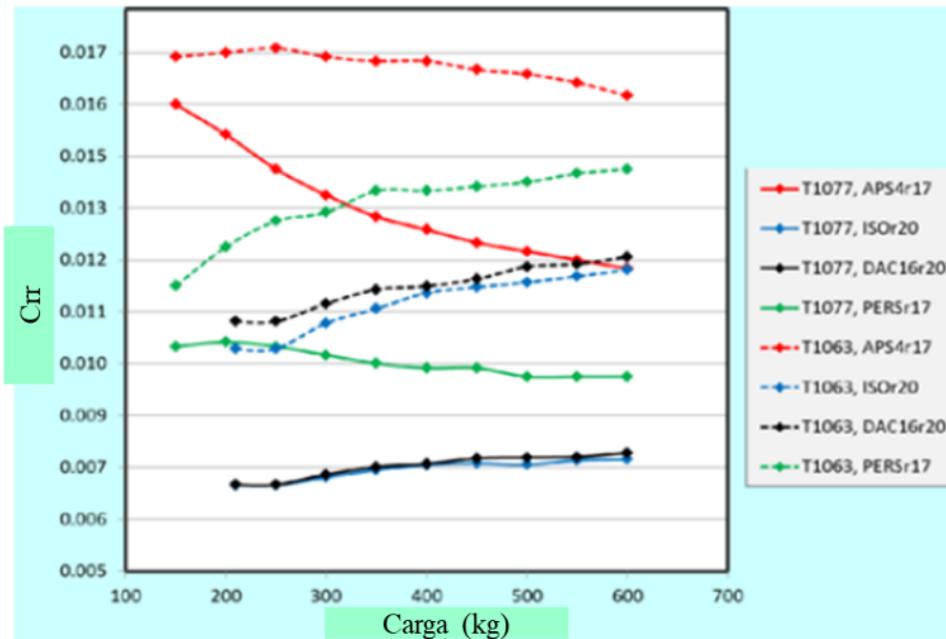
Figura 9: Efeito da Área de Contato na Resistência ao Rolamento em Três Níveis de Pressão de Inflação



Fonte: Adaptado de TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013

A carga normal aplicada na roda foi investigada como um parâmetro eficaz para avaliar seu impacto no valor da resistência ao rolamento. As relações entre a carga do pneu e os coeficientes de resistência ao rolamento de dois pneus e quatro superfícies de réplica são apresentadas conforme a Figura 10. Como o coeficiente de resistência ao rolamento (C_{RR}) é a razão entre a força de resistência ao rolamento (F_{RR}) e a carga do pneu (F_L), é interessante investigar como os valores de C_{RR} variam com as mudanças de carga para pressão de inflação constante. No caso do pneu T1077, os coeficientes de resistência ao rolamento são bastante independentes da carga para os pavimentos ISOr20, DAC16r20 e PERSr17, porém diminuem com a carga para uma réplica muito áspera do pavimento da superfície APS4r17. É importante ressaltar que o aumento da resistência ao rolamento a partir do aumento da carga pode ser advindo do aumento da perda de energia, resultando em um maior desgaste do pneu e maior consumo de combustível (RAO, KUMAR, BOHARA, 2006; EJS MONT et al., 2016).

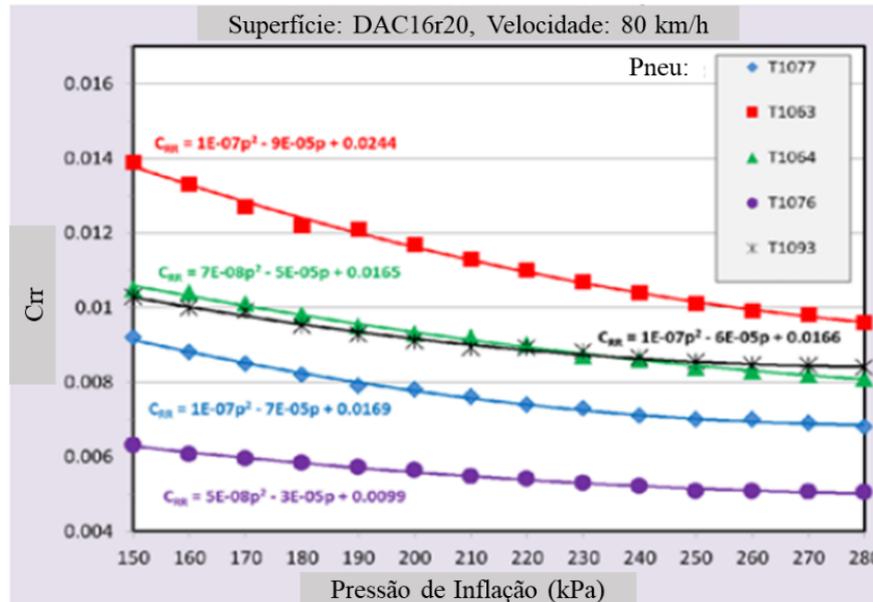
Figura 10: Influência da Carga no Coeficiente de Resistência ao Rolamento



Fonte: Adaptado de EJSMONT et al., 2016

A pressão de inflação do pneu determina a elasticidade do pneu e, em combinação com a carga, determina a deflexão nas paredes laterais e na região de contato, sendo que o efeito geral na resistência ao rolamento também depende da elasticidade do solo (GILLESPIE, 1992). Desse modo, com o objetivo de obter informações sobre o impacto da pressão de inflação na resistência ao rolamento, cinco tipos de pneus foram testados na superfície DAC16r20 a fim de investigar o papel da pressão de inflação na resistência ao rolamento na diversidade de tipos de pneus. A Figura 11 ilustra claramente que há uma tendência de diminuição do coeficiente de resistência ao rolamento com o aumento da pressão de inflação, entretanto a magnitude das mudanças, associada à inclinação, é diferente. É interessante notar que pneus que exibem baixa resistência ao rolamento possuem a inclinação da curva menos acentuada, enquanto pneus com alta resistência ao rolamento, mais alta, sendo mais sensíveis às mudanças da pressão de inflação (EJSMONT et al., 2016; TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013).

Figura 11: Influência da Pressão de Inflação para Diferentes Pneus



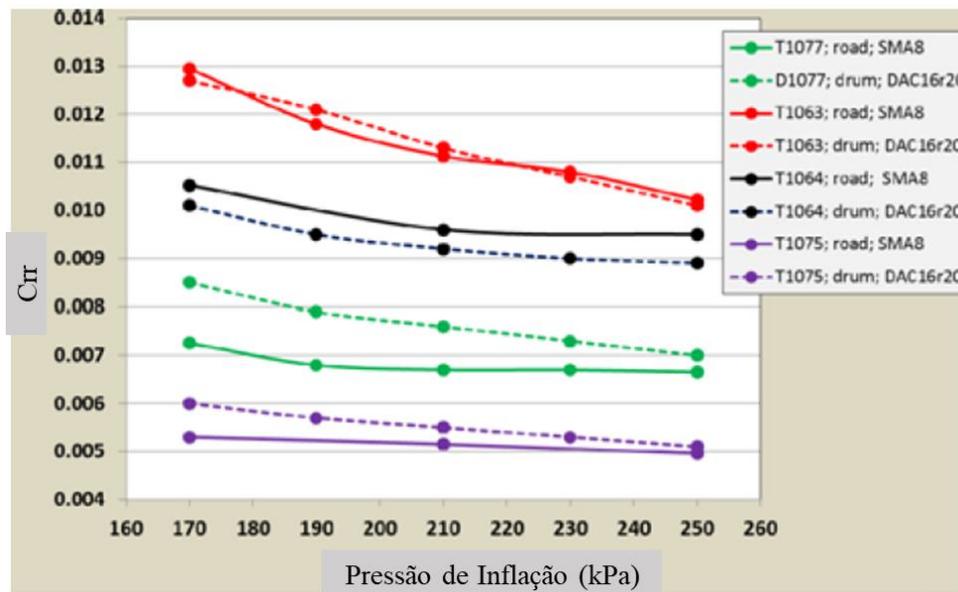
Fonte: Adaptado de EJSMONT et al., 2016

Como a única parte dos veículos em contato com o solo, os pneus são uma das peças automotivas mais importantes a fim de garantir segurança e conforto da direção, sendo que a pressão adequada do ar dentro do pneu permite fornecer as funções de tração, frenagem e direção, entre outras. Portanto, o desempenho da retenção da pressão dos pneus tem uma influência importante na segurança do veículo e no consumo de combustível, podendo mencionar que a principal causa da perda de pressão na inflação dos pneus reside na difusão de gás através da borracha (LIANG et al., 2019; RAO, KUMAR, BOHARA, 2006; REIMPELL, STOLL, BETZLER, 2001; GILLESPIE, 1992; EJSMONT et al., 2016; LÖWER et al., 2020; d'AMBROSIO, VITOLO, 2018).

É possível depreender que, a resistência ao rolamento tende a diminuir à medida em que ocorre um aumento da pressão de inflação, particularmente, quando valores mais altos de cargas verticais forem aplicados à roda. Desse modo, considerando que a redução da resistência ao rolamento é uma função relativamente dependente da carga vertical e da pressão de inflação, a alteração desses fatores é considerada um parâmetro influente sobre a resistência ao rolamento do pneu. Consequentemente, o aumento da pressão de inflação e a diminuição da deformação do pneu resultam na redução da perda de energia (TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013; RAO, KUMAR, BOHARA, 2006; EJSMONT et al., 2016; SINA, YAZDI, ESFAHANIAN, 2019; EJSMONT et al., 2016; LÖWER et al., 2020; CORDOS, TODORUT, BARABÁS, 2017).

Na Figura 12, foram comparados os resultados das medições de estradas e de laboratório. Para ambos os métodos, um aumento na pressão de inflação leva a uma diminuição no coeficiente de resistência ao rolamento (C_{RR}) e a inclinação da sensibilidade depende muito dos valores absolutos desse coeficiente. Os pneus com valores de coeficiente de resistência ao rolamento mais altos são considerados mais sensíveis às mudanças de pressão de inflação do que pneus com baixa resistência ao rolamento, os quais são projetados, especialmente, para veículos elétricos (EJSMONT et al., 2016).

Figura 12: Influência da Combinação Carga / Pressão de Inflação em Testes de Laboratório e Estrada



Fonte: Adaptado de EJSMONT et al., 2016

Desse modo, é possível inferir que o aumento da carga do pneu, para determinado pneu, pavimento e velocidade, leva ao aumento na força de resistência ao rolamento, tendo a pressão de inflação constante. O aumento dessa pressão, em carga constante, é capaz de diminuir o coeficiente de resistência ao rolamento, no entanto a taxa de diminuição (inclinação) é dependente do "nível absoluto" da resistência ao rolamento. Verificou-se também que o padrão de piso é responsável pela maior parte da resistência ao rolamento acima de 40%, confirmando a importância do padrão de piso para o desenvolvimento de pneus econômicos, com baixo consumo de combustível. Além disso, constatou-se que o padrão de banda de rodagem do pneu causa um efeito significativo na resistência ao rolamento (CHO et al., 2013; EJSMONT et al., 2016; TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013; RAO, KUMAR, BOHARA, 2006; CORDOS, TODORUT, BARABÁS, 2017).

Em superfícies macias como areia, altas pressões de inflação resultam em maior trabalho de penetração no solo e, portanto, em coeficientes de resistência ao rolamento maiores. Entretanto, uma pressão de inflação mais baixa, enquanto diminui a penetração no solo, aumenta o trabalho de flexão dos pneus. Assim, a pressão de inflação ideal do pneu depende das características da deformação da superfície. Em geral, o aumento da força de tração alcançado pela redução da pressão dos pneus em uma superfície de areia é realmente alcançado por meio de uma redução na resistência ao rolamento. No entanto, em superfícies pavimentadas, esse coeficiente diminui com a pressão de inflação mais alta, pois o trabalho de flexão do corpo do pneu será bastante reduzido (GILLESPIE, 1992).

Analisando os fatores de pressão de inflação do pneu e área de contato pneu-solo, pode-se verificar que a pressão de inflação do pneu afeta a dinâmica do mesmo, devido a efeitos relacionados à capacidade do pneu de transferir forças e variações nas dimensões da área de contato do pneu com a pista. O primeiro efeito pode ser explicado em termos de mudanças induzidas por variações da pressão de inflação na rigidez longitudinal do escorregamento, na rigidez nas curvas e na curvatura, como nos coeficientes de pico longitudinais e laterais. Os efeitos no contato do pneu são uma consequência da variação linear da rigidez vertical do pneu com a pressão de inflação do mesmo, induzindo variações na deflexão do pneu, fazendo com que uma redução na pressão de inflação acarrete, geralmente, em um aumento da área de contato, induzindo uma deformação inadequada da banda de rodagem e das paredes laterais do pneu, tendo como consequência direta a redução na vida útil do pneu (d'AMBROSIO, VITOLO, 2018; EJSMONT et al., 2018; EJSMONT et al., 2016; EJSMONT, OWCZARZAK, 2019; TAGHAVIFAR, MARDANI, 2013; LIANG et al., 2019; GILLESPIE, 1992).

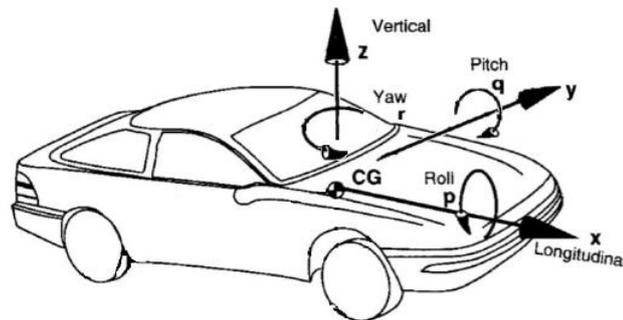
4.3. Dinâmica Veicular

A dinâmica veicular analisa os movimentos de um corpo rígido em relação a um sistema de coordenadas fixo, sendo o ramo de estudo que analisa os movimentos e as interações entre o veículo, pista, eixos coordenados, condutor e o ambiente bem como as reações de carga envolvidas no processo. A literatura propõe a divisão da dinâmica veicular em três grandes áreas: longitudinal, vertical e lateral com enfoques bem diferentes, mas que, eventualmente, em determinados projetos podem atuar juntos em um mesmo modelo (ECKERT, 2013; HOELTGEBAUM, 2013; GILLESPIE, 1992).

4.3.1. Dinâmica Longitudinal

A dinâmica longitudinal estuda o movimento longitudinal, direção de deslocamento veicular, e rotações em torno do eixo y em resposta a torques aplicados às rodas, analisando as forças e momentos que compõem tal movimento na direção do eixo x , conforme representado na Figura 13. Essa área da dinâmica veicular é responsável pelo cálculo do consumo da potência requerida pelo veículo para que este consiga cumprir um determinado trajeto, estimando por meio de equações as forças que atuam no sistema, tais como a resistência aerodinâmica e o atrito entre os pneus e a pista, bem como fatores referentes ao ângulo de inclinação da estrada e comportamento do motorista (ECKERT, 2013; EGER, 2007; HOELTGEBAUM, 2013; GILLESPIE, 1992).

Figura 13: Representação dos Eixos Coordenados do Veículo



Fonte: HOELTGEBAUM, 2013

As propriedades de tração longitudinal são os parâmetros do sistema envolvendo pneu/veículo que determinam o desempenho da frenagem e a distância de parada. As propriedades de tração longitudinal também podem determinar o desempenho limitador da aceleração ou subida de um veículo, sendo o coeficiente de aderência (pico) de importância primordial, podendo ser efetivamente utilizado pelo motorista qualificado ou por um sistema de controle de tração (GILLESPIE, 1992).

4.3.2. Dinâmica Vertical e Lateral

O objetivo da dinâmica vertical é entender os movimentos da suspensão e dos chassis a fim de garantir conforto e segurança aos ocupantes do veículo. As frequências das vibrações induzidas pela pista durante um deslocamento vertical das rodas são um alvo comum no estudo desse ramo da dinâmica veicular, já que o corpo humano pode ser exposto a desconfortos e distúrbios durante os movimentos verticais (HOELTGEBAUM, 2013; GILLESPIE, 1992).

A dinâmica lateral, por sua vez, preocupa-se em descrever as interações do veículo em situações de deslocamento no sentido do eixo y. Geralmente, o objeto de estudo está relacionado com a capacidade de contornar curvas de acordo com os parâmetros da suspensão e do sistema de direção. Desse modo, o estudo dessa área da dinâmica veicular inicia-se no movimento do veículo gerado por uma excitação do sistema de direção (HOELTGEBAUM, 2013; GILLESPIE, 1992).

Quando um pneu é submetido a uma força lateral, o mesmo desliza para o lado, criando um ângulo entre a direção do pneu e a direção de trajeto, sendo conhecido como ângulo de deriva (GILLESPIE, 1992). Pode-se notar que eixos submetidos a maiores variações de carga vertical nas rodas apresentam um maior ângulo de deriva, para uma força lateral constante, uma vez que ocorre uma maior deformação do pneu. Em condições de pista seca, a menor flexibilidade dos sulcos mais rasos de pneus desgastados contribui para uma menor deformação, tendo como consequência, um menor ângulo de deriva para uma determinada força lateral analisada (LEAL, ROSA, NICOLAZZI, 2012).

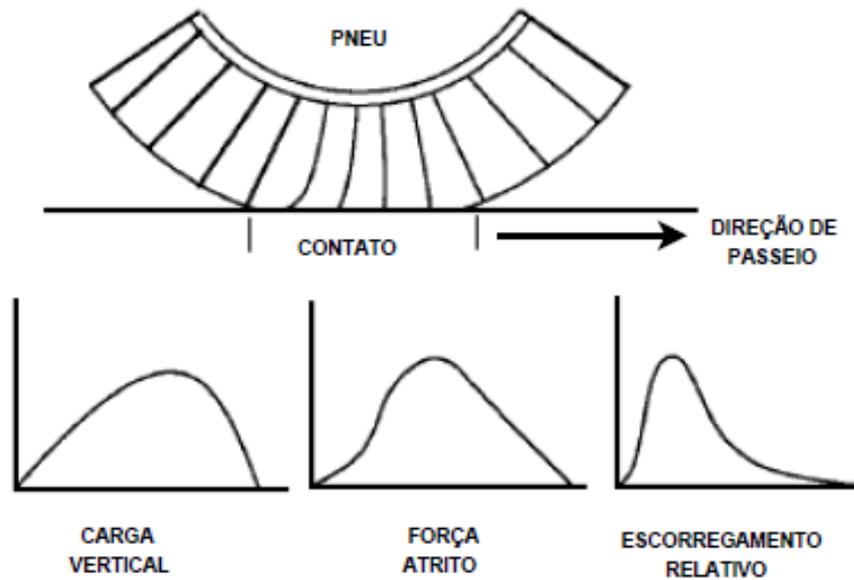
Diversos trabalhos desenvolvidos estão abordando características de parâmetros de entrada associados às forças vertical e lateral, (REYES et al., 2015; JIANG et al., 2014; DOUMIATI et al., 2011; BAFFET, CHARARA, STÉPHANT, 2006; CORDOS, TODORUT, BARABÁS, 2017).

4.4. Propriedades Tratativas

Os processos de aceleração e frenagem de um veículo são influenciados pela transferência de esforços à pista e da capacidade de um pneu se aderir ao solo, uma vez que, as forças aerodinâmicas, gravitacionais e aquelas decorrentes da interação entre pneu e solo são responsáveis por afetar a movimentação de um veículo (GILLESPIE, 1992).

Sob as condições de aceleração e frenagem, um deslizamento adicional é observado como resultado da deformação dos elementos de borracha na banda de rodagem do pneu, à medida que eles defletem para desenvolver e sustentar a força de atrito. O mecanismo de deformação no sistema de contato em condições de frenagem é representado pela Figura 14 (GILLESPIE, 1992; EGER, 2007).

Figura 14: Região de Contato Pneu/Solo em Condições de Frenagem



Fonte: EGER, 2007

Quando um pneu está girando, sua carcaça é defletida em sua área de contato com o solo. Como resultado da distorção do pneu, a pressão normal ao solo muda contendo duas partes, uma parte de aderência e outra que se arrasta, fazendo com que o centro de pressão normal seja alterado no sentido da rotação, proporcionando a componente de resistência ao rolamento. Esta mudança produz um momento em torno do eixo de rotação do pneu, denominado como momento de resistência ao rolamento (EGER, 2007).

Diante disso, as forças de aceleração e frenagem são geradas produzindo um diferencial entre a velocidade de rolamento do pneu e sua velocidade de deslocamento, tendo como consequência a produção de deslizamento presente na interface de contato entre o pneu e o solo, tornando o entendimento dessa interação de extrema importância para a compreensão do comportamento dinâmico do veículo. O deslizamento é definido, adimensionalmente, como uma porcentagem da velocidade de avanço, conforme as Equações (4.2) e (4.3) (GILLESPIE, 1992; REIMPELL, STOLL, BETZLER, 2001):

$$i = \left[1 - \left(\frac{r \omega}{V_v} \right) \right] 100\% \quad (\text{frenagem}) \quad (4.2)$$

$$i = \left[1 - \left(\frac{V_v}{r \omega} \right) \right] 100\% \quad (\text{aceleração}) \quad (4.3)$$

Onde nas Equações (4.2) e (4.3), i , r , ω e V_v referem-se ao deslizamento, raio de rolamento eficaz do pneu, velocidade angular da roda e velocidade de avanço longitudinal da roda, respectivamente.

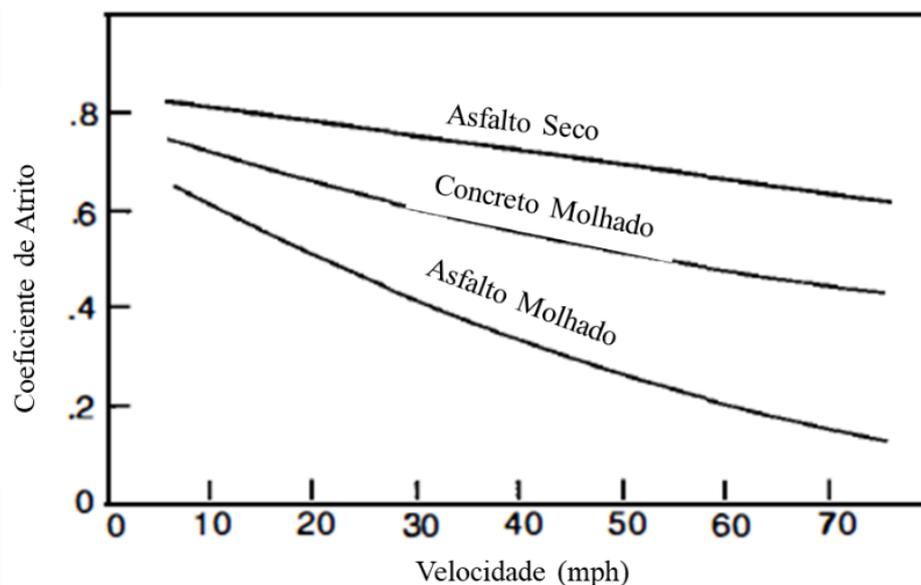
Sob condições típicas de dinâmica longitudinal, a força longitudinal produzida por um pneu varia de acordo com o deslizamento; à medida que o deslizamento é aplicado, a força de atrito aumenta ao longo de uma inclinação inicial que define uma propriedade de rigidez longitudinal do pneu (GILLESPIE, 1992).

Para fins de caracterização das propriedades de tração dos pneus, é comum se referir ao coeficiente de atrito nas condições de aderência (pico) e deslizamento, os quais são representados como μ_p e μ_s , respectivamente. O coeficiente de atrito de aderência, μ_p , determina o limite de frenagem quando as rodas não travam, ao passo que nas situações em que uma ou mais rodas travam, o coeficiente de atrito deslizante, μ_s , por sua vez, determina as contribuições de frenagem dessas rodas, sendo uma importante propriedade de desempenho do pneu (GILLESPIE, 1992).

4.5. Influência da Velocidade na Dinâmica Longitudinal

Em pistas secas, os coeficientes de aderência e deslizamento diminuem com o aumento da velocidade, conforme ilustrado na Figura 15. Sob condições úmidas, a sensibilidade à velocidade prevalece ainda maior devido à dificuldade de deslocar a água na região de contato em altas velocidades (GILLESPIE, 1992; REIMPELL, STOLL, BETZLER, 2001).

Figura 15: Relação entre Velocidade em Diferentes Superfícies e Coeficiente de Atrito de Deslizamento



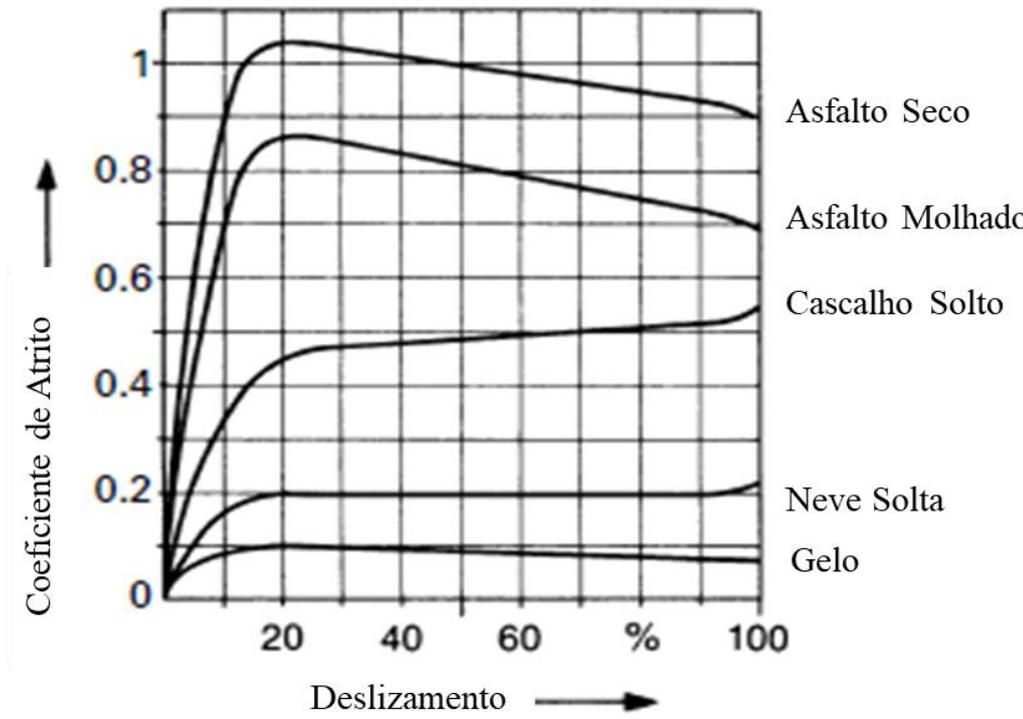
Fonte: Adaptado de GILLESPIE, 1992

4.6. Influência das Condições de Superfície de Estrada na Dinâmica Longitudinal

O coeficiente de atrito depende das condições de solo, assim como também das condições dos pneus, associadas à pressão de inflação, temperatura ambiente, velocidade do veículo. Desse modo, as pesquisas tentam classificar as estradas em categorias, como asfalto seco, asfalto molhado, por exemplo. Uma vez que a avaliação do coeficiente de atrito é importante para avaliar a razão do atrito utilizado e garantir uma maior segurança ao comportamento dinâmico do veículo (DOUMIATI et al., 2011; GILLESPIE, 1992; SINA, YAZDI, ESFAHANIAN, 2019; HAN et al., 2016).

Quanto maior a força de frenagem ou a tração a ser transmitida, maior será o escorregamento. Dependendo das condições da pista, a força longitudinal transferível atinge seu valor mais alto entre 10% e 30% de escorregamento e depois reduz até a roda travar, isto é, escorregamento igual a 100%, conforme a Figura 16 (REIMPELL, STOLL, BETZLER, 2001).

Figura 16: Relação entre Coeficiente de Atrito e Deslizamento em Diferentes Condições de Superfícies de Pistas



Fonte: Adaptado de REIMPELL, STOLL, BETZLER, 2001

A Tabela 2 indica os valores esperados para o coeficiente de aderência para diversas superfícies de pistas.

Tabela 2: Influência do Tipo de Pista com Coeficiente de Atrito de Aderência

Tipo de Pista	μ_p
Asfalto Seco	0,80 a 0,90
Concreto Seco	0,80 a 0,90
Asfalto Molhado	0,50 a 0,70
Concreto Molhado	0,80
Cascalho	0,60

Fonte: Adaptado de JAZAR, 2008

Em um solo rígido, como concreto ou asfalto, todo o escorregamento é devido à deformação do pneu; em solos pouco rígidos, por sua vez, sua deformação é preponderante e a interpenetração entre o pneu e a pista é decisiva para a tração. Em relação à transmissão de força para o piso, a parte do solo situada dentro dos sulcos do pneu escorrega em relação ao restante do solo e a aderência fica limitada. Neste caso, o pneu deve possuir uma banda de rodagem com desenhos de sulcos profundos para poder utilizar a máxima capacidade de tração disponível. Em alturas de camadas de água baixas, efeitos como velocidade absoluta de deslizamento mais elevada ou temperaturas maiores podem ser mais relevantes para a diminuição do coeficiente de atrito em altas velocidades do que propriamente a altura do filme de água presente na pista (LÖWER et al., 2020; LEAL, ROSA, NICOLAZZI, 2012).

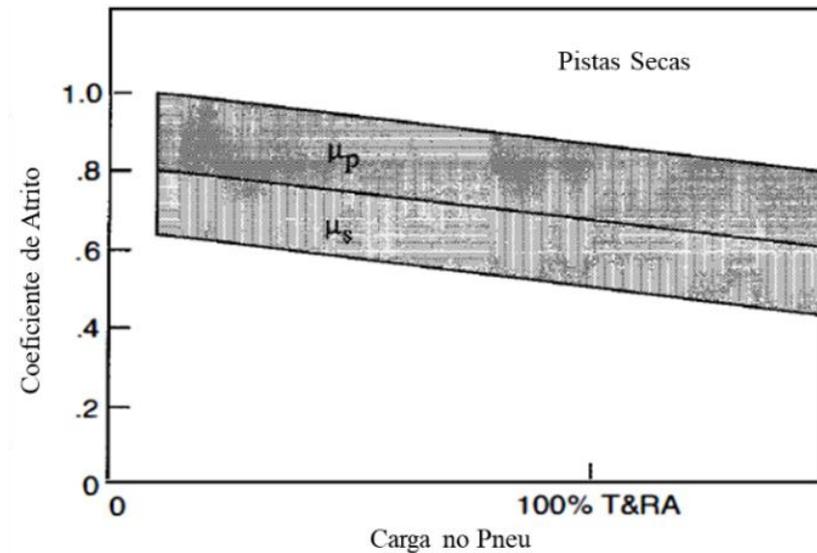
Em velocidades próximas a 50 km/h, a influência da altura de água presente na pista em relação ao coeficiente de atrito entre pneu e solo é muito pequena e, para alguns padrões de banda de rodagem, um aumento da altura da água leva a um nível de aderência mais alto. Tal fato pode ser explicado pelo efeito de resfriamento da água, porque uma temperatura mais baixa da borracha pode levar a uma maior aderência. A compressão do fluido entre a pista e o pneu não possui um efeito significativo em velocidades tão baixas e, portanto, o coeficiente de atrito não é reduzido com o aumento da altura da água (LÖWER et al., 2020).

4.7. Influência da Carga Vertical na Dinâmica Longitudinal

O aumento da carga vertical reduz os coeficientes de atrito sob condições úmidas e secas, fazendo com que o aumento da carga, não aumente proporcionalmente as forças de atrito do pico e deslizamento. A faixa geral dos coeficientes de atrito para pneus de carros de passeio

em estradas com superfícies secas como uma função da carga está representada pela Figura 17 (GILLESPIE, 1992).

Figura 17: Variação dos Coeficientes de Atrito em Relação à Carga no Pneu



Fonte: Adaptado de GILLESPIE, 1992

Diversos estudos acerca do parâmetro coeficiente de atrito estão sendo desenvolvidos e analisados relacionados a fatores ligados a forças presentes no comportamento veicular, aumento das condições de segurança veicular, resistência ao rolamento de pneus, irregularidades de solos, além de fatores relacionados às propriedades de partículas na interface de contato pneu/solo (LÖWER et al., 2020; HAN et al., 2016; LEE et al., 2013; LEE, TAHERI, 2018; SINA, YAZDI, ESFAHANIAN, 2019; DOUMIATI et al., 2011).

4.8. Técnicas de Metamodelagem

Problemas de *design* intensivos em computação estão se tornando cada vez mais comuns nas indústrias automotivas. O ônus da computação é geralmente causado por processos caros de análise e simulação a fim de atingir um nível comparável de precisão e confiável dos dados de testes físicos, sendo frequentemente utilizadas técnicas de aproximação ou metamodelo para enfrentar esse desafio. Desse modo, as técnicas de metamodelagem foram desenvolvidas a partir de várias disciplinas, tais como estatística, matemática, ciência da computação e várias disciplinas de engenharia. Os metamodelos são desenvolvidos inicialmente como ferramentas de substituição do caro processo de simulação, a fim de melhorar a eficiência geral da computação, além disso, são considerados uma ferramenta

valiosa para apoiar um amplo escopo de atividades no projeto de engenharia moderno, especialmente na otimização de projetos (DEY, MUKHOPADHYAY, ADHIKARI, 2017; WANG, SHAN, 2007).

Nas duas últimas décadas, os métodos de aproximação e a otimização baseada em aproximação atraíram muita atenção, sendo que esse tipo de abordagem aproxima funções intensivas computacionais com modelos analíticos simples. O modelo simples é frequentemente chamado de metamodelo, enquanto o processo de construção de um metamodelo é chamado de metamodelagem. De posse de um metamodelo, os métodos de otimização podem ser aplicados com o objetivo de procurar o ideal, o que é, portanto, conhecido como otimização de design baseado em metamodelo (MBDO) (WANG, SHAN, 2007).

Os benefícios da MBDO estão associados a diversos fatores, tais como: maior facilidade em conectar códigos de simulação proprietários e frequentemente caros; a computação paralela se torna simples, pois envolve a execução da mesma simulação em muitos pontos do projeto; a construção de metamodelos pode filtrar melhor o ruído numérico do que os métodos baseados em gradiente; o metamodelo exhibe uma visão de todo o espaço do projeto; a facilidade em detectar erros na simulação à medida que todo o domínio do design é analisado (WANG, SHAN, 2007).

Pesquisas intensivas foram realizadas no emprego de técnicas de metamodelo no design e otimização, incluindo, dessa forma, pesquisas sobre amostragem, metamodelos, técnicas de ajuste de modelos, validação de modelos, exploração do espaço de projeto, métodos de otimização para suporte a diferentes tipos de problemas de otimização. Ao longo dos anos, ficou claro que o metamodelo fornece um papel de apoio às decisões para os engenheiros. Algumas das áreas em que o metamodelo pode desempenhar um papel são listadas (WANG, SHAN, 2007):

- Aproximação do modelo: a aproximação dos processos de computação em todo o espaço do projeto, ou aproximação global, é usada para reduzir os custos de computação; é uma peça chave para a otimização do projeto baseado em metamodelos. Convencionalmente, o objetivo da aproximação é alcançar um metamodelo global o mais preciso possível, a um custo computacional razoável. Em geral, uma maior quantidade de pontos de amostra oferece mais informações da função, no entanto, com um custo computacional maior (DEY, MUKHOPADHYAY, ADHIKARI, 2017; WANG, SHAN, 2007).

Para funções de baixa ordem, após atingir um determinado número de amostras, o aumento do número de pontos amostrais não contribui de forma eficaz para a precisão da aproximação. Além disso, quando certos critérios de otimização são utilizados para gerar amostras, esses critérios de otimização, como máxima entropia, estão relacionados à distribuição da amostra e são independentes da função (WANG, SHAN, 2007).

O método de simulação de Monte Carlo (MCS), o qual consiste em uma análise estocástica, sendo um método de amostragem aleatória exigindo milhares de iterações, ainda é um método de amostragem popular na indústria, independentemente de sua ineficiência. A amostragem de importância (IS), a qual consiste em um melhoramento do método de simulação de Monte Carlo, tem o potencial de melhorar sua eficiência, mantendo o mesmo nível de precisão que o MCS (DEY, MUKHOPADHYAY, ADHIKARI, 2017; WANG, SHAN, 2007).

Assim sendo, além das funções polinomiais comumente usadas, é utilizado o modelo estocástico, chamado Kriging para tratar a resposta determinística do computador como uma realização de uma função aleatória em relação à resposta real do sistema. Redes neurais também foram aplicadas na geração de superfícies de resposta para aproximação do sistema, além de outros tipos de modelos, tais como funções de base radial (RBF), “splines” de regressão adaptativa multivariada (MARS), polinômios menos interpoladores e aprendizado indutivo (DEY, MUKHOPADHYAY, ADHIKARI, 2017; WANG, SHAN, 2007).

Cada tipo de metamodelo tem seu método de ajuste associado, como no caso de funções polinomiais, geralmente, ajustadas pelo método de mínimos quadrados. Em geral, as experiências computacionais apresentam um erro aleatório muito pequeno, que pode ser causado pela geração ou arredondamento de números pseudo-aleatórios (WANG, SHAN, 2007).

- Exploração do espaço de design: o espaço de design é explorado a fim de aprimorar a compreensão dos engenheiros do problema de design, trabalhando em um metamodelo de baixo custo para execução. Dado um metamodelo razoavelmente preciso, o espaço de design pode ser explorado para obter uma visão mais profunda do problema de design e formular melhor o problema de otimização. Um método comum que um engenheiro usa para entender um problema de projeto é por meio da análise de sensibilidade, sendo que ao alterar a condição, as informações de sensibilidade também serão alteradas. Além disso, a SGI e a Ford integraram computação paralela e metamodelo para visualização rápida de alternativas de projeto, ratificando a aprovação dos estudos realizados acerca da eficiência e eficácia do projeto, as

quais podem ser melhoradas utilizando a abordagem do metamodelo na interface gráfica do projeto (WANG, SHAN, 2007).

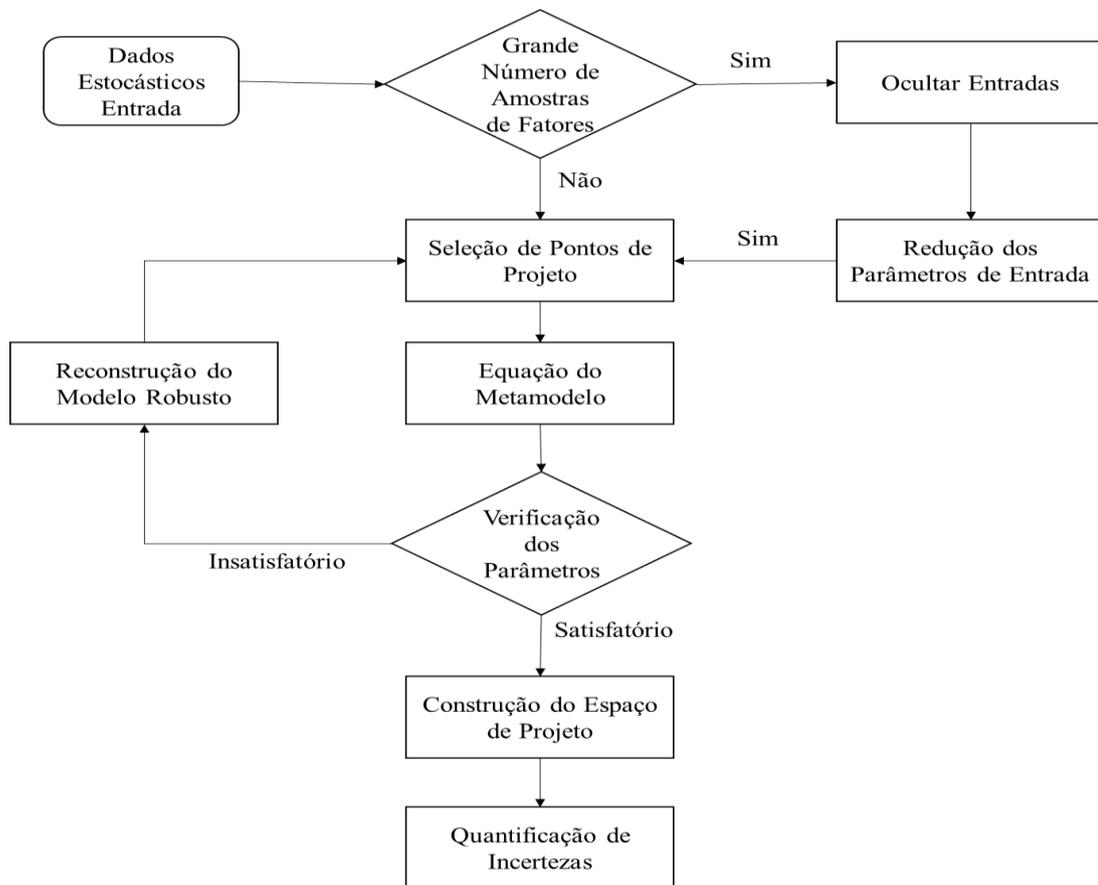
- **Formulação de problemas:** Baseado em uma compreensão aprimorada de um problema de otimização de design, o número e o intervalo de pesquisa de variáveis de design podem ser reduzidos, sendo que certas restrições ineficazes podem ser removidas. É possível que um único problema de otimização objetivo possa ser alterado para um problema de otimização multi-objetivo ou vice-versa. A qualidade do modelo de otimização afeta diretamente a viabilidade, custo e eficácia da otimização. O metamodelo e a exploração do espaço de projeto podem ajudar o engenheiro a decidir sobre uma meta razoável para objetivos e limites de restrições, além de que alguns dos objetivos ou restrições podem ser eliminados, combinados ou modificados. É importante salientar que o metamodelo ajuda significativamente a reduzir o número de variáveis de design e seu intervalo de pesquisa, acarretando em uma redução do custo computacional de simulação (WANG, SHAN, 2007).

- **Suporte a várias necessidades de otimização:** o setor tem várias necessidades de otimização, por exemplo, otimização global, otimização de múltiplos objetivos, otimização de design multidisciplinar, otimização probabilística, sendo que cada tipo de otimização possui seus próprios desafios. As vantagens de aplicar o metamodelo na otimização são múltiplas, como por exemplo: a eficiência da otimização é bastante aprimorada com os metamodelos; diminuição do tempo de simulação de projetos; o processo de aproximação pode ajudar a estudar a sensibilidade das variáveis de projeto e, assim, fornecer informações aos engenheiros sobre o problema; a possibilidade desse método lidar com variáveis contínuas e discretas (WANG, SHAN, 2007).

A incerteza nos metamodelos traz novos desafios no processo de otimização, diante disso, devem ser desenvolvidos métodos matematicamente rigorosos para quantificar a incerteza de um metamodelo, visto que somente com base na otimização probabilística baseada em metamodelo e otimização restrita podem ser executadas com confiabilidade satisfatória (WANG, SHAN, 2007).

Um algoritmo típico baseado em metamodelo para quantificação de incerteza de um sistema é representado conforme a Figura 18.

Figura 18: Algoritmo de Quantificação de Incertezas de um Sistema



Fonte: Adaptado de DEY, MUKHOPADHYAY, ADHIKARI, 2017

4.9. Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo consiste em um método numérico baseado em amostragem randômica utilizado em simulações probabilísticas, o qual solicita a geração de amostras formadas por variáveis a partir de uma variável aleatória, vetor ou processo, isto é, utilizando as distribuições de probabilidade previamente fixadas no modelo estocástico. As abordagens de Monte Carlo utilizam a amostragem aleatória como uma ferramenta para produzir observações que podem ser utilizadas para realizar análises ou inferência estatísticas, com o objetivo de extrair informações sobre quantidades de interesse (de CURSI, SAMPAIO, 2015; CASTELO, RITTO, 2015).

As etapas da construção dos modelos determinístico e estocástico do sistema são fundamentais para obter-se resultados realistas nas simulações estocásticas. Esses dois modelos são utilizados no Método de Monte Carlo e influenciam de forma direta as respostas obtidas (de CURSI, SAMPAIO, 2015; CASTELO, RITTO, 2015).

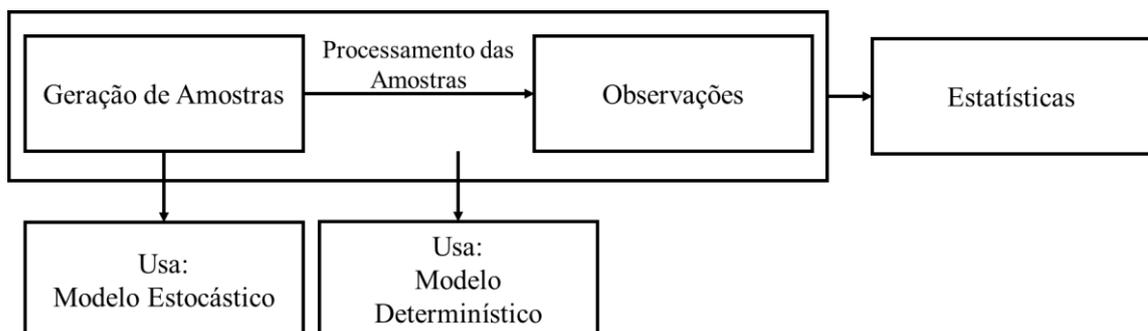
Geralmente, deseja-se gerar estudos de um objeto estocástico, o qual está sujeito a uma determinada densidade de probabilidade, e posteriormente utilizar as amostras obtidas para aproximar alguma função de interesse. Assim, o método faz uso de amostragem aleatória como ferramenta para produzir observações sobre as quais se realizam inferências estatísticas para extrair informações sobre as observações (de CURSI, SAMPAIO, 2015; CASTELO, RITTO, 2015).

A capacidade do método de Monte Carlo em obter aproximações numéricas para problemas complexos o tornou uma importante ferramenta matemática. A maneira como é feita a implementação do método de Monte Carlo está intrinsecamente correlacionada com o problema no qual ele será aplicado (de CURSI, SAMPAIO, 2015; CASTELO, RITTO, 2015).

A precisão dos resultados da simulação depende muito da definição precisa do sistema. Todos os parâmetros críticos devem ser incluídos no modelo. A definição dos parâmetros de entrada deve incluir suas características estatísticas ou probabilísticas, isto é, conhecimento de seus momentos e tipos de distribuição. Os resultados dessas gerações são um conjunto de valores específicos para os parâmetros de entrada, sendo que esses valores devem ser substituídos no modelo para obter uma medida de saída. Repetindo o procedimento N vezes para N ciclos de simulação, N medidas de resposta são obtidas. Desse modo, os métodos estatísticos podem ser usados para obter, por exemplo, o valor médio, variação ou tipo de distribuição da resposta. Espera-se que a precisão das medidas resultantes para o comportamento aumente com o crescimento do número de ciclos de simulação. A convergência dos métodos de simulação pode ser investigada estudando seu comportamento limitante à medida que N é aumentado. Além disso, a eficiência dos métodos de simulação pode ser aumentada usando técnicas de redução de variância (AYYUB, KLIR, 2006).

A Figura 19 apresenta um esquema com as principais etapas do método em questão.

Figura 19: Método de Monte Carlo



Fonte: O autor

4.10. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade e incerteza está se tornando cada vez mais difundida em muitos campos da engenharia e ciências, abrangendo praticamente todas as atividades experimentais de processamento de dados, bem como diversas atividades de modelagem computacional e simulação de processos. Existem muitos métodos, baseados em conceitos determinísticos ou estatísticos, para realizar análises de sensibilidade e incerteza (CACUCI, IONESCU-BUJOR, NAVON, 2005; SALTELLI et al., 2004; BORGONOVO, 2017).

Os procedimentos de análise de sensibilidade e incerteza podem ser de âmbito local ou global. O objetivo da análise local é analisar o comportamento da resposta do sistema localmente em torno de um ponto escolhido para sistemas estáticos ou trajetória escolhida para sistemas dinâmicos no espaço de fase combinado de parâmetros e variáveis de estado (CACUCI, IONESCU-BUJOR, NAVON, 2005; SALTELLI et al., 2004; BORGONOVO, 2017).

Por outro lado, o objetivo da análise global consiste em determinar todos os pontos críticos do sistema (bifurcações, pontos de inflexão, máximos de resposta, mínimos e/ou pontos de sela) no espaço de fase combinado formado pelos parâmetros e dependente (estado) variáveis e, posteriormente, analisar esses pontos críticos por meio de uma abordagem local de sensibilidade e incerteza. Os métodos para análise de sensibilidade e incerteza são baseados em procedimentos estatísticos ou determinísticos. Em princípio, ambos os tipos de procedimentos podem ser utilizados para análise de sensibilidade e incerteza local ou global, embora, na prática, métodos determinísticos sejam usados principalmente para análises locais, enquanto métodos estatísticos são usados para análises locais e globais (CACUCI, IONESCU-BUJOR, NAVON, 2005; SALTELLI et al., 2004; BORGONOVO, 2017).

Nesse contexto, a análise de sensibilidade tem como objetivo, entre outros, estabelecer prioridades, determinar qual fator mais necessita de melhor determinação e identificar os elos fracos da cadeia de avaliação, referentes aqueles que propagam maior variação no resultado. A análise de sensibilidade nesse contexto é frequentemente realizada utilizando técnicas de regressão (CACUCI, IONESCU-BUJOR, NAVON, 2005; SALTELLI et al., 2004; BORGONOVO, 2017).

O algoritmo de regressão retorna um metamodelo de regressão, pelo qual a saída Y é descrita em termos de uma combinação linear dos fatores de entrada, sendo que o coeficiente

de regressão para um dado fator desempenha o papel de uma medida de sensibilidade para esse fator (SALTELLI et al., 2004).

Diversos estudos utilizando técnicas de análises de sensibilidade são empregados em abordagens de *performance* de pneus automotivos, a fim de identificar os parâmetros mais influentes no comportamento dinâmico do veículo, bem como em aplicações de forças longitudinais e laterais por meio de uma análise empírica utilizando a Fórmula Mágica (PACEJKA, 2012), na variabilidade do material constituinte do pneu e seus aspectos geométricos, em ângulos de deslizamento lateral relacionando com a velocidade do veículo, além de aplicações em processos de otimização (KIÉBRÉ, ANSTETT-COLLIN, BASSET, 2010; NOOR, TANNER, PETERS, 1992; CHUMSAMUTR, FUJIOKA, ABE, 2006; ANSTETT-COLLIN, MARA, BASSET, 2014).

4.11. Fontes de Incertezas e Variabilidades

O sistema real, submetido a um determinado ambiente, pode exibir uma variabilidade em suas respostas devido a flutuações no processo de fabricação e devido a pequenas variações da configuração em torno de uma configuração nominal associada ao sistema projetado. O modelo computacional, que resulta de um processo de modelagem matemática-mecânica do sistema de projeto, possui parâmetros que podem ser incertos, sendo que, nesse caso, existem incertezas nos parâmetros do modelo computacional. Além disso, o processo de modelagem induz alguns erros de modelagem definidos como as incertezas do modelo (SOIZE, 2017; AYYUB, KLIR, 2006; SULLIVAN, 2015; CASTELO, RITTO, 2015).

Todo sistema envolve uma relação entre variáveis, que é utilizada de uma maneira determinada a fim de identificar estados desconhecidos de algumas variáveis com base nos estados conhecidos de outras variáveis. Quando os estados desconhecidos são determinados exclusivamente, os sistemas são chamados determinísticos, caso contrário, são denominados não determinísticos. É comum a observação que sistemas não determinísticos são muito mais prevalentes que sistemas determinísticos na ciência e na tecnologia contemporâneas (SOIZE, 2017; AYYUB, KLIR, 2006; SULLIVAN, 2015).

Cada sistema não determinístico envolve inevitavelmente alguma incerteza, que está associada ao objetivo para o qual o sistema foi construído. Em cada sistema não determinístico, a incerteza relevante deve ser adequadamente incorporada à descrição formal do sistema em

termos teóricos definidos ou em termos de alguma outra linguagem formalizada (SOIZE, 2017; AYYUB, KLIR, 2006; SULLIVAN, 2015; CASTELO, RITTO, 2015).

É comum dividir as incertezas em dois tipos, incerteza aleatória e epistêmica. A primeira refere-se à incerteza sobre um fenômeno inerentemente variável, enquanto a segunda refere à incerteza decorrente da falta de conhecimento. Uma vez que há um modelo para algum determinado sistema de interesse, a incerteza epistêmica é muitas vezes subdividida em incerteza na forma de modelo, na qual se tem dúvidas significativas de que o modelo é “estruturalmente correto” e incerteza paramétrica, na qual se acredita que a forma do modelo reflete bem a realidade, mas não se sabe aos valores corretos a serem usados para parâmetros específicos no modelo. As incertezas nos parâmetros estão relacionadas com as incertezas advindas dos parâmetros utilizados no modelo numérico, enquanto as incertezas no modelo estão relacionadas à estrutura do modelo empregado (SULLIVAN, 2015; SOIZE, 2017; CASTELO, RITTO, 2015).

Os erros relacionados ao método usado para a construção de uma solução aproximada, como por exemplo o método dos elementos finitos, que é frequentemente usado para construir o modelo computacional, devem ser reduzidos e controlados, e não devem ser considerados como incertezas. Entretanto, os erros induzidos pelo uso de um modelo computacional de ordem reduzida ao invés do modelo computacional de alta dimensão podem ser vistos como incertezas (SULLIVAN, 2015; SOIZE, 2017).

Desse modo, um problema de quantificação de incertezas típico envolve um ou mais modelos matemáticos para um processo de interesse, sujeito a alguma incerteza sobre a forma correta ou valores de parâmetros para esses modelos, embora nem sempre, essas incertezas são tratadas probabilisticamente. Em vários casos, a teoria probabilística subjacente aos métodos de quantificação de incertezas é realmente bastante simples, mas é obscurecida pelos detalhes da aplicação, no entanto, essas complicações que as aplicações práticas apresentam também fazem parte da essência da quantificação de incertezas (SULLIVAN, 2015; SOIZE, 2017).

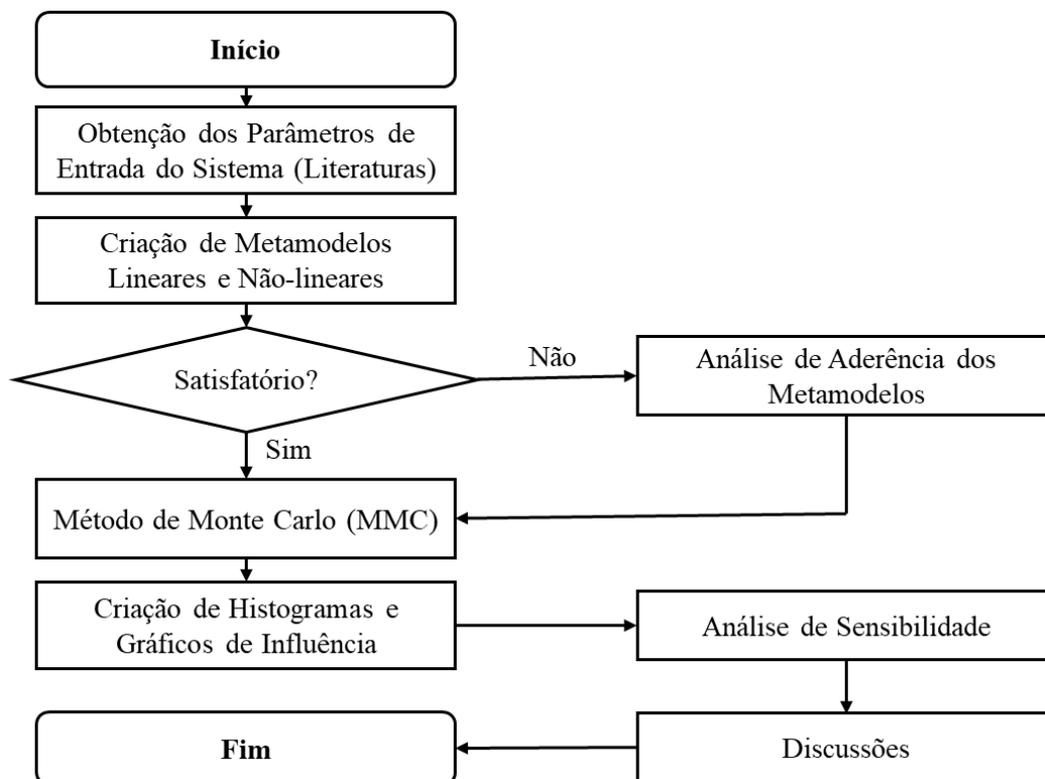
Os problemas típicos de quantificação de incertezas de interesse incluem certificação, previsão, verificação e validação de modelo e software, estimativa de parâmetros, assimilação de dados e problemas inversos (SULLIVAN, 2015; SOIZE, 2017; CASTELO, RITTO, 2015).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Metodologia Aplicada

Para o desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso utilizou-se a seguinte metodologia apresentada pela Figura 20.

Figura 20: Fluxograma do Desenvolvimento do Projeto



Fonte: O autor

Para a criação dos modelos de quantificação de incertezas na interação pneu/pista foi analisado a influência de diversos parâmetros que possuem uma inerente variabilidade, e influenciam efetivamente no comportamento das dinâmicas longitudinal e lateral de um veículo. Parâmetros como temperatura ambiente, pressão de inflação, carga, velocidade e coeficiente de atrito foram estudados para a criação dos metamodelos, através de dados experimentais apresentados na literatura.

Primeiramente, por meio do *software* computacional MATLAB, realizou-se a criação dos metamodelos dos dados experimentais coletados por intermédio de literaturas relacionadas à resistência ao rolamento a fim de verificar a influência dos parâmetros de entrada do sistema na resistência ao rolamento de pneus automotivos. Posteriormente, utilizou-se esses modelos criados, não existentes na literatura, no Método de Monte Carlo a fim de quantificar as

incertezas associadas aos aspectos de variabilidade de cada parâmetro para a criação de histogramas e de gráficos associados às influências das incertezas desses modelos na *performance* veicular. Por fim, realizou-se uma análise de sensibilidade acerca das equações de dinâmica veicular a fim de verificar a parcela de contribuição de cada parâmetro, isto é, a *performance* veicular mediante a alterações de seus parâmetros constituintes.

5.2. Criação dos Metamodelos

Realizou-se a criação de metamodelos lineares e não lineares a fim de substituir a inexistência de modelos analíticos ou com alto custo computacional para simular o comportamento da dinâmica veicular. Posteriormente, realizou-se uma análise do domínio da função do metamodelo obtido e sua resposta de maneira a minimizar os erros de modelagem em relação aos dados experimentais. Uma das formas de diminuir os valores de erros percentuais é realizar um processo de refinamento da região de trabalho do sistema analisado em questão, promovendo, desse modo, uma análise mais detalhada na região de interesse, ou redefinindo a função no novo subdomínio, o qual requer uma outra função no metamodelo.

Diversos metamodelos referentes aos parâmetros de entrada do sistema foram desenvolvidos, conforme as Equações (5.1 – 5.5).

$$RRC_{TEMP} \cong F^{MM}(x) = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i T_i + \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q a_j T_j^k \quad (5.1)$$

$$RRC_{PRESSÃO} \cong F^{MM}(x) = c_0 + \sum_{i=1}^m c_i P_i \quad (5.2)$$

$$RRC_{CARGA} \cong F^{MM}(x) = \sum_{i=1}^n \frac{c_0}{W_i} + \sum_{i=1}^m \frac{c_i C_i}{W_i} \quad (5.3)$$

$$RRC_{VELOC} \cong F^{MM}(x) = \sum_{i=1}^m \frac{c_0}{W_i} + \sum_{i=1}^n \frac{c_i V_i}{W_i} + \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \frac{a_j V_j^k}{W_j} \quad (5.4)$$

$$RRC_{TOTAL} = \sum \left[RRC_{TEMP} + RRC_{PRESSÃO} + \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RRC_{CARGA_i} \right] + RRC_{VELOC} \right] \quad (5.5)$$

Sendo $F^{MM}(x)$, RRC_{TEMP} , $RRC_{PRESSÃO}$, RRC_{CARGA} , RRC_{VELOC} e RRC_{TOTAL} uma função relativa ao metamodelo do parâmetro analisado em questão, aos coeficientes de resistência ao rolamento relativos à temperatura, pressão de inflação, carga vertical, velocidade e total do sistema, respectivamente. Os termos c_0 , c_i , a_j são referentes aos coeficientes do metamodelo construído, obtidos por meio de dados experimentais coletados nas literaturas estudadas. Os termos T, P, C, V e W são referentes aos parâmetros de entrada do sistema analisados, sendo eles: temperatura, pressão de inflação, carga vertical, velocidade e carga aplicada ao pneu, respectivamente.

Portanto, fez-se a criação de metamodelos que se ajustem de forma eficaz e eficiente aos dados de projetos experimentais, realizou-se uma inspeção bastante detalhada tanto na sua linearidade e não linearidade, e ordem de grau quanto na faixa de valores de erros percentuais entre o metamodelo desenvolvido e os dados oriundos de testes experimentais. A partir de uma análise rigorosa acerca das formulações relacionadas aos metamodelos, torna-se mais viável a análise de variabilidade pelo Método de Simulação de Monte Carlo.

5.3. Análise de Aderência dos Metamodelos

Análise de valores utilizados nos metamodelos $x^{(K)}$, onde $K = 1, 2, \dots, N^D$, conhecidos e possíveis fisicamente na interação entre pneu e solo. Os coeficientes c_0 , c_i , a_j e a_0 são determinados por meio de sua minimização quadrática do erro, conforme a Equação (5.6).

$$\min e = \sum_{t=1}^{N^D} (F^{MM}(x^K) - F(x^K))^2 \quad (5.6)$$

Sendo assim, realizou-se uma análise detalhada de aderência dos metamodelos com os dados experimentais, retratando que no domínio da função, onde será gerado o Método de Monte Carlo, a mesma teve uma excelente representatividade. Assim, foi possível criar modelos de incertezas e variabilidades sobre os metamodelos, uma vez que não houve alteração do sentido físico do fenômeno analisado. Desse modo, foi possível minimizar os erros entre os dados experimentais e os valores obtidos pela simulação virtual, minimizando, portanto, a incerteza não paramétrica.

Sendo $\min e$: minimização do erro entre o metamodelo e a função original; $F^{MM}(x^K)$: função relacionada ao metamodelo de cada parâmetro; $F(x^K)$: função obtida nas literaturas.

5.4. Simulação de Monte Carlo

Posteriormente à criação e análise dos metamodelos em questão, realizou-se uma simulação dos principais parâmetros analisados, tais como temperatura ambiente, pressão de inflação, carga, velocidade do veículo e coeficiente de atrito para a realização do Método de Simulação de Monte Carlo. Para criação dos modelos probabilísticos nos parâmetros de entrada, o Princípio da Máxima Entropia foi utilizado, isto é, selecionou-se a distribuição probabilística que maximiza a entropia do sistema em análise. Assim, incorporando-se a inerente variabilidade dos parâmetros de entrada nas equações de dinâmica veicular, representadas conforme as Equações (5.7 – 5.12), pôde-se analisar o efeito delas na dinâmica veicular através de histogramas e gráficos de influência.

$$F_{TraçãoMáx} = \frac{\mu_p W_t \left[\frac{L_b + \left[\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 RRC_{Total} \right] h}{L} \right]}{1 + \frac{\mu_p h}{L}} \quad (5.7)$$

$$F_{TraçãoDianteira} = \mu_p W_t \cos\theta \left[\frac{1 - x + \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 RRC_{Total} \right] h}{L} \right] \frac{1}{1 + \frac{\mu_p h}{L}} \quad (5.8)$$

$$F_{centr} = M \frac{V^2}{R} \quad (5.9)$$

$$F_y = \mu_p W_t \left[1 - \frac{\mu_p W_t}{4K_L \tan(\alpha)} \right] \quad (5.10)$$

Onde:

$$K_L \cong F^{MM}(c) = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j P_j \quad (5.11)$$

$$\alpha = \arctan \left[- \frac{\mu_p^2 W_t^2}{4K_L (F_y - \mu_p W_t)} \right] \quad (5.12)$$

Onde: $F_{TraçãoMáx}$: força de tração máxima do veículo; μ_p : coeficiente de atrito de aderência; W_t : peso do veículo; L_b : distância entre o centro de gravidade e a roda traseira do veículo; RRC_{Total} : coeficiente de resistência ao rolamento total; h : altura do centro de gravidade

do veículo; L : distância entre eixos; $F_{\text{TraçãoDianteira}}$: força de tração máxima em veículos com tração dianteira; θ : ângulo de inclinação da pista; x : parcela de carga sobre o eixo traseiro; F_{centr} : força centrípeta; M : massa do veículo; V : velocidade do automóvel; R : raio de curva da pista; F_y : força lateral; K_L : rigidez lateral do pneu; P : pressão de inflação; α : ângulo de deriva do pneu; a_0 e a_j : coeficientes do metamodelo de K_L .

Posteriormente, com a metodologia utilizada pôde-se realizar diversas discussões tanto em termos quantitativos como qualitativos dos efeitos dessa inerente variabilidade dos parâmetros de entrada dos metamodelos e realizar análises subsequentes do comportamento veicular da interação pneu/pista de um veículo, quando sujeito a condições normais de uso.

5.5. Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Entrada do Sistema

Finalmente, pôde-se realizar uma abordagem acerca da sensibilidade desses parâmetros na *performance* do comportamento veicular, a qual busca identificar e quantificar a influência desses parâmetros de entrada do sistema, sendo possível, dessa forma, observar quais fatores possuem maior contribuição quando alterado em um determinado cenário analisado.

Tal análise está embasada na inclinação das curvas de cada parâmetro constitutivo das equações de dinâmica veicular abordadas, as quais são responsáveis por modelar a *performance* do comportamento do automóvel, conforme a Equação (5.13). Posteriormente ao encontrar o valor quantitativo relativo à sensibilidade de cada parâmetro das equações, realizou-se uma normalização dos mesmos.

$$m_{\text{sensib}} = \frac{\Delta \text{resposta}}{\Delta \text{parâmetro}_{\text{entrada}}} \quad (5.13)$$

Sendo m_{sensib} , $\Delta \text{resposta}$ e $\Delta \text{parâmetro}_{\text{entrada}}$ referentes ao valor quantitativo da inclinação da curva de cada parâmetro de entrada, variação dos valores das forças e variação dos valores do determinado parâmetro de entrada analisado em questão, respectivamente.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Metamodelos na Dinâmica Veicular

Visto que a relação na interface entre pneu e solo é um fator importante para o comportamento dinâmico do veículo, bem como consumo de combustível, segurança, conforto, dirigibilidade entre outros aspectos, faz-se necessário entender como fatores ligados ao sistema influenciam a dinâmica veicular como um todo. Dessa forma, parâmetros como pressão de inflação, temperatura, condições de superfícies de solos, carga vertical, velocidade do veículo foram analisados, utilizando metamodelos lineares e não lineares, a fim de detectar as suas respectivas influências nas dinâmicas longitudinal e lateral do veículo.

Após a construção do metamodelo será implementado o Modelo de Simulação de Monte Carlo a fim de analisar os efeitos das incertezas paramétricas na dinâmica veicular, bem como uma análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada do sistema. Sendo assim, a Tabela 3 relaciona os parâmetros de entrada do sistema com a sua respectiva distribuição probabilística determinada pelo Princípio da Máxima Entropia.

Tabela 3: Distribuição Probabilística dos Parâmetros de Entrada do Sistema

Parâmetros	Distribuição Probabilística	Valor Mínimo	Valor Máximo
Temperatura	Uniforme	12 °C	28 °C
Pressão de Inflação	Decaimento Logarítmico	0,1 MPa	0,25 MPa
Carga Vertical	Normal	3200 N	4200 N
Velocidade	Normal	0	≅150 km/h
Coefficiente de Atrito	Uniforme	0,5	0,9
Deslizamento Longitudinal	Uniforme	0,08	0,32

Fonte: O autor

6.1.1. Metamodelo da Temperatura Aplicado à Resistência ao Rolamento

A priori, realizou-se uma análise dos parâmetros pré-determinados relacionando-os com a resistência ao rolamento dos pneus, a fim de verificar a influência de cada um desses fatores em uma das propriedades responsáveis pelas propriedades longitudinais, pelo consumo de combustível veicular e, conseqüentemente, emissão de gases poluentes a atmosfera.

O primeiro metamodelo linear desenvolvido refere-se ao coeficiente de resistência ao rolamento do pneu dianteiro devido à influência das temperaturas ambiente, de superfície da pista e da banda de rodagem do pneu, além de elementos constituintes do material elastomérico do pneu, sendo expressos por meio da Tabela 4. É importante ressaltar que esses fatores estão intimamente relacionados, isto é, diretamente ligados à temperatura ambiente, sendo, portanto, uma função da temperatura ambiente. Os dados obtidos referentes às temperaturas e resistência ao rolamento são advindos em relação ao pneu 225/50 R17 M+S apresentado no material de YOKOTA, HIGUCHI, KITAGAWA (2012).

Tabela 4: Metamodelo Linear da Influência da Temperatura no Pneu Dianteiro

Temperatura Ambiente [°C]	Temperatura Superfície da Pista [°C]	Temperatura Interna		RRC×10 ⁻⁴ (Teste Experimental)	Metamodelo [×10 ⁻⁴]	Erro [%]
		Banda de Rodagem [°C]	tanδ			
10	10	22,7	0,341	117,80	117,79	-0,01
	20	27,7	0,320	112,30	112,31	0,01
20	20	29,3	0,313	110,60	110,58	-0,02
	30	36,8	0,286	103,40	103,45	0,05
	40	43,9	0,260	96,60	96,59	-0,01
30	30	38,0	0,281	102,20	102,22	0,02
	40	45,0	0,255	95,40	95,37	-0,03
	50	51,7	0,231	89,00	89,01	0,01

Fonte: O autor

Por meio de uma análise realizada a partir da Tabela 4, é possível observar que o metamodelo construído se ajusta de forma bastante eficaz aos dados de testes experimentais, tornando o sistema de análise desenvolvido confiável e seguro, uma vez que a faixa de valores relacionada ao erro percentual é inferior a 0,05%, sendo valores referentes a faixa de erros bastante satisfatórios e eficientes. Além disso, o metamodelo criado apresenta um baixo custo operacional e uma rápida resposta associada à simulação do sistema tratado em questão, sendo, desse modo, uma ferramenta bastante interessante e útil para abordagens e análises relacionadas às variáveis listadas. Além disso, pode-se verificar que os valores referentes ao coeficiente de resistência ao rolamento estão compreendidos entre $89,00 \times 10^{-4}$ a 117×10^{-4} , tendo uma variação devido a alterações da temperatura ambiente e dos seus fatores correlacionados.

A Equação (5.1) representa o metamodelo linear referente à influência da temperatura no pneu dianteiro de um veículo, cujos coeficientes do metamodelo desenvolvido foram obtidos por meio de dados experimentais.

6.1.2. Metamodelo da Pressão de Inflação Aplicado à Resistência ao Rolamento

Um outro fator importante a se destacar acerca da resistência ao rolamento de pneus é a pressão de inflação, a qual foi analisada a partir de dados experimentais e, posteriormente desenvolvido um metamodelo linear relacionando tal parâmetro em questão com a resistência ao rolamento do pneu, conforme apresentado pela Tabela 5. Os dados relacionando pressão de inflação e resistência ao rolamento foram obtidos acerca do pneu CONTINENTAL BLUECO 205/65 R16 apresentado no estudo de EJSMONT, OWCZARZAK (2019).

Tabela 5: Metamodelo Linear Relacionando a Influência da Pressão de Inflação na Resistência ao Rolamento

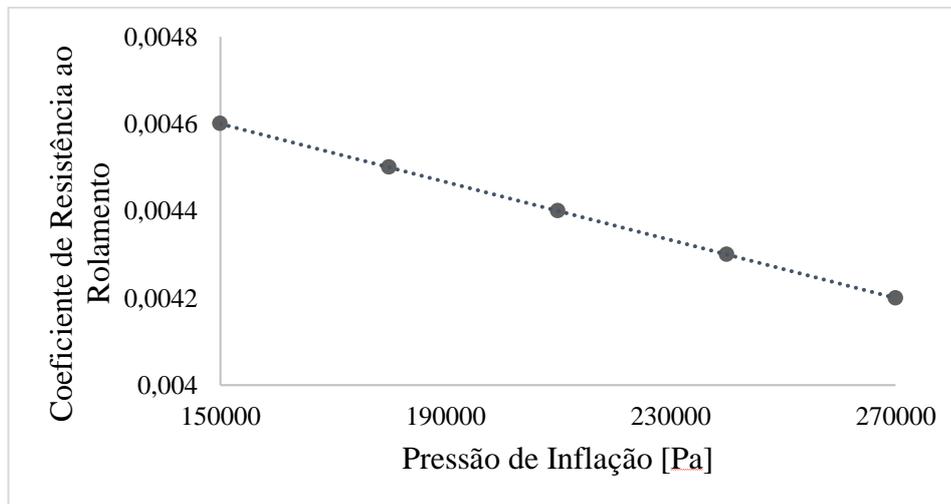
Pressão de Inflação [Pa]	Coefficiente de Resistência ao Rolamento	Metamodelo
150000	0,0046	0,0046
180000	0,0045	0,0045
210000	0,0044	0,0044
240000	0,0043	0,0043
270000	0,0042	0,0042

Fonte: O autor

Analisando a Tabela 5 é possível inferir que o metamodelo desenvolvido associado à influência da pressão de inflação do pneu na resistência ao rolamento do mesmo apresenta um comportamento bastante satisfatório quando comparado aos testes experimentais realizados. Tal fato pode ser comprovado comparando os valores experimentais do coeficiente de resistência ao rolamento com aqueles obtidos por meio do metamodelo construído, fazendo com que o modelo esteja perfeitamente ajustado a curva de dados experimentais apresentada, tendo um coeficiente de determinação R^2 igual a 1. Sendo assim, pode-se verificar que os valores referentes ao coeficiente de resistência ao rolamento estão compreendidos entre 0,0042 e 0,0046, tendo uma variação devido a alterações da pressão de inflação.

O metamodelo construído para a abordagem da influência da pressão de inflação na resistência ao rolamento do pneu é representado pela Equação (5.2). Posteriormente à criação do metamodelo referente à pressão de inflação, desenvolveu-se um gráfico a fim de obter uma melhor verificação da influência desse parâmetro na resistência ao rolamento de pneus automotivos, conforme apresentado pela Figura 21.

Figura 21: Metamodelo Linear da Influência da Pressão de Inflação na Resistência ao Rolamento



Fonte: O autor

Observa-se por meio da análise da Figura 21 que com o aumento da pressão de inflação do pneu, a resistência ao rolamento do mesmo diminui, sendo, portanto, uma relação linear inversamente proporcional. Tal fenômeno pode ser explicado pelo fato de que pneus mais inflados apresentam uma menor área de contato na interface pneu/solo, acarretando em um menor coeficiente de resistência ao rolamento. Sendo assim, pneus com pressão de inflação maior apresentam uma melhor *performance* relacionada ao consumo de combustível e ao seu respectivo desgaste, este relacionado diretamente com o período de vida útil do componente. Logo, observa-se que pneus com um menor valor de pressão de inflação apresenta uma maior resistência ao rolamento devido a sua maior interface de contato com o solo, tendo sua vida útil reduzida, por consequência do processo mencionado em questão.

6.1.3. Metamodelo da Carga Vertical Aplicado à Resistência ao Rolamento

Em relação à influência da carga vertical sobre a força de resistência ao rolamento, foi construído um metamodelo linear que pudesse explicar e se aproximar dos valores experimentais realizados para saber se é possível validar tal metamodelo e identificar a origem

do tipo de erro associado ao sistema, conforme representado pelas Tabelas 6, 7 e 8. Essa análise permite averiguar se o erro é paramétrico ou não-paramétrico. Essas tabelas se referem a uma relação envolvendo um mesmo tipo de pneu (T1077) atuando em três tipos de superfícies de solos diferentes (DAC16r20, ISOr20 e PERSr17), a fim de analisar o comportamento do pneu mediante a distintas condições de pavimento, considerando, por exemplo, diversas formas de irregularidades e texturas de pista. Sendo assim, para a criação dos metamodelos dos casos de carga considerando diferentes pavimentos, o metamodelo utilizado é representado pela Equação (5.3). Os dados associados à carga vertical e resistência ao rolamento do pneu foram obtidos considerando o pneu T1077 P225/60 R16 apresentado no material desenvolvido por EJSMONT et al. (2016).

Tabela 6: Metamodelo Linear da Influência da Carga Vertical no Pneu T1077/Pavimento DAC16r20

Carga [N]	Força de Resistência ao Rolamento [N]	Metamodelo [N]	Erro [%]
2943,0	21,42	21,24	-0,88
3433,5	25,02	25,16	0,65
3924,0	29,28	29,09	-0,68
4414,5	32,85	33,01	0,47
4905,0	37,17	36,94	-0,64
5395,5	40,71	40,86	0,36
5886,0	45,01	44,78	-0,49

Fonte: O autor

Tabela 7: Metamodelo Linear da Influência da Carga Vertical no Pneu T1077/ Pavimento ISOr20

Carga [N]	Força de Resistência ao Rolamento [N]	Metamodelo [N]	Erro [%]
2943	21,42	21,25	-0,85
3433,5	25,01	25,17	0,68
3924	29,28	29,10	-0,65
4414,5	32,85	33,02	0,49
4905	37,14	36,94	-0,54
5395,5	40,71	40,87	0,38
5886	45,02	44,79	-0,46

Fonte: O autor

Tabela 8: Metamodelo Linear da Influência da Carga Vertical no Pneu T1077/ Pavimento PERSr17

Carga [N]	Força de Resistência ao Rolamento [N]	Metamodelo [N]	Erro [%]
2943	29,28	29,12	-0,53
3433,5	33,57	33,54	-0,08
3924	37,85	37,95	0,27
4414,5	42,42	42,37	-0,13
4905	46,57	46,78	0,46
5395,5	51,42	51,20	-0,44
5886	55,71	55,61	-0,18

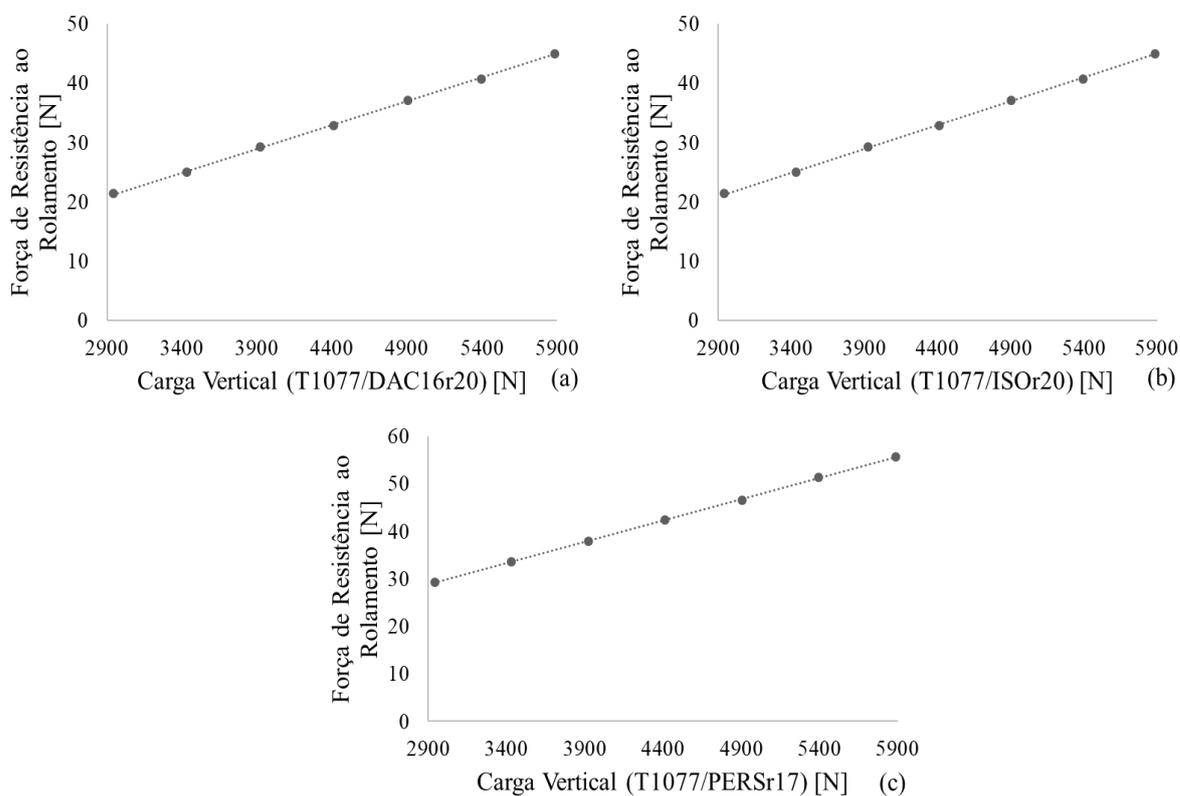
Fonte: O autor

Os três metamodelos lineares desenvolvidos por intermédio das Tabelas 6, 7 e 8, retratam que os modelos se ajustam de modo satisfatório e eficaz aos dados experimentais acerca das variáveis em questão. Essa eficácia do modelo pode ser comprovada visto que o erro percentual entre o metamodelo e os dados experimentais associados à influência da carga vertical na resistência ao rolamento do pneu está em uma faixa aceitável, inferior a 1%, tornando o método construído seguro e confiável para essa finalidade de abordagem. O coeficiente de resistência ao rolamento do pneu pode ser obtido pela divisão entre a força de resistência ao rolamento, obtida por meio do metamodelo, e carga vertical aplicada no pneu. Pode-se verificar que as forças de resistência ao rolamento possuem valores entre 21,42 a 45,01 N; 21,42 a 45,02 N; e 29,28 a 55,71 N, para as Tabelas 6, 7 e 8, respectivamente.

De acordo com EJSMONT et al. (2016), a superfície DAC16r20 consiste em uma réplica de concreto asfáltico denso de 16 mm, sendo uma réplica laminada de poliéster feita de um DAC típico de 16 mm, com textura muito alta. Assim sendo, a superfície ISOr20 trata-se de uma réplica da superfície de referência ISO, sendo uma réplica de laminado de poliéster feita com base na superfície da pista de referência ISO 10844, com textura média. A superfície PERSr17, por sua vez, é uma superfície de pista poroelástica, sendo uma superfície porosa constituída à base de mineral, borracha e resina de poliuretano.

A Figura 22 retrata o comportamento da relação entre a carga vertical aplicada no pneu e a força de resistência ao rolamento do mesmo analisados em três casos de superfícies de solos diferentes, possuindo características relativas à irregularidades e texturas diferenciadas, por exemplo.

Figura 22: Metamodelo Linear da Influência da Carga Vertical na Resistência ao Rolamento: a) Solo DAC16r20; b) Solo ISOOr20; c) Solo PERSr17



Fonte: O autor

Pode-se observar por meio da Figura 22 que em todos os três casos abordados o comportamento da relação linear entre carga e resistência ao rolamento é crescente, sendo que essa força pode assumir valores máximos próximo a 50 e 60 N quando analisado o caso de carga vertical máxima no pneu, associada ao número de passageiros presentes no veículo. Diante da Figura 22, é possível observar que com o aumento da carga vertical aplicada no pneu, ocorre um aumento da força de resistência ao rolamento, uma vez que a região de contato na interface entre pneu e solo é ampliada, proporcionando um maior contato entre esses elementos, aumentando a força resistiva atuante nesse sistema.

6.1.4. Metamodelo da Velocidade Aplicado à Resistência ao Rolamento

Por fim, realizou-se a análise da influência do parâmetro velocidade na resistência ao rolamento do pneu. Para tal abordagem, realizou-se o desenvolvimento de um metamodelo não linear relacionando velocidade e força de resistência ao rolamento a fim de compreender melhor o sistema envolvendo essas variáveis de estudo, conforme apresentado na Tabela 9. Os dados

coletados relacionando velocidade e resistência ao rolamento foram obtidos considerando o pneu P205/60 R15 apresentado no trabalho desenvolvido por CHO et al. (2013).

Tabela 9: Metamodelo da Influência da Velocidade na Resistência ao Rolamento

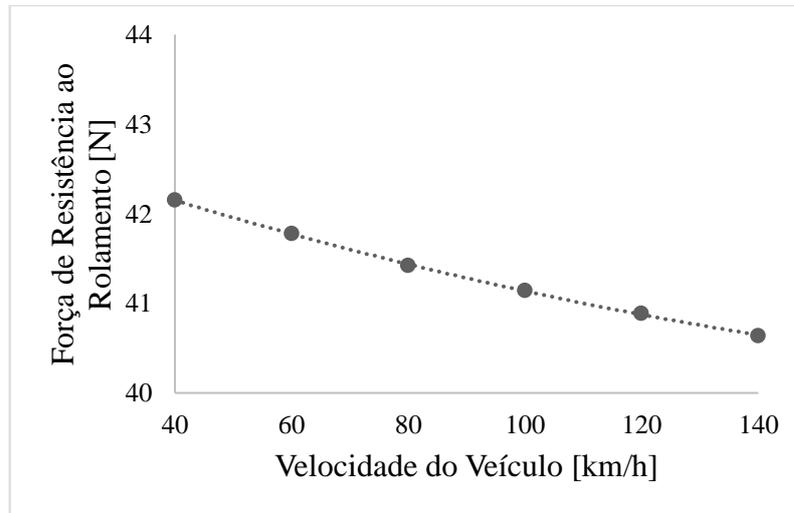
Velocidade do Veículo [km/h]	Velocidade do Veículo [m/s]	Força de Resistência ao Rolamento [N]	Metamodelo [N]	Erro [%]
40	11,11	42,15	42,14	0,01
60	16,67	41,78	41,77	-0,01
80	22,22	41,42	41,43	0,04
100	27,78	41,14	41,13	-0,01
120	33,33	40,89	40,87	-0,04
140	38,89	40,64	40,64	0,01

Fonte: O autor

Ao analisar a Tabela 9, é possível notar que o modelo se ajusta satisfatoriamente aos dados de testes experimentais, tornando o sistema desenvolvido seguro e eficaz ao contemplar esses fatores nessa determinada abordagem. Tal análise pode ser ratificada visto que o erro percentual associado ao metamodelo e os dados experimentais é bastante pequeno, sendo inferior a 0,04%, fazendo com que o modelo esteja bem ajustado às informações experimentais. Verifica-se ainda que a força de resistência ao rolamento apresenta maior interferência em baixas velocidades, sendo que ao aumentar a velocidade do veículo, essa força passa a reduzir, tendo uma variação entre 40,64 a 42,15 N, conforme observado pela Tabela 9.

O metamodelo desenvolvido a partir da Tabela 9 referente à influência do parâmetro da velocidade do veículo é representado pela Equação (5.4). De posse do metamodelo não linear de segunda ordem desenvolvido por meio da Tabela 9, realizou-se uma verificação mais detalhada do comportamento da influência da velocidade do automóvel na resistência ao rolamento do pneu, a fim de obter uma abordagem ilustrativa que possa retratar tal relação, conforme apresentado pela Figura 23.

Figura 23: Metamodelo Não Linear da Influência da Velocidade na Força de Resistência ao Rolamento



Fonte: O autor

Ao analisar a Figura 23 é possível observar que a relação entre velocidade do veículo e força de resistência ao rolamento do pneu é do tipo inversamente proporcional, uma vez que quanto mais rápido o automóvel se locomove, menor é a resistência ao rolamento do pneu. Sendo assim, o pneu terá um menor desgaste, ampliação de sua vida útil, além de garantir um menor consumo de combustível ao veículo, visto que uma das forças resistivas atuantes no sistema veicular assumirá um valor menor. Diante disso, nota-se que a força de resistência ao rolamento varia entre 40 a 43 N, considerando um intervalo de velocidade compreendido entre 40 a 140 km/h, assumindo um valor mínimo de resistência ao rolamento quando a velocidade máxima do domínio analisado é alcançada.

Assim sendo, a Tabela 10 apresenta os valores dos coeficientes dos metamodelos associados aos parâmetros de entrada do sistema.

Tabela 10: Valores dos Coeficientes dos Metamodelos

Índices	c_0	c_i	a_j	a_0
Temperatura	$2,4293 \times 10^{-2}$	$-1,8598 \times 10^{-3}$	$5,7657 \times 10^{-5}$	-
Pressão de Inflação	$5,1 \times 10^{-3}$	$-3,3333 \times 10^{-9}$	-	-
Carga Vertical	$-6,5213 \times 10^{-1}$	$8,3333 \times 10^{-3}$	-	-
Velocidade	$4,3009 \times 10^1$	$-8,41 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 10^{-4}$	-
Rigidez Lateral	-	-	$-1,1706 \times 10^{-1}$	$7,7818 \times 10^4$

Fonte: O autor

6.2. Análise da Quantificação de Incertezas dos Parâmetros de Entrada

De posse dos parâmetros de entrada, tais como temperatura ambiente, pressão de inflação do pneu, carga do veículo, velocidade do automóvel, deslizamento longitudinal e coeficiente de atrito de aderência foram elaborados histogramas a fim de identificar a variabilidade das incertezas associadas a essas variáveis.

O primeiro parâmetro analisado é referente à temperatura ambiente, no qual realizou-se uma pesquisa acerca de dados históricos de temperaturas máxima e mínima da cidade de São Paulo – SP (CLIMATEMPO, 2020), a fim de determinar o intervalo de variação desse parâmetro, sendo utilizado uma distribuição uniforme para contemplar essa análise aplicada no Método de Monte Carlo.

A pressão de inflação, por sua vez, foi determinada considerando que após um determinado valor de inflação máximo, essa pressão teria um comportamento relativo a um decaimento logarítmico ao decorrer do tempo e locomoção do pneu, sendo utilizado uma distribuição normal a partir desse valor máximo de pressão.

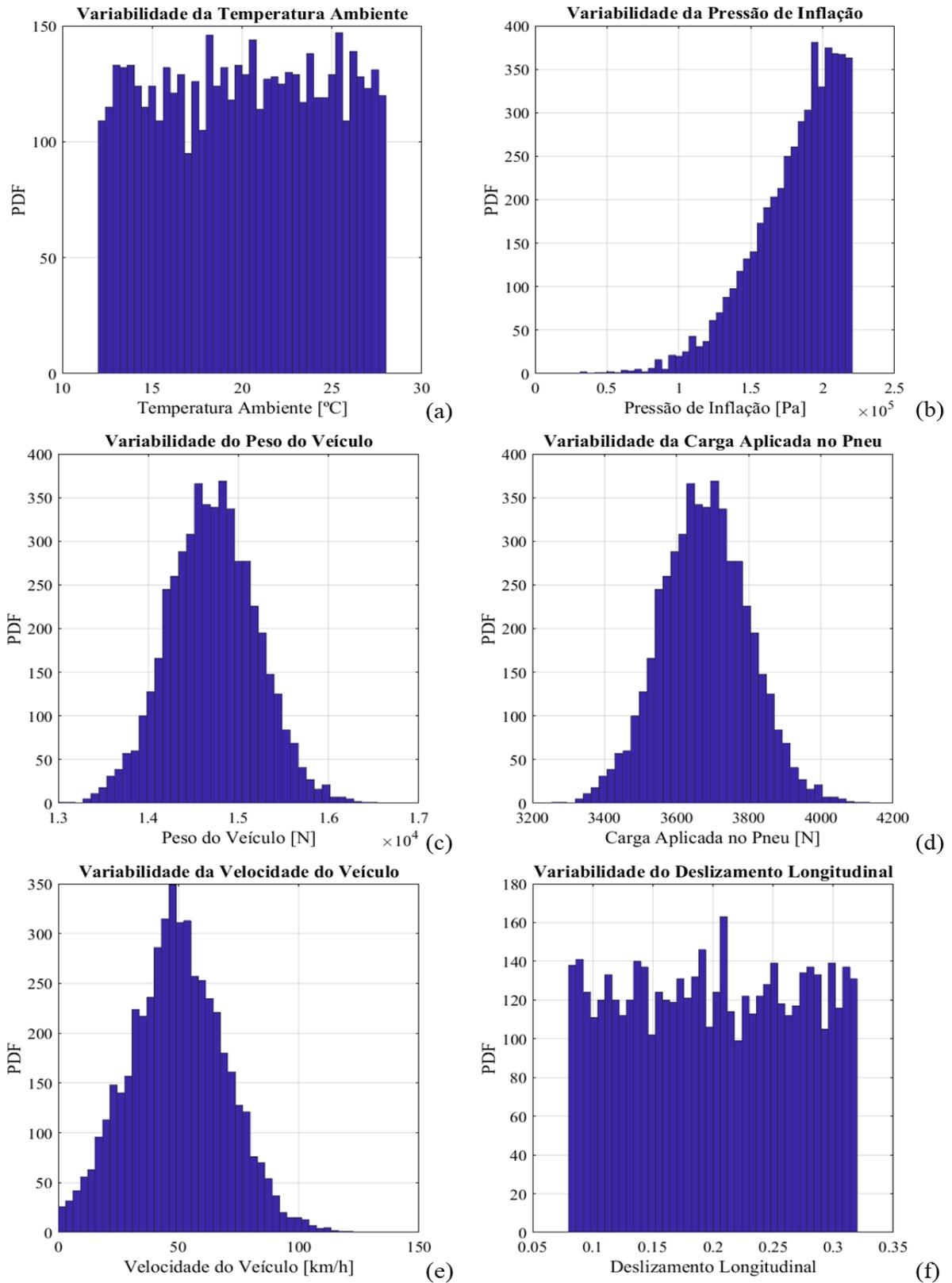
O parâmetro associado à carga do veículo está intimamente ligado ao número de passageiros presentes no automóvel, assim como o próprio peso do veículo em si, sendo, portanto, admitido um valor médio de peso do carro, considerando cenários em que o mesmo se encontre carregado ou vazio, utilizando uma distribuição normal para esse fator. Já a velocidade do veículo foi determinada considerando um valor médio, e conseqüentemente uma variação em torno desse valor, assumindo uma distribuição normal para análise de Monte Carlo.

O deslizamento longitudinal do pneu foi determinado a partir do intervalo de valores encontrado na literatura, dessa forma, por meio de uma distribuição uniforme contemplou-se esse intervalo de variação, considerando valores mínimo e máximo presentes nas literaturas estudadas ao longo do desenvolvimento do projeto.

Por fim, o parâmetro relativo ao coeficiente de atrito do solo foi determinado considerando pavimento do tipo asfalto em diferentes condições ambientais, isto é, em cenários de solo molhado e seco, além de um caso geral sobrepondo os dois casos mencionados (JAZAR, 2008), assumindo uma distribuição uniforme acerca desse parâmetro.

Desse modo, desenvolveu-se histogramas referentes a esses parâmetros a fim de observar e analisar a variabilidade dos mesmos por meio da função de densidade de probabilidade (PDF), conforme apresentados pelas Figuras 24 e 25.

Figura 24: Histogramas da Variabilidade dos Parâmetros: a) Temperatura Ambiente; b) Pressão de Inflação; c) Peso do Veículo; d) Carga Aplicada no Pneu; e) Velocidade do Veículo; f) Deslizamento Longitudinal

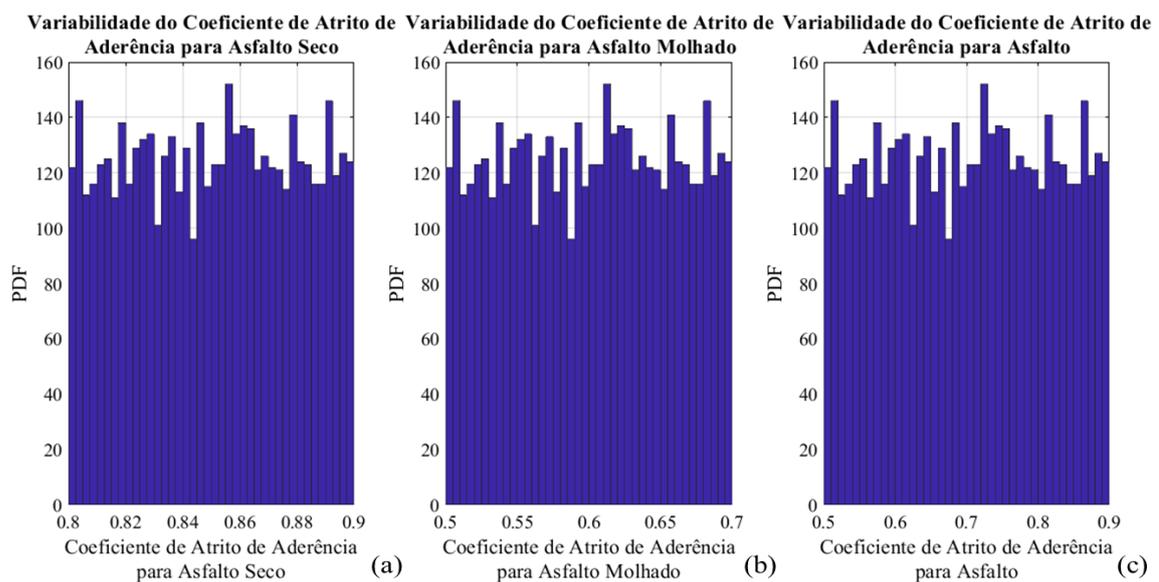


Fonte: O autor

Ao analisar a Figura 24 é possível verificar que a temperatura varia em um intervalo compreendido entre 12 a 28°C, conforme determinado pela função de distribuição adotada, após uma análise realizada pelo critério de Máxima Entropia. A pressão de inflação, por sua vez, assume valores considerados entre 0,10 e 0,25 MPa (14.50 e 36.26 psi), a partir da hipótese assumida de que o comportamento do pneu após inflado a um valor máximo, o mesmo teria um decaimento logarítmico ao longo do tempo de movimento, em virtude da perda de inflação.

Além disso, na Figura 24, o peso do veículo assume um valor considerado entre 13000 a 17000 N, ao passo que a carga aplicada em cada pneu possui valores aproximadamente entre 3200 a 4200 N, a partir do tipo de distribuição fixado. A velocidade do veículo, por sua vez, está variando até valores próximos a 150 km/h, sendo considerado na hipótese que o automóvel se locomoveria nessa faixa de velocidade, conforme a sua distribuição. Por fim, o deslizamento longitudinal está compreendido entre 0,08 a 0,32, conforme as literaturas analisadas ao longo do projeto.

Figura 25: Histogramas dos Coeficientes de Atrito de Aderência: a) Asfalto Seco; b) Asfalto Molhado; c) Asfalto Geral



Fonte: O autor

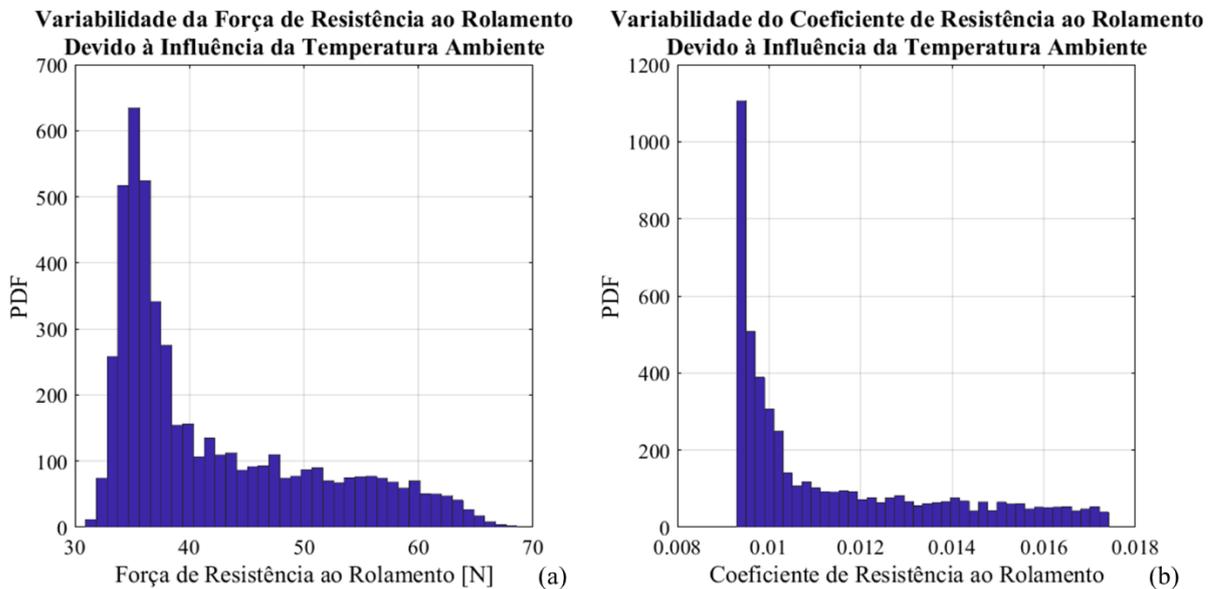
De posse da Figura 25, é possível notar a distribuição uniforme do coeficiente de atrito de aderência para distintas condições de superfície de asfalto, sendo elas para cenários de solos seco, molhado e uma análise geral sobrepondo os efeitos dos dois casos anteriores. Desta forma, é possível analisar como esse coeficiente impacta no comportamento dinâmico de um veículo, tendo seu intervalo de variação compreendido, em seu caso geral, entre 0,5 e 0,9, conforme Figura 25 c).

6.3. Efeitos da Temperatura Ambiente na Resistência ao Rolamento

Posteriormente ao analisar os aspectos de variabilidade associados às incertezas dos parâmetros de entrada do sistema em questão, analisou-se como tais fatores impactam na resistência ao rolamento dos pneus, sendo realizada uma abordagem detalhada para cada parâmetro determinado. Foram analisados os seguintes parâmetros: temperatura ambiente, pressão de inflação, carga e velocidade, utilizando como ferramentas matemáticas o Método de Monte Carlo e os metamodelos desenvolvidos que melhores se ajustaram as funções interpoladoras, conforme analisado anteriormente.

A primeira análise realizada foi referente à resistência ao rolamento do pneu devido à influência da temperatura ambiente, sendo representada pelos histogramas conforme a Figura 26.

Figura 26: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Temperatura: a) Força; b) Coeficiente



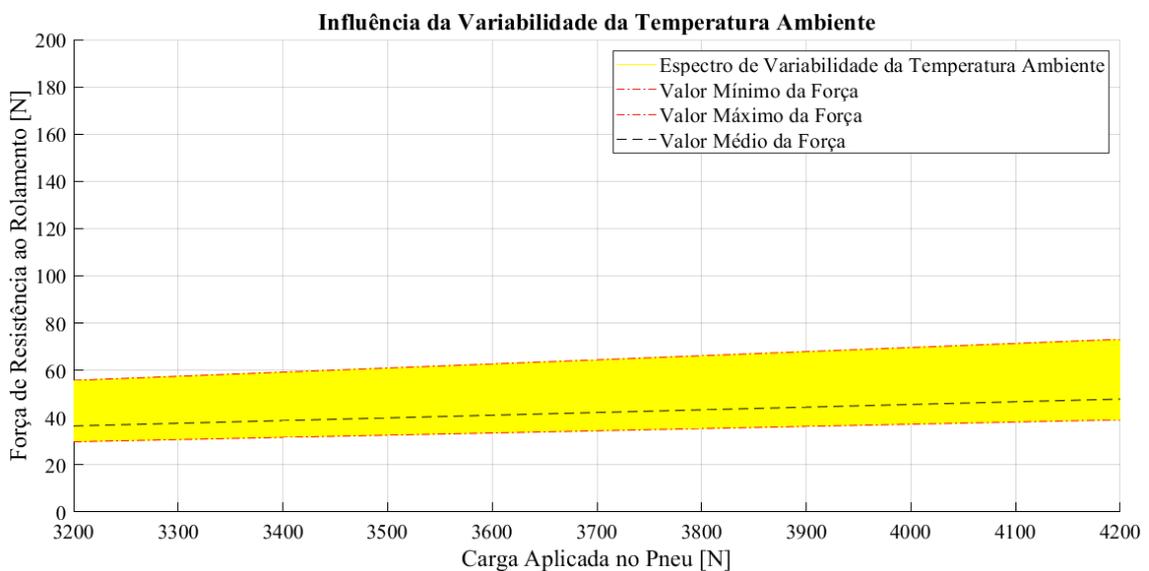
Fonte: O autor

O comportamento dos histogramas se deve ao fato de que tanto o coeficiente quanto a força de resistência ao rolamento são funções da variável randômica da temperatura ambiente, a qual possui uma distribuição uniforme. Além de que a mesma está presente na formulação como potências, contribuindo para que a álgebra de variáveis aleatórias mude o formato característico da função densidade de probabilidade de resposta, conforme a Equação (5.1). É importante salientar que a força de resistência ao rolamento está compreendida entre 30 a 70 N, tendo seu respectivo coeficiente variando entre valores próximos a 0,008 a 0,018.

As assimetrias dos histogramas apresentados pela Figura 26 deve-se ao fato do resultado do histograma ser intrinsecamente obtido pela modelagem de Monte Carlo, na qual os parâmetros de entrada tiveram distribuições probabilísticas distintas e, no momento da realização da álgebra com variáveis randômicas, resultou em um gráfico de dispersão com este formato assimétrico (SHEWHART, WILKS, 1979).

A Figura 27 apresenta a influência da variabilidade da temperatura ambiente na força de resistência ao rolamento do pneu, identificada a partir da construção de um gráfico de influência que denota um espectro de variabilidade, representado pela cor amarela.

Figura 27: Influência da Variabilidade da Temperatura Ambiente na Força de Resistência ao Rolamento do Pneu



Fonte: O autor

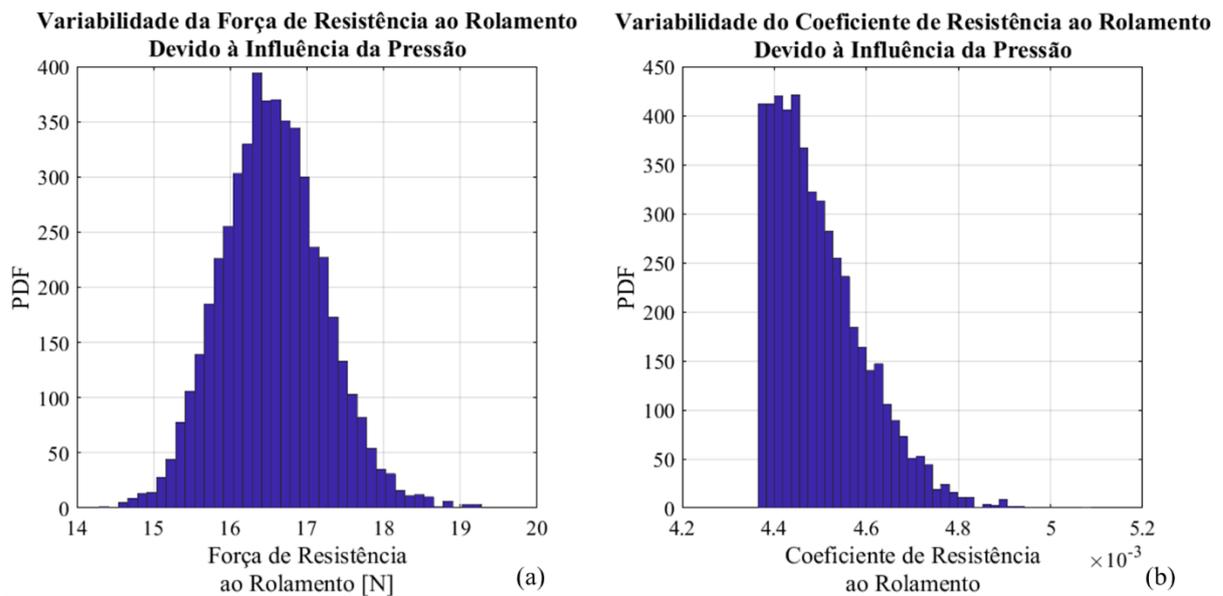
De acordo com a Figura 27 é possível observar que o efeito da variabilidade da temperatura ambiente afeta drasticamente a relação entre força de resistência ao rolamento por carga no pneu, sendo possível notar uma grande variação entre os valores médio e máximo associados a sua força de resistência, enquanto apresenta uma menor variação entre os valores médio e mínimo da mesma. É possível identificar que ao aumentar a quantidade de passageiros do veículo, a região de variabilidade da temperatura cresce proporcionalmente, influenciando de forma mais forte a relação tratada em questão, podendo alcançar valores máximos próximos a 80 N associados à resistência ao rolamento. Nota-se que para valores de carga iguais a 3800 N, a sua respectiva força de resistência ao rolamento varia da ordem de 40 a 60 N.

6.4. Efeitos da Pressão de Inflação na Resistência ao Rolamento

Para o parâmetro de pressão de inflação do pneu fez-se um processo análogo ao realizado para a temperatura ambiente, obtendo histogramas referentes à resistência ao rolamento, conforme representado na Figura 28. O estilo de formato do histograma obtido está diretamente associado aos seus respectivos parâmetros constituintes, uma vez que, hipóteses como decaimento logarítmico está sendo considerado.

Figura 28: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Pressão:

a) Força; b) Coeficiente

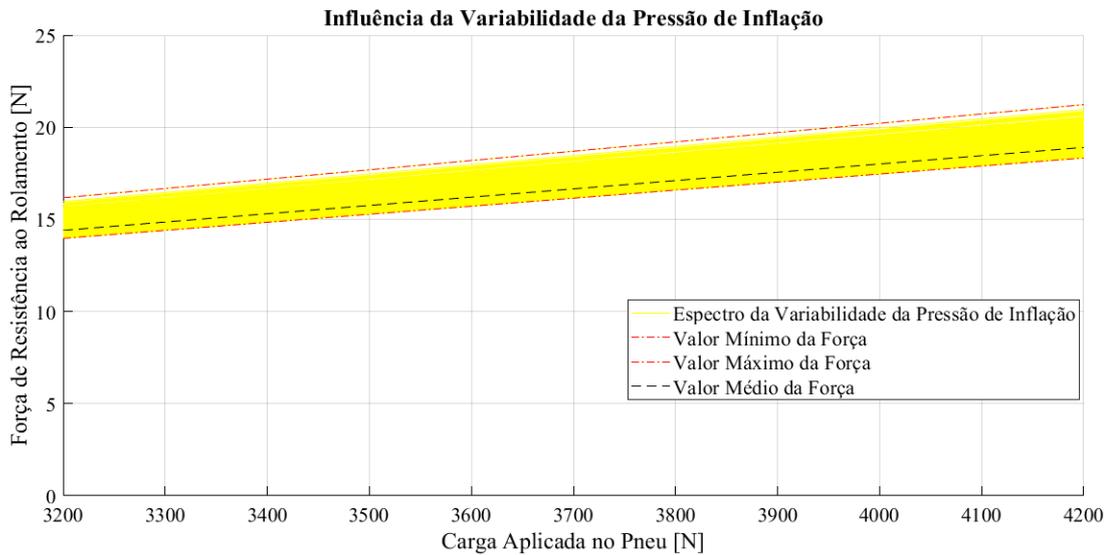


Fonte: O autor

O estilo de histograma obtido, conforme a Figura 28, está diretamente associado aos seus respectivos parâmetros constituintes, sendo que essa pressão aparece em fatores multiplicativos, conforme a Equação (5.2), acarretando em intervalos para força de resistência ao rolamento entre 14 a 20 N, tendo, por consequência coeficiente associado entre 0,0042 a 0,0052.

A partir da obtenção dos histogramas relativos à influência da pressão, elaborou-se o desenvolvimento de um gráfico de influência, relacionando força de resistência ao rolamento pela carga aplicada no pneu a fim de verificar a influência da variabilidade da pressão de inflação nessa força em questão, conforme apresentado pela Figura 29. É importante ressaltar que o espectro de variabilidade da influência da pressão de inflação sobre a força de resistência ao rolamento, representado pela cor amarela, permite quantificar o quanto essa variabilidade é capaz de impactar na força, isto é, o quanto esse parâmetro influencia na força.

Figura 29: Influência da Variabilidade da Pressão de Inflação na Força de Resistência ao Rolamento do Pneu



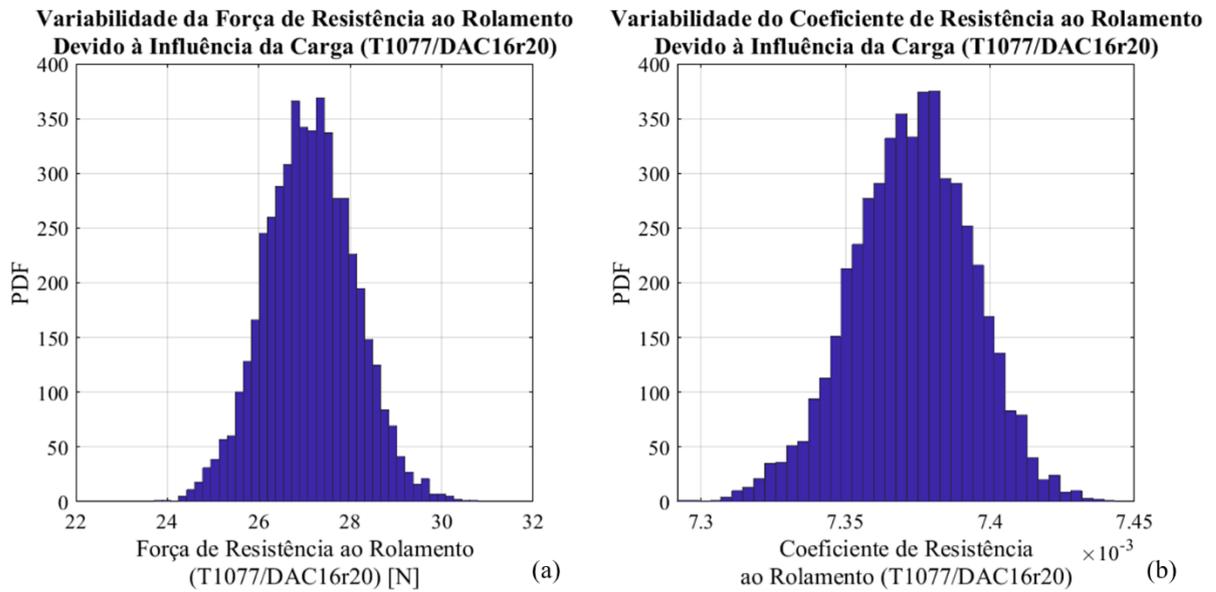
Fonte: O autor

Observa-se que o efeito da variabilidade da pressão de inflação do pneu veicular pode afetar tal relação entre força por carga, em aproximadamente 4% referente aos valores mínimo e médio, e em cerca de 10% comparando os valores máximo e médio, obtendo um valor máximo superior a 20 N, quando se tem o cenário de maior caso de carga aplicada no pneu do domínio analisado. Além disso, é possível notar que essa força possui uma sensibilidade praticamente constante referente à pressão de inflação na faixa de carga aplicada no pneu analisada em questão.

6.5. Efeitos da Carga Vertical na Resistência ao Rolamento

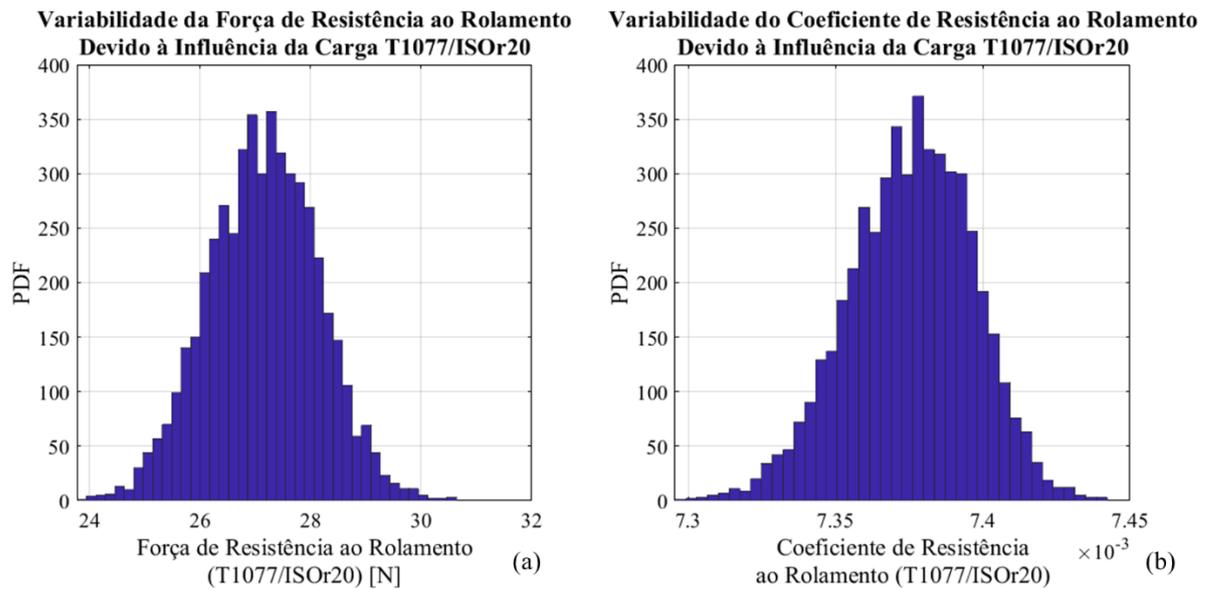
Ao analisar o comportamento da variabilidade da resistência ao rolamento do pneu devido à influência da carga aplicada no mesmo, a qual está associada diretamente com a quantidade de passageiros no veículo, realizou-se o estudo da influência da carga vertical em três diferentes tipos de superfícies de solos, a fim de verificar a influência do número de passageiros e as diversas condições de solos com a resistência ao rolamento do pneu automotivo. Para tal abordagem, foram elaborados histogramas referentes à resistência ao rolamento para as três superfícies de estrada, conforme as Figuras 30, 31 e 32, obtidos por meio da Equação (5.3).

Figura 30: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Carga na Superfície DAC16r20: a) Força; b) Coeficiente



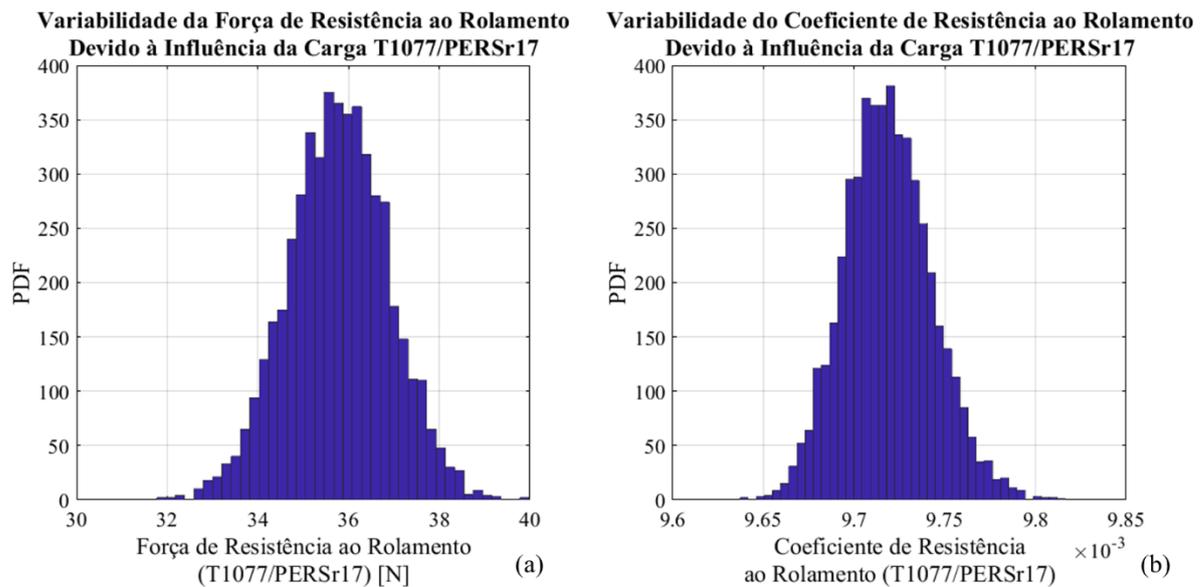
Fonte: O autor

Figura 31: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Carga na Superfície ISOr20: a) Força; b) Coeficiente



Fonte: O autor

Figura 32: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Carga na Superfície PERSr17: a) Força; b) Coeficiente

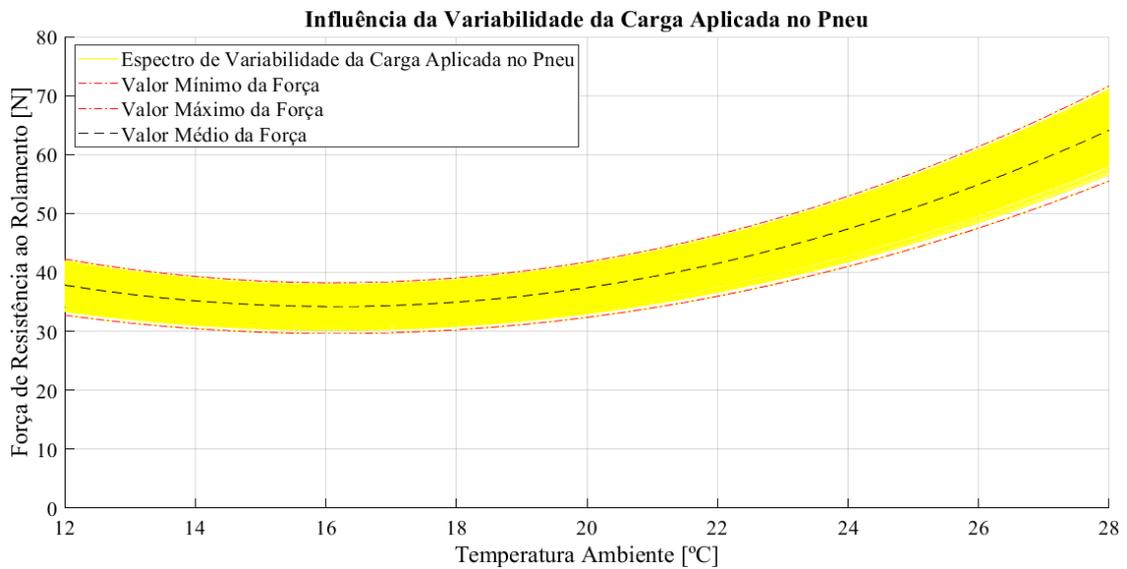


Fonte: O autor

As características dos histogramas relacionados à carga estão intrínsecas à quantidade de ocupantes no veículo em questão, sendo realizada uma hipótese de que o automóvel poderia variar seu peso à medida que aumentasse ou diminuísse a quantidade de passageiros. É possível observar que os histogramas referentes aos solos DA16r20 e ISOr20 apresentam semelhanças no comportamento referente aos valores de força e coeficiente de resistência ao rolamento, com valores de força entre 22 a 32 N, e conseqüentemente, os seus respectivos coeficientes entre $7,3 \times 10^{-3}$ a $7,45 \times 10^{-3}$. No entanto para o caso do solo PERSr17, já há um grande aumento dessa força, variando entre 30 a 40 N e, conseqüentemente um aumento do seu respectivo coeficiente, variando entre $9,6 \times 10^{-3}$ a $9,85 \times 10^{-3}$. Desse modo, tal fenômeno pode estar relacionado com as irregularidades e texturas de cada tipo de solo, sendo representado pelo parâmetro de coeficiente de atrito da pista.

Posteriormente à criação dos histogramas em questão, realizou-se uma análise minuciosa da influência da variabilidade da carga no veículo, atrelada à quantidade de passageiros presentes no mesmo, na força e no coeficiente de resistência ao rolamento do pneu em questão. Tal abordagem foi realizada de modo que pudesse realizar uma verificação do efeito da variabilidade do carregamento do número de passageiros no veículo afetando a relação entre a resistência ao rolamento por temperatura ambiente, pressão de inflação e velocidade do automóvel, conforme apresentado nas Figuras 33, 34 e 35, respectivamente.

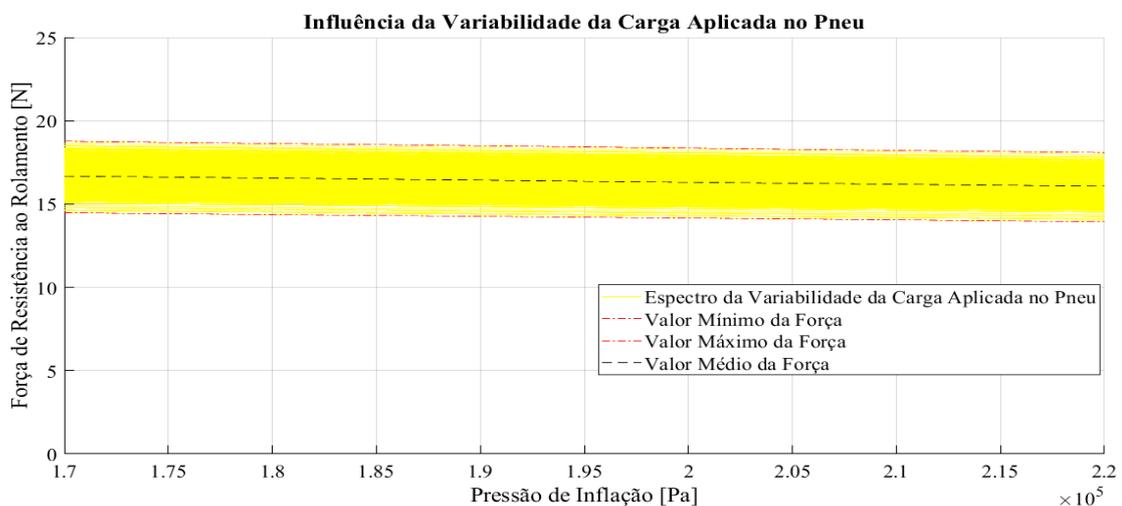
Figura 33: Influência da Variabilidade da Carga na Relação Força de Resistência ao Rolamento por Temperatura Ambiente



Fonte: O autor

Ao analisar a Figura 33, é possível observar que o efeito da variabilidade do carregamento do número de ocupantes no veículo afeta drasticamente a relação entre a força de resistência ao rolamento por temperatura ambiente, sendo possível verificar uma variação de aproximadamente 10% para mais ou para menos em sua força de resistência. Além disso, pode-se verificar que há um aumento proporcional dessa força ao longo do domínio da temperatura ambiente, assumindo um valor máximo próximo a 70 N quando a temperatura máxima de 28°C do domínio em questão é alcançada.

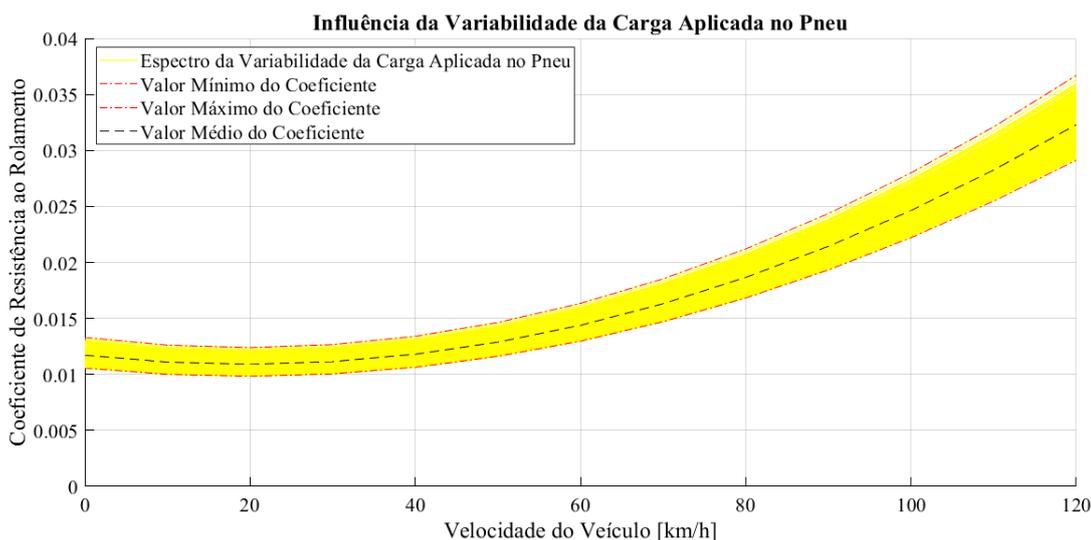
Figura 34: Influência da Variabilidade da Carga na Relação Força de Resistência ao Rolamento por Pressão de Inflação



Fonte: O autor

Analisando a Figura 34, é possível inferir que a influência da variabilidade na carga analisada do veículo afeta fortemente a relação proposta entre resistência ao rolamento por pressão de inflação do pneu, tendo uma variação de cerca de 10% para cima ou para baixo em sua força, análogo ao primeiro caso abordado. Nesse caso, com o aumento da pressão de inflação nota-se uma diminuição da força de resistência ao rolamento, essa variando em um intervalo entre 15 a 20 N.

Figura 35: Influência da Variabilidade da Carga na Relação Coeficiente de Resistência ao Rolamento por Velocidade do Veículo



Fonte: O autor

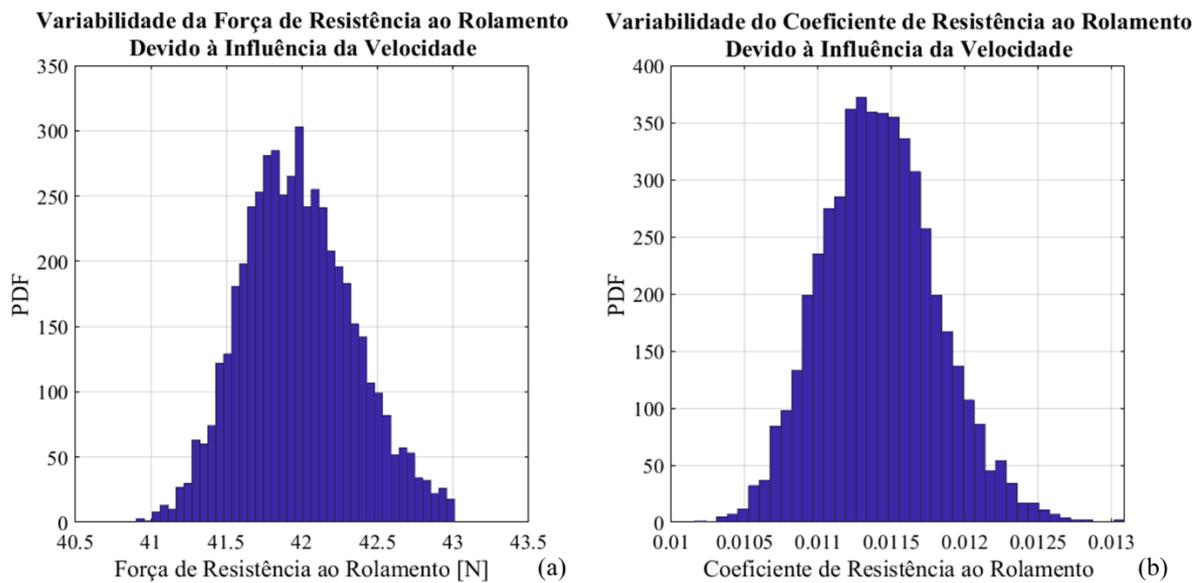
Por fim, na Figura 35, pode-se observar novamente a influência da quantidade de ocupantes do veículo na resistência ao rolamento do pneu, totalizando uma variação de aproximadamente 15% dos valores máximo e mínimo comparados ao valor médio do coeficiente. É importante salientar que com o aumento da velocidade do veículo, ocorre uma ampliação do espectro de variabilidade associado a carga vertical, sendo mais pronunciada em velocidades mais elevadas, garantindo, assim, uma maior sensibilidade do coeficiente de resistência ao rolamento em relação a esse parâmetro. Nota-se que ao alcançar a velocidade referente a 120 km/h, o respectivo coeficiente de resistência ao rolamento possui uma variação da ordem de 0,03 a 0,037.

Dessa forma, pode-se notar que nas Figuras 33 e 35 existem regiões que apresentam maiores sensibilidades da resistência associadas as variabilidades de carga, tendo locais com variação da espessura do espectro de variabilidade dessa componente resistiva. Na Figura 34, por sua vez, esse espectro se mantém razoavelmente constante durante todo o domínio de pressão de inflação analisado.

6.6. Efeitos da Velocidade na Resistência ao Rolamento

Posteriormente, realizou-se uma abordagem a respeito da influência da variabilidade da velocidade do veículo na resistência ao rolamento do pneu, sendo representada pela Figura 36, conforme Equação (5.4). Sendo que o intervalo de variabilidade relacionado à incerteza da variável velocidade foi determinado, assumindo as hipóteses já mencionadas acerca do parâmetro de velocidade do automóvel.

Figura 36: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Influência da Velocidade do Automóvel: a) Força; b) Coeficiente

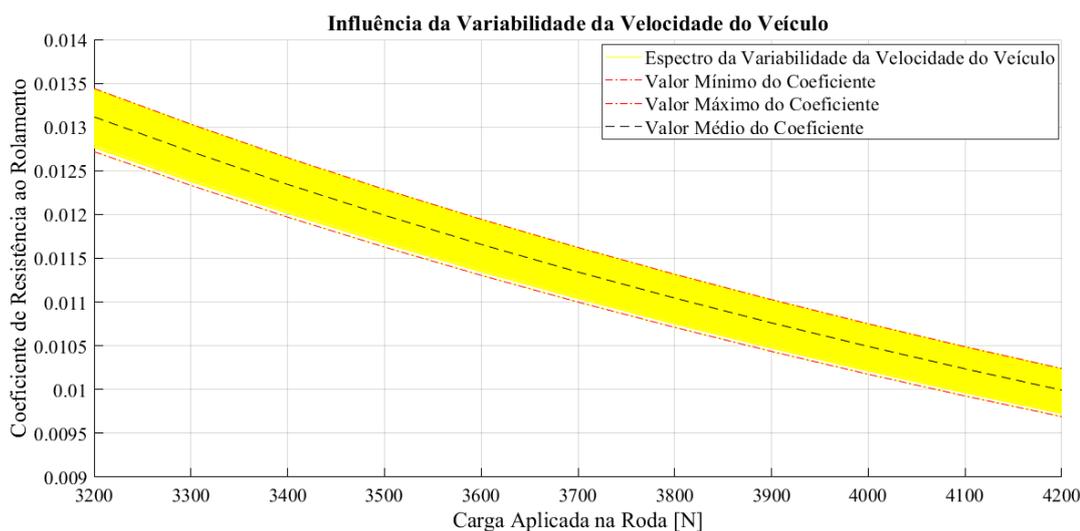


Fonte: O autor

Ao analisar a Figura 36, é possível observar o intervalo entre 40,5 a 43,5 N, no qual está compreendida a força de resistência ao rolamento devido à influência da velocidade, de modo que seu respectivo coeficiente está compreendido entre 0,01 e 0,013.

A partir dos histogramas construídos sobre a influência dos aspectos de variabilidade da velocidade, fez-se uma abordagem mais refinada sobre tal situação, a fim de quantificar e verificar a influência da variabilidade da velocidade do automóvel no coeficiente de resistência ao rolamento, sendo representada por um espectro na cor amarela, conforme apresentada na Figura 37.

Figura 37: Influência da Variabilidade da Velocidade no Coeficiente de Resistência ao Rolamento



Fonte: O autor

Ao observar o efeito da variabilidade da velocidade do veículo, pode-se inferir que tal parâmetro afeta a relação entre coeficiente de resistência ao rolamento por carga aplicada no pneu, notando uma variação de aproximadamente 2% para mais ou para menos em seu coeficiente de resistência ao rolamento. É possível notar que no caso de carga máxima aplicada na roda, o coeficiente de resistência ao rolamento situa-se entre 0,0097 a 0,0103.

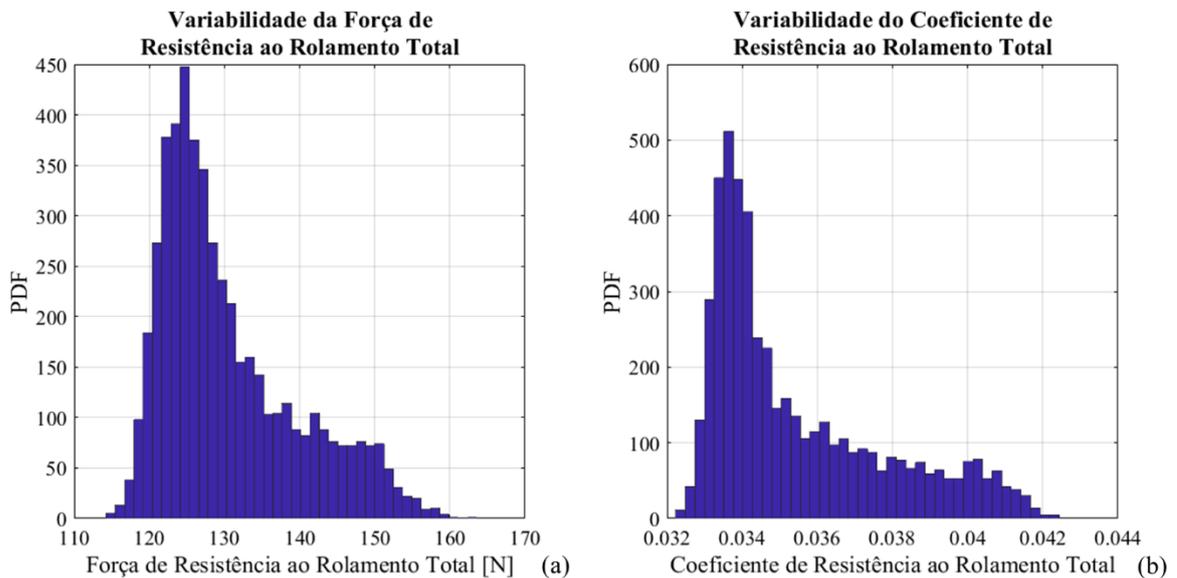
6.7. Efeitos Gerais dos Parâmetros na Resistência ao Rolamento

Com a análise de cada caso realizado, decidiu-se analisar o comportamento da resistência ao rolamento por meio da sobreposição de efeitos dos parâmetros de entrada, isto é, uma abordagem da resistência ao rolamento total, considerando os efeitos relativos aos fatores de temperatura ambiente, pressão de inflação, carga vertical e velocidade do veículo.

É importante salientar que para a composição do cálculo da resistência ao rolamento total do pneu, por meio da sobreposição dos efeitos de todos os parâmetros analisados anteriormente, fez-se uma consideração de fator híbrido para o caso da carga vertical, uma vez que esse cenário havia três tipos distintos de pavimentos, conforme a Equação (5.5). Sendo que RRC_{Total} , RRC_{Temp} , $RRC_{Pressão}$, $RRC_{Carga,i}$ e RRC_{Veloc} referem-se aos coeficientes de resistência ao rolamento devido à influência da sobreposição dos efeitos, da temperatura, pressão, dos diferentes tipos de solos (DAC16r20, ISO r20 e PERSr17) e velocidade, respectivamente. Tais parâmetros foram obtidos por meio dos metamodelos desenvolvidos, por meio de dados experimentais coletados.

A partir da Equação (5.5), a qual é constituída pela sobreposição de todos os casos analisados separadamente, construiu-se histogramas referentes à força e ao coeficiente de resistência ao rolamento totais, a fim de analisar a modificação desses parâmetros em uma análise completa de todos os parâmetros, conforme apresentada pela Figura 38.

Figura 38: Histogramas da Variabilidade da Resistência ao Rolamento Devido à Sobreposição de Efeitos dos Parâmetros



Fonte: O autor

Ao analisar os histogramas referentes à força e ao coeficiente de resistência ao rolamento totais, é possível notar que ocorrem aumentos em ambos, na qual a força assume valores entre 110 a 170 N, enquanto o seu respectivo coeficiente, entre 0,032 a 0,044. Tal processo pode ser explicado por meio da influência do efeito de sobreposição dos parâmetros, tornando tal análise de grande interesse ao compreender como tais fatores são capazes de interferir no comportamento dinâmico do veículo.

6.8. Análise da Quantificação de Incertezas na Dinâmica Veicular

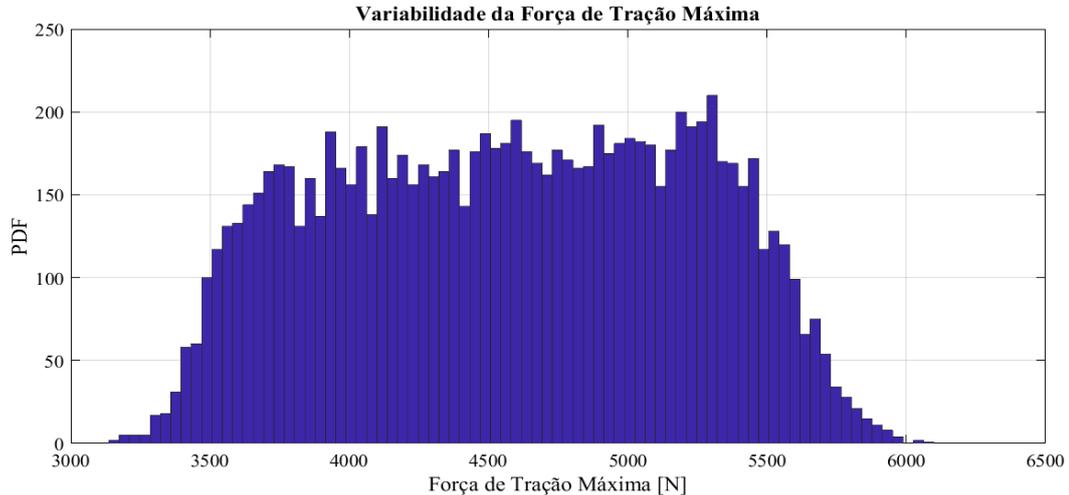
Posteriormente ao realizar uma análise detalhada sobre resistência ao rolamento dos pneus mediante a aplicação da variabilidade em seus principais fatores de influência, tais como temperatura ambiente, pressão de inflação, quantidade de passageiros e velocidade do veículo, fez-se uma abordagem a respeito da dinâmica veicular, contemplando, de modo mais específico, as forças atuantes nas áreas da dinâmica longitudinal e lateral.

6.8.1. Análise da Quantificação de Incertezas na Força Máxima de Tração

Para uma primeira análise, realizou-se um estudo da força máxima de tração para o veículo, utilizando os dados obtidos por meio das análises dos metamodelos desenvolvidos a fim de analisar tal comportamento veicular. Desse modo, a primeira análise realizada baseou-se na força de tração máxima do veículo, mediante aos fatores de variabilidades dos seus parâmetros, bem como peso do veículo, coeficiente de atrito de aderência e o coeficiente de resistência ao rolamento total do pneu, esse último advindo da sobreposição dos efeitos dos parâmetros abordados, conforme a Equação (5.7).

Nessa abordagem da dinâmica longitudinal considerou-se o fato de que o coeficiente de resistência ao rolamento esteja sendo multiplicado por um determinado fator escalar a fim de contemplar os quatro pneus do automóvel, visto que o seu valor é referente a apenas um único pneu automotivo. A partir da Equação (5.7) obteve-se o histograma associado à variabilidade da força de tração máxima relativo às incertezas intrínsecas de seus parâmetros constituintes, conforme apresentado pela Figura 39.

Figura 39: Histograma da Variabilidade da Força de Tração Máxima



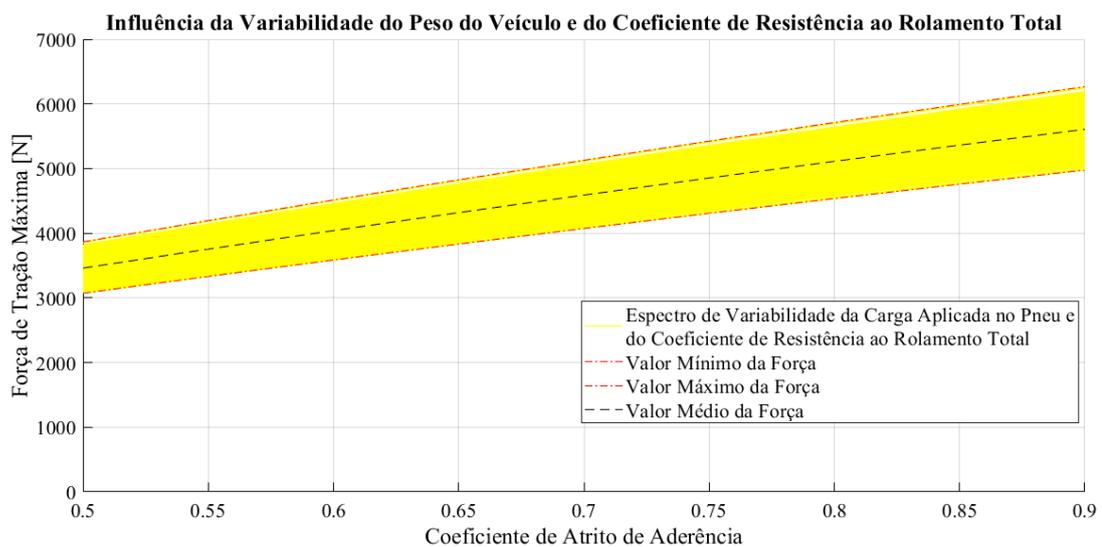
Fonte: O autor

Conforme pode ser observado na forma do histograma apresentado pela Figura 39, essa característica do seu formato e a sua função densidade de probabilidade possui uma configuração não convencional. Tal comportamento ocorre devido ao fato do resultado do histograma ser intrinsecamente obtido pela modelagem de Monte Carlo, na qual os parâmetros de entrada tiveram distribuições probabilísticas distintas e, no momento da realização da álgebra com variáveis randômicas, resultou em um gráfico de dispersão com este formato (SHEWHART, WILKS, 1979).

Ao analisar a Figura 39, é possível identificar a variação dessa força de tração máxima, a qual está relacionada com a *performance* longitudinal do veículo em questões relativas à força trativa, dentro do intervalo entre 3000 a 6500 N.

A fim de verificar a influência dos parâmetros na força de tração máxima do veículo, elaborou-se a construção de um gráfico de influência, relacionando essa força com o parâmetro de coeficiente de atrito de aderência, conforme a Figura 40. É importante mencionar que o espectro de variabilidade do peso do veículo, assim como o coeficiente de resistência ao rolamento, contemplando a sobreposição dos efeitos, está representado pela cor amarela.

Figura 40: Influência da Variabilidade do Peso do Veículo e do Coeficiente de Resistência ao Rolamento Total na Relação Força de Tração Máxima e Coeficiente de Atrito



Fonte: O autor

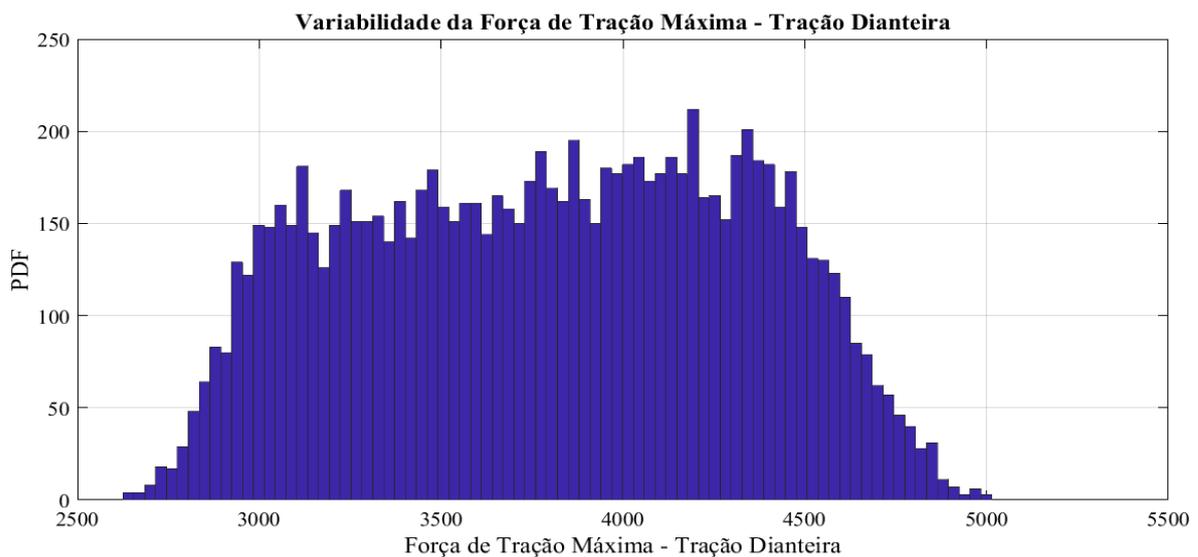
Analisando a Figura 40, é possível notar a influência da variabilidade do peso do veículo e do coeficiente de resistência ao rolamento total, sendo fatores de grande influência na relação força de tração máxima por coeficiente de atrito de aderência, tendo uma variação de aproximadamente 15% para cima ou para baixo, influenciando drasticamente nessa relação abordada. Além disso, verifica-se que com o aumento do coeficiente de atrito de aderência da pista, associado à textura e irregularidades do solo, ocorre um aumento proporcional desse espectro de variabilidade, sendo que a força máxima de tração assume um valor máximo entre 6000 a 7000 N, quando o coeficiente de atrito no domínio analisado é máximo. É possível notar ainda que a sensibilidade dessa força associada a esses parâmetros aumenta ao longo do coeficiente de atrito de aderência do solo, isto é, a força torna-se mais sensível a esses parâmetros em valores elevados do domínio do coeficiente de atrito de aderência.

6.8.2. Análise da Quantificação de Incertezas na Força Tração em Veículos de Tração Dianteira

Posteriormente a essa primeira análise de força longitudinal desenvolvida, procurou-se analisar o comportamento dinâmico de um veículo com tração dianteira em uma situação de pista inclinada, sendo considerados alguns dos parâmetros dimensionais do veículo, conforme representado pela Equação (5.8).

Devido ao fato de ser considerado um automóvel com tração dianteira, o coeficiente de resistência ao rolamento total foi aplicado em um somatório variando até 2, uma vez que os pneus dianteiros sofrerão um maior impacto e desgaste nesse cenário de análise. Em consequência da Equação (5.8), construiu-se um histograma referente à força de tração máxima de veículos com tração dianteira, a fim de observar os aspectos de variabilidades dos parâmetros constituintes da formulação matemática dessa força de tração para veículos com tração dianteira, conforme a Figura 41.

Figura 41: Histograma da Variabilidade da Força de Tração Máxima em Veículos com Tração Dianteira



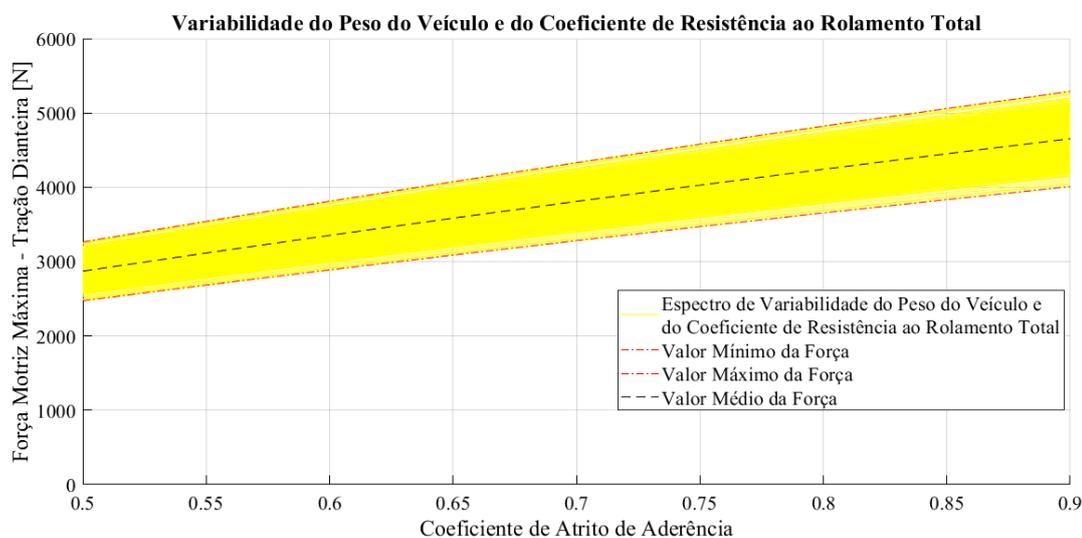
Fonte: O autor

Conforme pode ser analisado a forma do histograma apresentado pela Figura 41, essa característica do seu formato e a sua função densidade de probabilidade também possui uma configuração não convencional. Tal comportamento ocorre devido aos fatores análogos explicados para o caso da Figura 39, relacionando às questões intrínsecas do histograma obtido pela simulação de Monte Carlo, resultando em um gráfico de dispersão com este formato (SHEWHART, WILKS, 1979).

Ao analisar a Figura 41, pode-se observar que a força de tração máxima referentes a veículos com tração dianteira, a qual é a mais comum em veículos de passeio, está compreendida em um intervalo entre 2500 a 5500 N.

A fim de obter uma análise mais detalhada acerca da influência da variabilidade dos parâmetros relacionada à essa força de tração, desenvolveu-se um gráfico no qual é possível verificar e compreender a influência da variabilidade do peso do veículo e do coeficiente de resistência ao rolamento total do pneu na relação força de tração máxima em automóveis com tração dianteira por coeficiente de atrito de aderência, conforme representado pela Figura 42.

Figura 42: Influência da Variabilidade do Peso do Veículo e do Coeficiente de Resistência ao Rolamento Total na Relação Força de Tração Máxima em Automóveis com Tração Dianteira e Coeficiente de Atrito de Aderência



Fonte: O autor

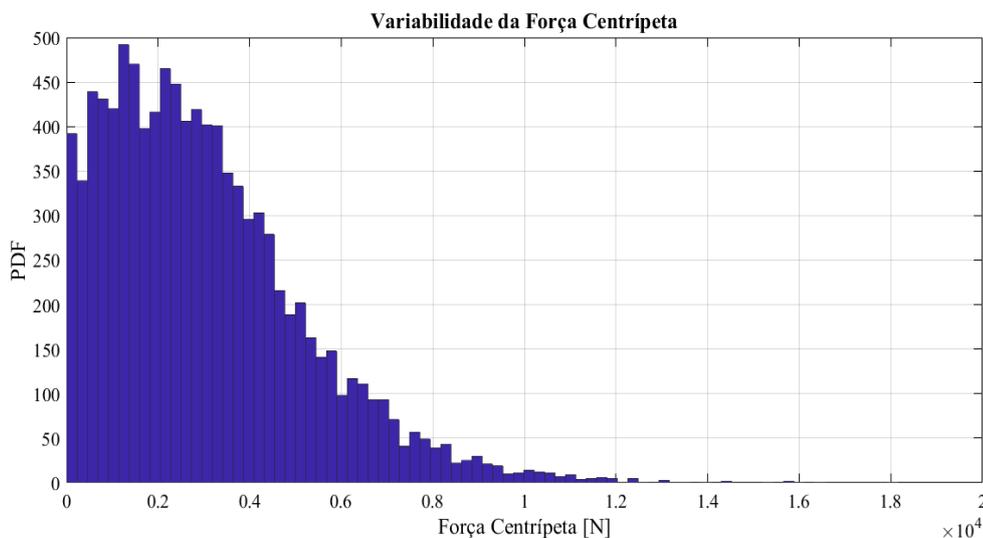
É possível observar que a influência da variabilidade do peso do veículo, associado diretamente ao número de passageiros presentes no veículo, e o coeficiente de resistência ao rolamento total afetam drasticamente essa relação entre força de tração máxima e coeficiente de atrito de aderência, tendo uma variação entre 10% a 15% referente ao valor médio dessa força. Além disso, nota-se que o valor máximo dessa força analisada em questão pode alcançar valores entre 5000 a 6000 N, quando o coeficiente de atrito de aderência está no seu máximo valor do domínio abordado nessa análise. É importante mencionar que a sensibilidade dessa força referente ao número de passageiros do automóvel e o coeficiente de resistência ao rolamento aumenta ao longo do crescimento do valor do coeficiente de atrito, tornando-se mais sensível quando esse coeficiente de aderência assume um valor de 0,9 no domínio de estudo abordado.

6.8.3. Análise da Quantificação de Incertezas na Força Centrípeta

A análise da dinâmica lateral foi embasada nas forças centrípeta e lateral do veículo, a fim de verificar como a variabilidade dos parâmetros estocásticos influenciam na *performance* lateral do veículo. Desse modo, a primeira abordagem realizada foi referente à força centrípeta, representada pela Equação (5.9).

A partir da Equação (5.9) construiu-se um histograma da mesma para que seja possível compreender a influência da variabilidade dos parâmetros de entrada em relação à força centrípeta, conforme a Figura 43.

Figura 43: Histograma da Variabilidade da Força Centrípeta Devido às Influências da Massa e da Velocidade do Veículo

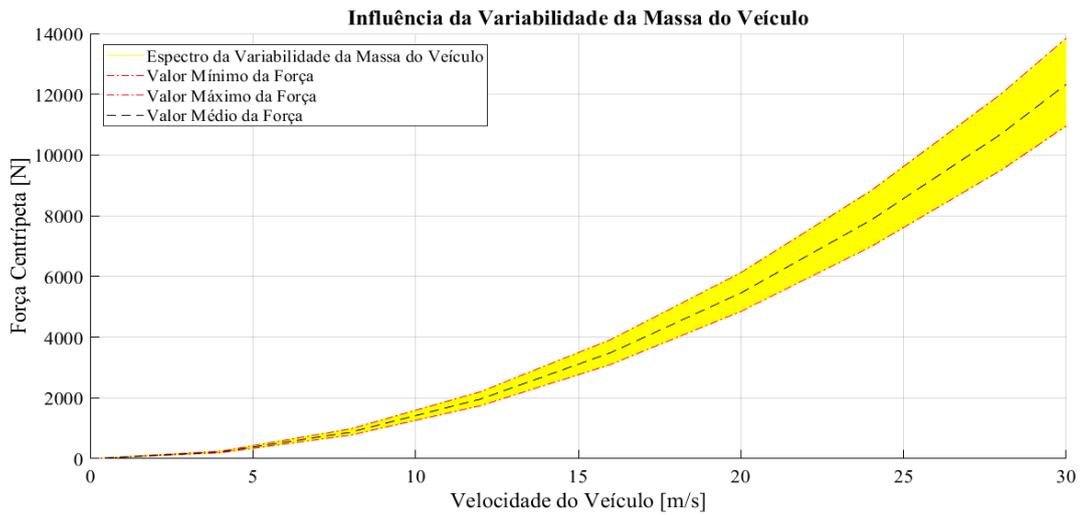


Fonte: O autor

Analisando a Figura 43, pode-se observar que a força centrípeta é contemplada dentro de um intervalo de domínio com valor máximo de 20 kN, a partir dos seus parâmetros pré-determinados na simulação de Monte Carlo.

De posse da obtenção do histograma referente à variabilidade da força centrípeta e com o propósito de realizar uma abordagem mais detalhada sobre a influência da variabilidade de cada parâmetro constituinte da Equação (5.9), realizou-se um estudo sobre a interferência de tais parâmetros no comportamento dinâmico lateral do automóvel, conforme apresentado nas Figuras 44 e 45. Vale ressaltar que a influência de variabilidade de cada parâmetro é representada pelo espectro de variabilidade, representado pela faixa de cor amarela, sendo que no caso da Figura 45 considerou-se apenas os valores mínimos, médio e máximo para uma melhor visualização da mesma.

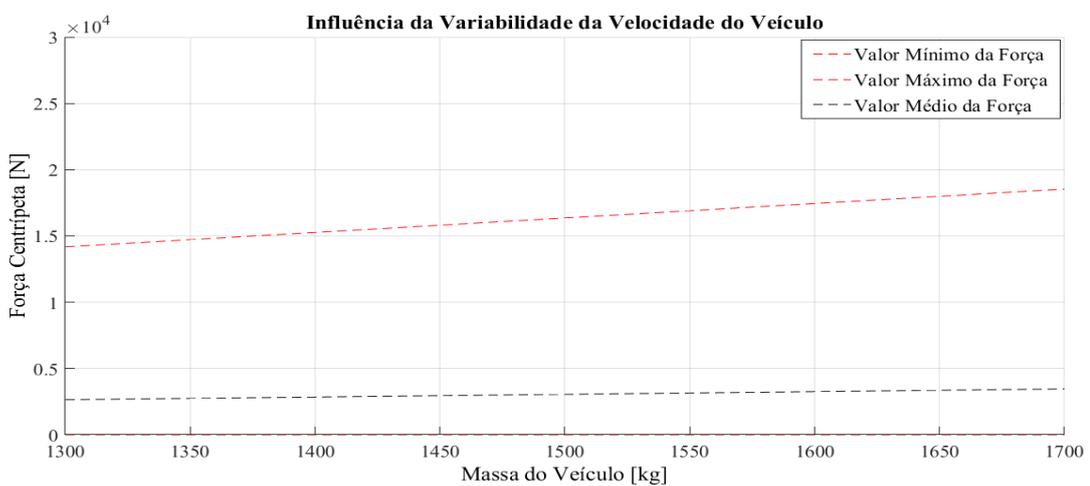
Figura 44: Influência da Variabilidade da Massa do Veículo na Relação da Força Centrípeta e Velocidade do Veículo



Fonte: O autor

Analisando a Figura 44, é possível observar que o efeito da variabilidade da massa do veículo afeta drasticamente a relação entre força centrípeta por velocidade do veículo, observando uma variação de aproximadamente 10% para mais e 15% para menos em sua força centrípeta em seu maior valor de velocidade no domínio estudado. Além disso, é possível verificar que a força centrípeta possui uma pequena sensibilidade relativa a massa do veículo em baixas velocidades, entretanto em velocidades maiores ocorre um aumento significativo da sensibilidade dessa força, conforme aumenta-se a espessura do espectro de variabilidade da massa.

Figura 45: Influência da Variabilidade da Velocidade do Veículo na Relação da Força Centrípeta e Massa do Veículo



Fonte: O autor

Ao analisar a Figura 45, pode-se fazer uma abordagem análoga ao caso anterior referente à variabilidade da massa do automóvel, no entanto, esse segundo caso é possível analisar a influência da variabilidade associada a velocidade do veículo, a qual afeta drasticamente a relação entre força centrípeta e massa do veículo, tendo uma variação grande na análise do espectro de variabilidade da velocidade do automóvel. Além disso, pode-se verificar que há uma grande variação entre os valores médio e máximo da força centrípeta ao longo do domínio da massa do veículo, atingindo valores de aproximadamente 400%, enquanto os valores médio e mínimo dessa mesma força variam em torno de 330%, valores bastante elevados quando comparado aos demais casos já analisados.

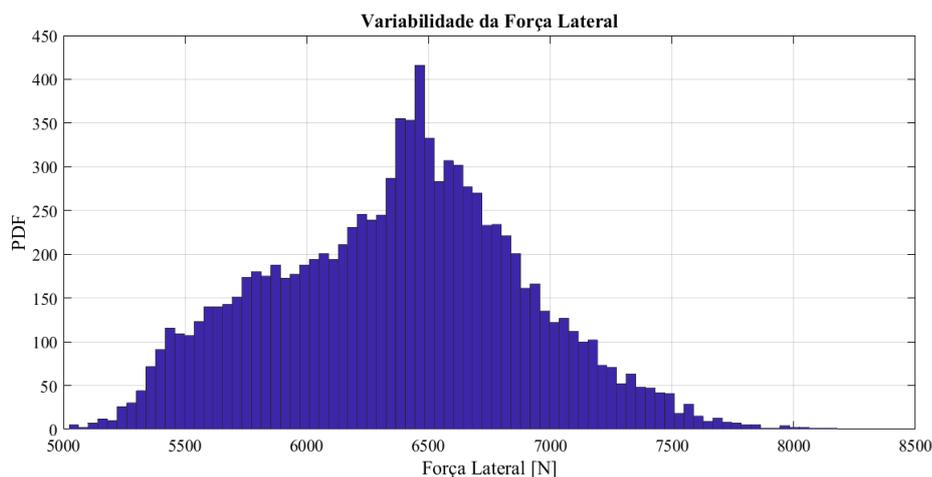
A sensibilidade da força centrípeta relacionada à velocidade tem um crescimento gradativo proporcional ao longo do crescimento da massa do automóvel, associada ao aumento da quantidade de passageiros presentes no veículo.

6.8.4. Análise da Quantificação de Incertezas na Força Lateral

Além da análise referente à força centrípeta, desenvolveu-se uma abordagem sobre a força lateral do veículo, a fim de abordar o comportamento do veículo em uma análise relacionada à dinâmica lateral veicular, sendo representada pelas Equações (5.10) e (5.11).

Partindo da Equação (5.10), construiu-se um histograma a fim de avaliar a variabilidade da força lateral do automóvel associada aos seus parâmetros estocásticos devido às suas respectivas variabilidades advindas de suas incertezas, conforme representado pela Figura 46.

Figura 46: Histograma da Variabilidade da Força Lateral do Veículo

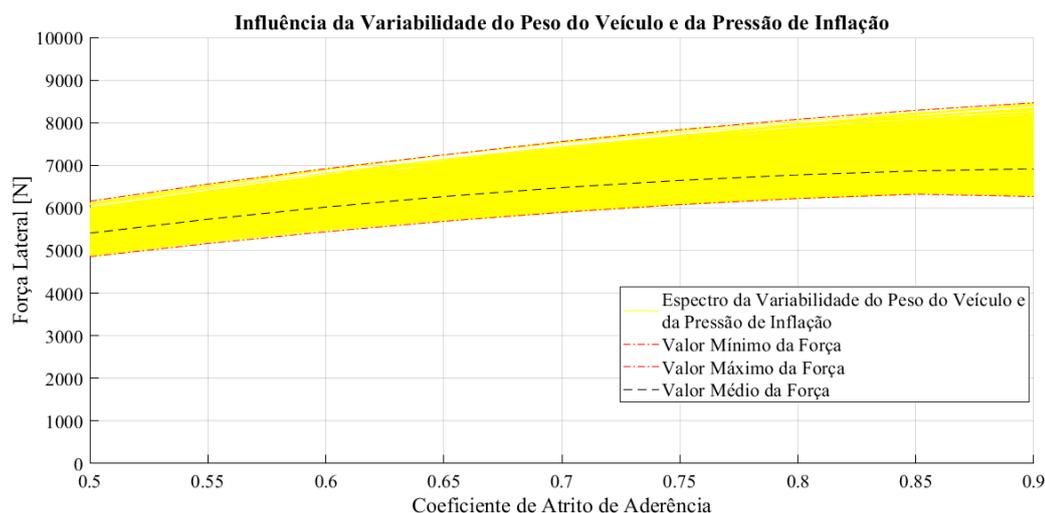


Fonte: O autor

Analisando o histograma referente à variabilidade da força lateral devido às incertezas dos seus parâmetros de entrada, pode-se verificar que o valor da força lateral do veículo está compreendido no intervalo de domínio entre 5000 a 8500 N.

A fim de analisar de forma mais refinada a influência da variabilidade dos parâmetros estocásticos que compõem a formulação referente à força lateral, Equação (5.10), realizou-se a construção de gráficos de influências a fim de comprovar a influência desses fatores na *performance* lateral do automóvel, conforme ilustrado pelas Figuras 47, 48 e 49.

Figura 47: Influência da Variabilidade do Peso do Veículo e da Pressão de Inflação do Pneu na Relação Força Lateral e Coeficiente de Atrito de Aderência

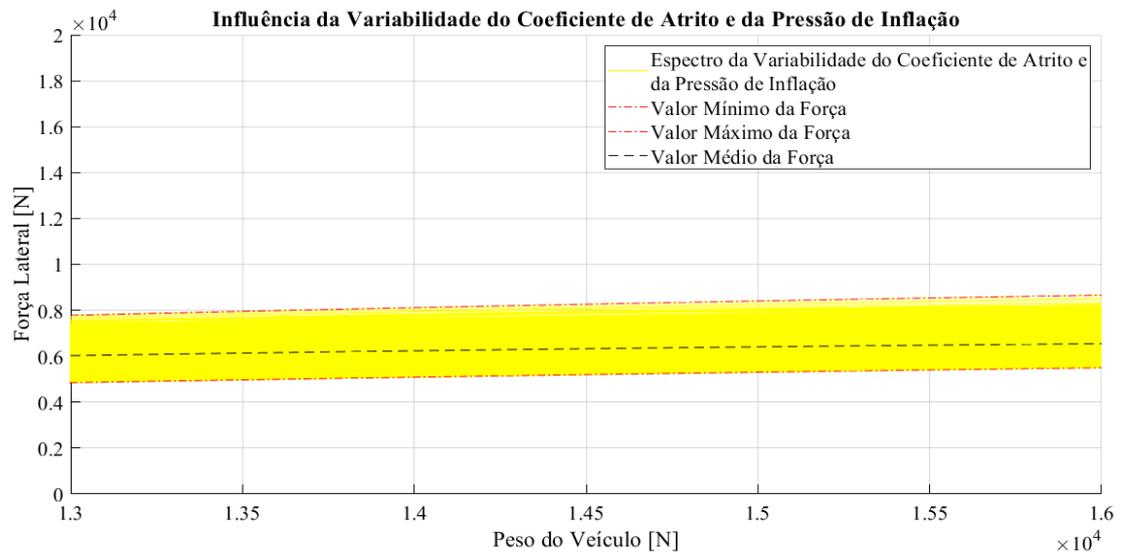


Fonte: O autor

Observando a Figura 47, é possível notar a forte influência da variabilidade do peso do veículo, associado ao número de ocupantes do automóvel, e da pressão de inflação do pneu exercida sobre a força lateral analisada. Analisando os valores médio e mínimos relativos à força lateral, nota-se uma variação em torno de 10%, enquanto em relação aos valores médio e máximo essa variação é de aproximadamente 15%, quando analisados no valor mínimo do domínio do coeficiente de atrito de aderência. É importante retratar que não há uma variação igualitária devido ao tipo de distribuição associada aos parâmetros de entrada que compõem a formulação da força lateral.

Além disso, essa variação aumenta significativamente quando é alcançado o máximo valor de coeficiente de atrito no domínio estudado, resultando também em uma grande sensibilidade da força lateral mediante esses parâmetros, sobretudo em valores elevados desse coeficiente. Nota-se que a força lateral pode alcançar valor máximo próximo a 9000 N, quando em cenários em que o coeficiente de atrito seja máximo.

Figura 48: Influência da Variabilidade do Coeficiente de Atrito de Aderência e da Pressão de Inflação do Pneu na Relação Força Lateral e Peso do Veículo

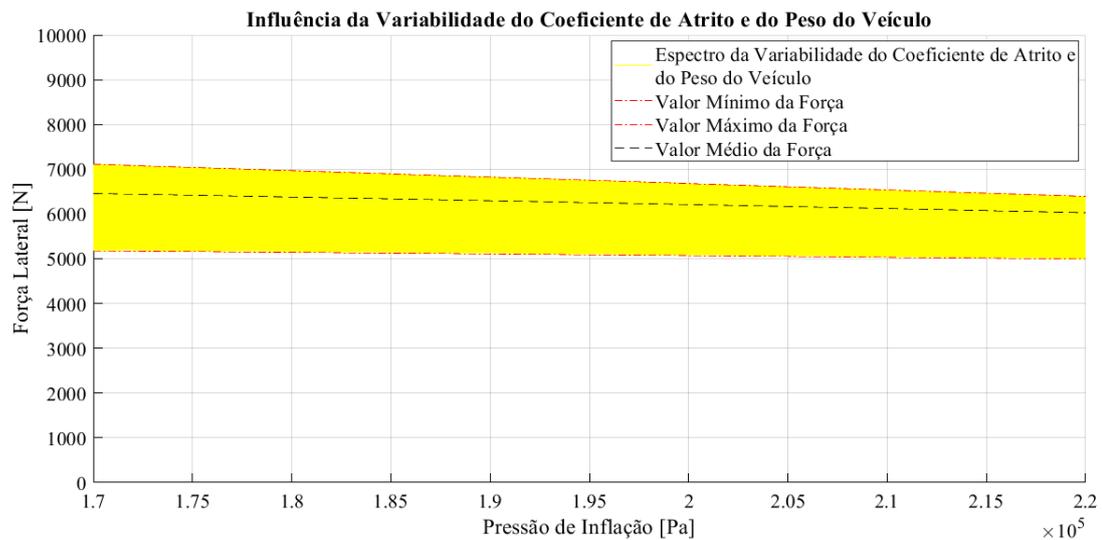


Fonte: O autor

Analisando a Figura 48, por sua vez, é possível observar novamente uma sólida influência da variabilidade do coeficiente de atrito de aderência, associado às condições de rugosidades da superfície do solo, e da pressão de inflação do pneu exercida sobre a força lateral abordada. Pode-se notar uma grande variabilidade desses parâmetros ao longo do domínio do peso do automóvel, sendo que a variação entre seus valores médio e mínimo é de aproximadamente 25%, enquanto a variação associada aos valores médio e máximo é de cerca de 30%, quando analisado no valor mínimo do peso do veículo do domínio em questão.

Além disso, nota-se que a força lateral pode alcançar valor máximo superior a 8 kN, em cenários que o peso do veículo é máximo, de acordo com a abordagem em questão. Pode-se ressaltar que os valores de força lateral analisados aumentam à medida que aumenta a quantidade de passageiros no veículo, sendo que a sensibilidade da força lateral associada a esses parâmetros influenciadores permanece aproximadamente constante por todo o domínio abordado.

Figura 49: Influência da Variabilidade do Coeficiente de Atrito de Aderência e do Peso do Veículo na Relação Força Lateral e Pressão de Inflação do Pneu



Fonte: O autor

De posse da Figura 49, observa-se novamente uma grande influência da variabilidade do coeficiente de atrito de aderência e do peso do veículo exercida sobre a força lateral em questão. Pode-se notar uma grande variabilidade desses parâmetros ao longo do domínio da pressão de inflação do pneu, na qual a variação entre os valores médio e mínimo da força lateral possuem uma variação de aproximadamente 25%, enquanto entre os valores médio e máximo a variação ficou em torno de 10%, quando analisados no valor mínimo do domínio da pressão de inflação. Pode-se notar que a diferença de valores entre as variações está relacionada aos tipos de distribuições probabilísticas dos parâmetros constitutivos da formulação matemática referente à força lateral.

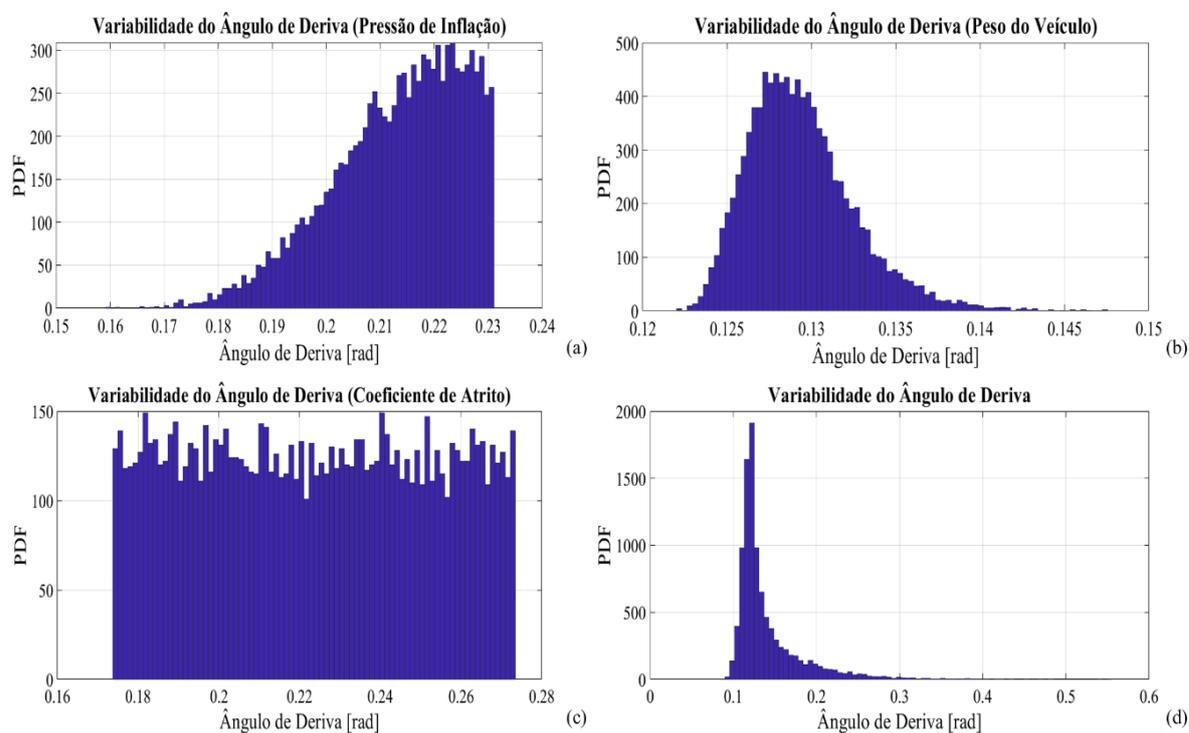
Além disso, a sensibilidade da força lateral associada a esses parâmetros influenciadores diminui ao longo do domínio da pressão de inflação, isto é, a força lateral apresenta uma maior sensibilidade a esses parâmetros em situações de pressão de inflação menores, tendo uma diminuição dessa sensibilidade à medida que o pneu esteja com uma pressão de inflação maior.

6.8.5. Análise da Quantificação de Incertezas no Ângulo de Deriva

Por fim, realizou-se uma análise acerca do comportamento do ângulo de deriva em relação aos seus parâmetros constituintes, a fim de verificar o comportamento de tal ângulo a partir da variabilidade de seus parâmetros, conforme retratado pela Equação (5.12).

De posse da Equação (5.12), construiu-se quatro histogramas a fim de avaliar a variabilidade do ângulo de deriva do pneu associada aos seus parâmetros estocásticos devido às suas respectivas variabilidades advindas de suas incertezas, conforme apresentado pela Figura 50.

Figura 50: Histograma da Variabilidade do Ângulo de Deriva Devido à Influência dos Parâmetros Constituintes: a) Pressão de Inflação; b) Peso do Veículo; c) Coeficiente de Atrito; d) Sobreposição de Efeitos dos Parâmetros



Fonte: O autor

Ao analisar a Figura 50, é possível verificar a influência da variabilidade de cada parâmetro constituinte da formulação do ângulo de deriva, conforme a Equação (5.12), de modo individual e com a sobreposição de efeitos, isto é, considerando a variabilidade de todos os parâmetros concomitantemente. Desse modo, pode-se observar que a variabilidade do ângulo de deriva relacionado à influência da pressão de inflação do pneu varia entre os valores 0,15 e 0,24, conforme apresentado pela Figura 50 (a); ao passo que quando se trata da influência do

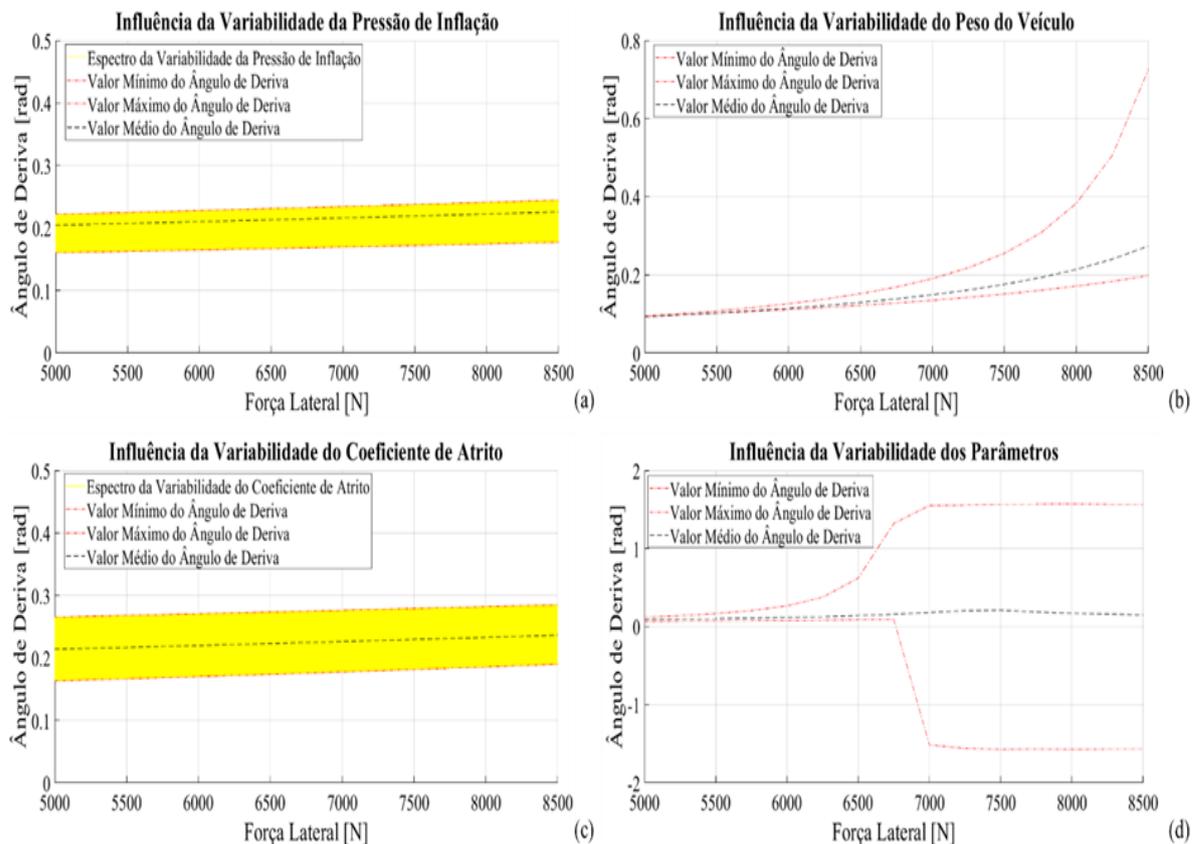
peso do veículo esses valores passam a ser entre 0,12 e 0,15, como pode ser observado pela Figura 50 (b); sendo que ao analisar o comportamento do ângulo de deriva devido à influência da variabilidade do coeficiente de atrito está compreendida entre 0,16 e 0,28, retratado pela Figura 50 (c). Por fim, pode-se observar por meio da Figura 50 (d) que quando há sobreposição dos efeitos dos parâmetros, isto é, uma abordagem considerando todas as variabilidades dos parâmetros agindo concomitantemente, os valores assumem uma faixa entre 0 a 0,6.

Vale ressaltar que os formatos dos histogramas em questão estão diretamente vinculados ao tipo de distribuição associada a cada parâmetro de entrada, devido a sua respectiva variabilidade atrelada a sua respectiva incerteza determinada, de acordo com as pesquisas nas literaturas presentes no projeto em questão.

A partir da Equação (5.12) e dos histogramas relacionados ao ângulo de deriva do pneu, conforme a Figura 50, obteve-se quatro gráficos associados à influência da variabilidade dos parâmetros no ângulo de deriva, relativos à pressão de inflação, peso do veículo, coeficiente de atrito e sobreposição dos efeitos dos parâmetros, conforme apresentado pela Figura 51.

Figura 51: Influência da Variabilidade dos Parâmetros na Relação Força Lateral e Ângulo de Deriva:

a) Pressão de Inflação; b) Peso do Veículo; c) Coeficiente de Atrito; d) Geral



Fonte: O autor

Ao analisar a Figura 51, é possível observar que para pequenos valores de força lateral, o ângulo de deriva apresenta uma pequena variabilidade e, conseqüentemente uma pequena sensibilidade a aspectos de variabilidade de seus parâmetros, conforme observado pelas Figuras 51 b) e d). No entanto para os casos relacionados à influência da pressão de inflação e do coeficiente de atrito, o espectro de variabilidade relativo ao ângulo de deriva apresenta um comportamento uniforme durante todo o domínio de força lateral analisado em questão. É importante ressaltar que as Figuras 51 b) e d) foram apresentadas com os valores mínimo, médio e máximo para uma melhor visualização dos valores.

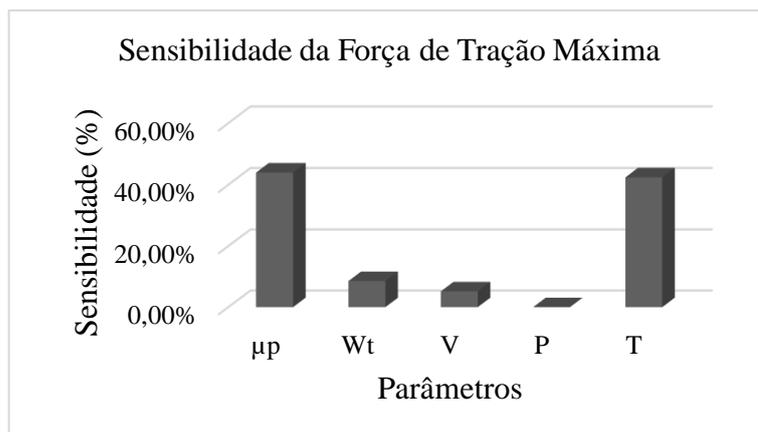
No entanto, para valores de força lateral entre 7000 N a 8500 N, existe um grande espectro de variabilidade do ângulo de deriva, tendo seus valores mínimo e máximo compreendidos entre -1,5 rad e 1,5 rad, respectivamente, como pode ser verificado pelas Figuras 51 b) e d). Dessa forma, essa grande região de variabilidade acarreta em uma maior sensibilidade desse ângulo em relação aos seus parâmetros constitutivos, tendo uma variação de 150% para cima e para baixo nessa mesma região analisada em questão, uma vez que o valor médio do ângulo de deriva está compreendido ente 0 a 0,5 rad.

6.9. Análise de Sensibilidade

6.9.1. Análise de Sensibilidade da Força de Tração Máxima

A primeira análise realizada está vinculada à força de tração máxima do veículo, retratando a influência de cada parâmetro constitutivo da Equação (5.7) conforme apresentado pela Figura 52.

Figura 52: Sensibilidade dos Parâmetros Constitutivos da Força de Tração Máxima



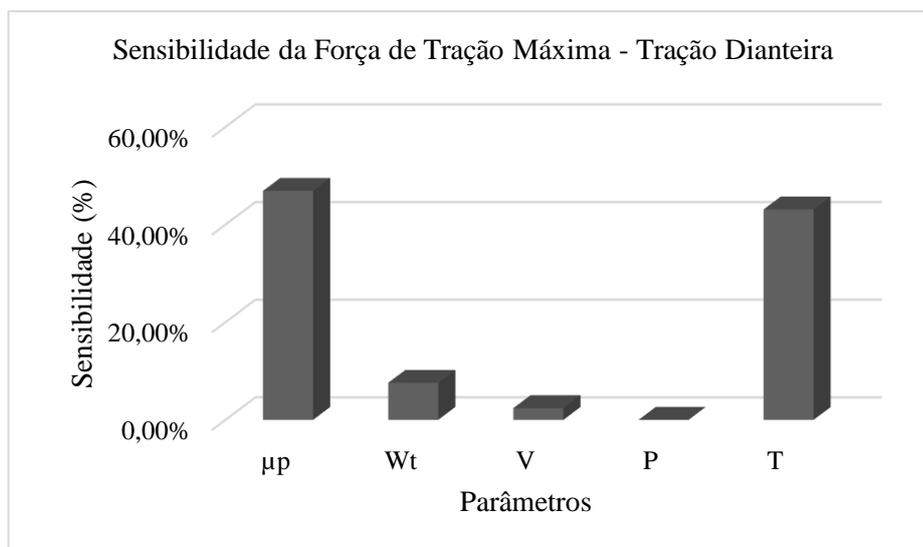
Fonte: O autor

Ao analisar a Figura 52 é possível verificar os principais parâmetros que influenciam essa força máxima de tração, sendo eles o coeficiente de atrito de aderência referente ao par de combinação entre pneu e solo, associado às irregularidades e rugosidades da estrada, e a temperatura ambiente ambos contribuindo com uma influência de aproximadamente 40%. Além disso, fatores como a carga total do veículo, a qual está diretamente atrelada ao número de ocupantes do veículo, a pressão de inflação dos pneus e a velocidade do automóvel também possuem as suas respectivas parcelas de sensibilidade nessa força analisada em questão, no entanto, não tendo a mesma contundência do que os dois primeiros parâmetros mencionados.

6.9.2. Análise de Sensibilidade da Força de Tração Máxima em Veículos de Tração Dianteira

Uma abordagem de sensibilidade análoga foi realizada para a força de tração máxima em veículos com tração dianteira, conforme a Equação (5.8), a fim de verificar e quantificar a parcela de contribuição relativa à sensibilidade dessa força devido aos seus parâmetros constitutivos, conforme apresentado pela Figura 53.

Figura 53: Sensibilidade dos Parâmetros Constitutivos da Força de Tração Máxima em Veículos com Tração Dianteira



Fonte: O autor

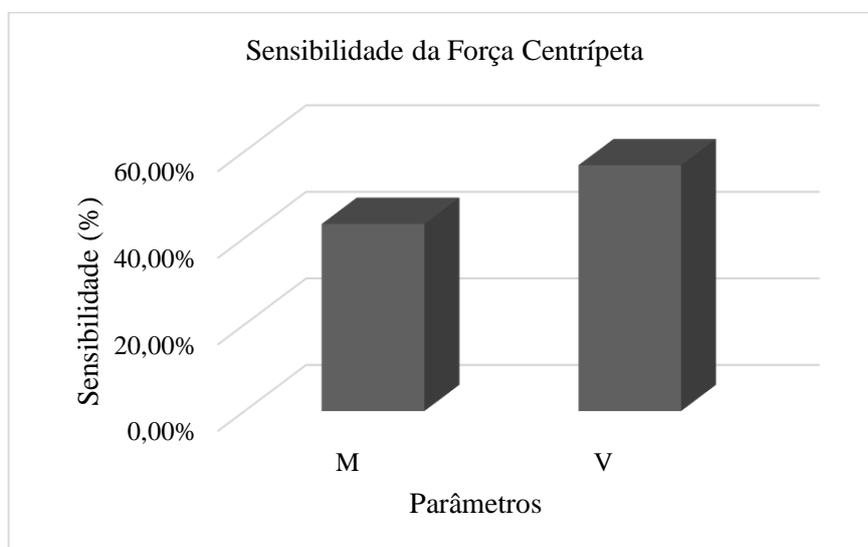
Ao analisar a Figura 53 é possível notar a forte influência de sensibilidade do coeficiente de atrito de aderência e da temperatura ambiente relacionados a essa força abordada em questão, tendo valores próximos a 50% e 40%, respectivamente. Os demais parâmetros

como carga total do veículo, velocidade e pressão de inflação dos pneus também possuem as suas respectivas parcelas de influência de sensibilidade no caso em questão, no entanto, com valores inferiores a 10%. Sendo, μ_p : coeficiente de atrito; W_t : peso total do veículo; V : velocidade do veículo; P : pressão de inflação; T : temperatura.

6.9.3. Análise de Sensibilidade da Força Centrípeta

Analisou-se o comportamento relativo à sensibilidade da força centrípeta mediante aos seus parâmetros constitutivos, representados conforme a Equação (5.9), a fim de verificar a influência da massa e da velocidade do automóvel em situações de dinâmica lateral de modo quantitativo, conforme apresentado pela Figura 54.

Figura 54: Sensibilidade dos Parâmetros Constitutivos da Força Centrípeta



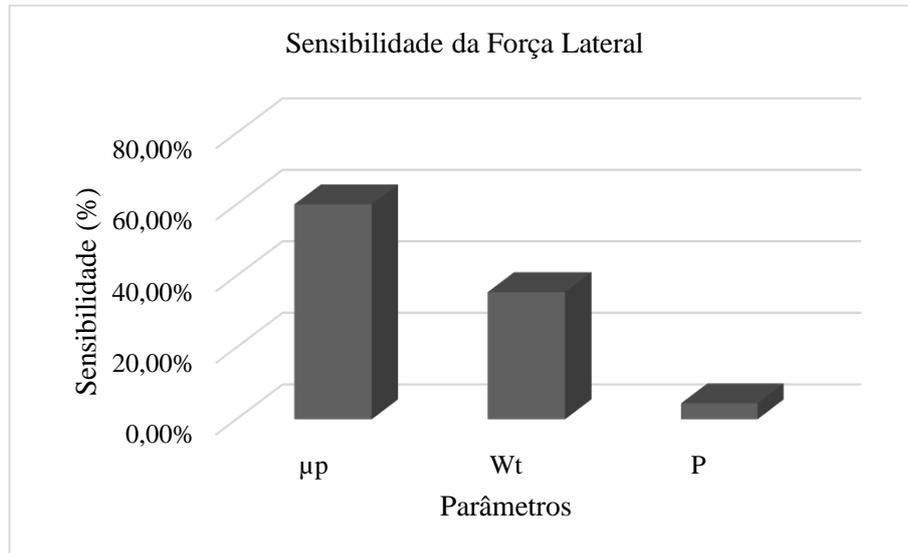
Fonte: O autor

Ao observar a Figura 54 é possível depreender a maior sensibilidade da força centrípeta devido à velocidade do veículo, uma vez que analisando a Equação (5.9) é possível encontrar tal parâmetro sendo uma potenciação, fazendo com que essa força tenha uma influência mais forte devido à variabilidade da velocidade quando comparada à da massa. É possível verificar que a parcela de contribuição relativa à sensibilidade da massa é de aproximadamente 40%, enquanto à da velocidade é responsável por cerca de 60%.

6.9.4. Análise de Sensibilidade da Força Lateral

Por fim, analisou-se a sensibilidade associada à *performance* do veículo em situações de dinâmica lateral por meio da sua respectiva força lateral, conforme a Equação (5.10). Sendo assim, pôde-se quantificar a parcela de influência de cada parâmetro constitutivo dessa força lateral referente a aspectos de sensibilidade, conforme apresentado pela Figura 55.

Figura 55: Sensibilidade dos Parâmetros Constitutivos da Força Lateral



Fonte: O autor

De posse da Figura 55 é possível verificar a forte influência do coeficiente de atrito de aderência da interface entre pneu e solo, sendo responsável por uma parcela de aproximadamente 60% de influência na força lateral do veículo, enquanto o peso total do veículo, considerando o próprio peso do automóvel e os ocupantes do mesmo, e a pressão de inflação dos pneus também possuem as suas contribuições relativas à sensibilidade da força lateral, em faixas próximas a 35% e 5%, respectivamente.

7. CONCLUSÃO

Com a colaboração deste trabalho, pôde-se concluir que alterações realizadas nas propriedades e características dos pneus podem afetar e influenciar drasticamente o comportamento do automóvel em diversas situações, tais como consumo de combustível, segurança, conforto, frenagem e transmissão de forças.

Dessa forma, os fabricantes de pneus por meio de técnicas de metamodelagem podem desenvolver estudos que tenham como objetivo encontrar uma configuração otimizada do sistema em relação à resistência ao rolamento, garantindo menor consumo de combustível e desgaste do pneu, maior segurança e aderência veicular.

Os modelos referentes às questões de dinâmica veicular enfatizam a importância dos estudos relacionados aos aspectos de variabilidade e incertezas dos parâmetros de entrada do sistema, sendo possível analisar e quantificar como eles influenciam a *performance* de um veículo.

Além disso, pôde-se verificar em relação as análises realizadas acerca da quantificação de incertezas e variabilidade dos parâmetros de entrada do sistema, a obtenção de resultados satisfatórios, visto que os erros percentuais são inferiores a 1%, fazendo com que o modelo desenvolvido esteja ajustado de forma confiável aos dados experimentais.

Pode-se verificar a variabilidade de 15% para cima e para baixo na Força de Tração Máxima associada à variabilidade do peso do veículo e o coeficiente de resistência ao rolamento do pneu; por outro lado, uma variabilidade de 10% para baixo e 15% para cima na Força Lateral relacionada à variabilidade do peso do veículo e pressão de inflação do pneu.

Pela análise de sensibilidade foi possível verificar a grande interferência do coeficiente de atrito e da temperatura nas Forças de Tração do veículo, grande influência da velocidade na Força Centrípeta e grande interferência do coeficiente de atrito e peso total do veículo na Força Lateral.

Pode-se notar que o tipo de pista, associado ao coeficiente de atrito, possui uma grande influência nas questões relacionadas à *performance* veicular, confirmando a importância da realização de estudos aprofundados e complexos acerca do padrão de superfície, a fim de garantir o desenvolvimento de pneus econômicos, do ponto de vista de consumo de combustível e aderentes à pista, associada à segurança veicular.

7.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros, pretende-se realizar estudos de otimização robusta e confiabilidade dos sistemas dinâmicos sujeitos às incertezas, contribuindo para a área de Mecânica dos Sólidos e Estruturas. Sendo um tema de grande interesse em linhas de pesquisas acadêmica, o mesmo também encontra uma grande possibilidade de contribuições inovadoras em setores de pesquisa e desenvolvimento de indústrias automotivas. Dessa forma, pretende-se estender esse estudo em nível de pós-graduação, mestrado e doutorado, considerando modelos mais elaborados nas questões associadas à natureza viscoelástica do material, incluindo análises experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSTETT-COLLIN, F., MARA, T., BASSET, M. **Application of global sensitivity analysis to a tire model with correlated inputs.** Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 44, pp. 54–62, 2014.

AYYUB, B. M., KLIR, G. J. **Uncertainty Modeling and Analysis in Engineering and the Sciences.** Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

BAFFET, G., CHARARA, A., STÉPHANT, J. **Sideslip angle, lateral tire force and road friction estimation in simulations and experiments.** International Conference on Control Applications, 2006.

BORGONOVO, E. **Sensitivity Analysis: An Introduction for the Management Scientist.** Springer International Publishing AG, 2017.

CACUCI, D.G., IONESCU-BUJOR, M., NAVON, I.M. **Sensitivity and Uncertainty Analysis: Applications to Large-Scale Systems.** Taylor & Francis Group, LLC, 2005.

CASTELO, D. A., RITTO, T. G. **Quantificação de incertezas e estimação de parâmetros em dinâmica estrutural: uma introdução a partir de exemplos computacionais.** São Carlos, SP: SBMAC, v. 81, 96 p., 2015.

CHO, J.R., LEE, H.W., JEONG, W.B., JEONG, K.M., KIM, K.W. **Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire.** International Journal of Solids and Structures, vol. 50, pp. 86-96, 2013.

CHUMSAMUTR, R., FUJIOKA, T., ABE, M. **Sensitivity analysis of side-slip angle observer based on a tire model.** Vehicle System Dynamics, vol. 44, no. 7, pp. 513-527, 2006.

CLIMATEMPO. Disponível em: <https://www.climatepo.com.br/climatologia/558/saopaulo-sp>. Acesso em: 25 Maio 2020.

CORDOS, N., TODORUT, A., BARABÁS, I. **Evaluation of the tire pressure influence on the lateral forces that occur between tire and road.** IOP Conference Series Materials Science and Engineering, vol. 252, 2017.

d'AMBROSIO, S., VITOLO, R. **Potencial impact of active tire pressure management on fuel consumption reduction in passenger vehicles.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2018.

de CURSI, E. S., SAMPAIO, R. **Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling with Matlab®.** Great Britain and the United States: ISTE Press Ltd and Elsevier Ltd, 2015.

DEY, S., MUKHOPADHYAY, T., ADHIKARI, S. **Metamodel based high-fidelity stochastic analysis of composite laminates: A concise review with critical comparative assessment.** Composite Structures, 2017.

DOUMIATI, M., VICTORINO, A.C., CHARARA, A., LECHNER, D. **Onboard Real-Time Estimation of Vehicle Lateral Tire-Road Forces and Sideslip Angle.** IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 16. No. 4, 2011.

ECKERT, J.J. **Análise Comparativa Entre os Métodos de Cálculo da Dinâmica Longitudinal em Veículos.** 2013. 200 f. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica, 2013.

EGER, A. **Simulação e Análise do Desempenho Longitudinal Veicular Sob Condições Dinâmicas Trativas.** 2007. 185 f. Universidade Federal de Santa Catarina Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2007.

EJSMONT, J., OWCZARZAK, W. **Engineering method of tire rolling resistance evaluation.** Measurement, vol. 145, pp. 144-149, 2019.

EJSMONT, J., TARYMA S., RONOWSKI G., SWIECZKO-ZUREK B. **INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE TYRE ROLLING RESISTANCE.** International Journal of Automotive Technology, vol. 19, no. 1, pp. 45-54, 2018.

EJSMONT, J., TARYMA S., RONOWSKI G., SWIECZKO-ZUREK B. **INFLUENCE OF LOAD AND INFLATION PRESSURE ON THE TYRE ROLLING RESISTANCE.** International Journal of Automotive Technology, vol. 17, no. 2, pp. 237-244, 2016.

GALI, M. R. **Modelo Analítico de Resistência ao Rolamento de Pneus de Carga.** 2015. 81 f. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics.** Society of Automotive Engineers Inc. 1992.

HAN, K., HWANG, Y., LEE, E., CHOI, S. **ROBUST ESTIMATION OF MAXIMUM TIRE-ROAD FRICTION COEFFICIENT CONSIDERING ROAD SURFACE IREGULARITY.** International Journal of Automotive Technology, vol. 17, no. 3, pp. 415-425, 2016.

HOELTGEBAUM, T. **Análise de Dinâmica Longitudinal em um Veículo de Fórmula SAE Elétrico.** 2013. 64 f. Universidade Federal de Santa Catarina Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.

JAZAR, R. N. **Vehicle Dynamics: Theory and Applications.** Springer Science Business Media, LLC. 2008.

JIANG, K., PAVELESCU, A., VICTORINO, A., CHARARA, A. **Estimation of vehicle's vertical and lateral tire forces considering road angle and road irregularity.** International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014.

KIÉBRÉ, R., ANSTETT-COLLIN, F., BASSET, M. **Sensitivity analysis for tire/road interface model.** Procedia Social and Behavioral Sciences, vol. 2, pp. 7688-7689, 2010.

LEAL, L. C. M., ROSA, E., NICOLAZZI, L. C. **Uma Introdução à Modelagem Quase-estática de Automóveis.** Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, 2012.

LEE, H., TAHERI, S. **A novel approach to tire parameter identification.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2018.

LEE, S., KWAK, J., KIM, H., LEE, J. **PROPERTIES OF ROADWAY PARTICLES FROM INTERACTION BETWEEN THE TIRE AND ROAD PAVEMENT.** International Journal of Automotive Technology, vol. 14, no. 1, pp. 163-173, 2013.

LIANG, C., ZHU, X., LI, C., WANG, G., JI, L. **SIMULATING TIRE INFLATION PRESSURE LOSS RATE TEST BY THE IDEAL MATERIAL METHOD.** International Journal of Automotive Technology, vol. 20, no. 4, pp. 789-800, 2019.

LÖWER, J., WAGNER, P., UNRAU, H. J., BEDERNA, C., GAUTERIN, F. **Dynamic measurement of the fluid pressure in the tire contact area on wet roads.** Automotive and Engine Technology, 2020.

NOOR, A. K., TANNER, J. A., PETERS, J. M. **Sensitivity of tire response to variations in material and geometric parameters.** Finite Elements in Analysis and Design, vol. 11, pp. 77-86, 1992.

PACEJKA, H. **Tire Characteristics and Vehicle Handling and Stability.** Elsevier Ltd. 2012.

RAO, K. V. N., KUMAR, R. K., BOHARA, P. C. **A sensitivity analysis of design attributes and operating conditions on tyre operating temperatures and rolling resistance using finite element analysis.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, vol. 220, 2006.

REIMPELL, J., STOLL, H., BETZLER, J. W. **The Automotive Chassis: Engineering Principles.** 2. ed. Butterworth-Heinemann, 2001.

REYES, C., GARCÍA, O., MEIRELLES, P. S., FERREIRA, J. V. **Estimation of longitudinal and lateral tire forces in a commercial vehicle.** International Congress on Engineering (WEA), 2015.

SALTELLI, A., TARANTOLA, S., CAMPOLONGO, F., RATTO, M. **SENSITIVITY ANALYSIS IN PRACTICE: A Guide to Assessing Scientific Models**. 1ª ed. John Wiley & Sons Ltd, England, 2004.

SANDBERG, T., RAMDEN, C., GAMBERG, M. **TIRE TEMPERATURE MEASUREMENTS FOR VALIDATION OF A NEW ROLLING RESISTANCE MODEL**. Advances in Automotive Control, 2004.

SHEWHART, W. A., WILKS, S. S. **The Algebra of Random Variables: Wiley series in probability and mathematical statistics**. John Wiley & Sons, Inc., 1979.

SINA, N., YAZDI, M. R. H., ESFAHANIAN, V. **A novel method to improve vehicle energy efficiency: Minimization of tire power loss**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2019.

SOIZE, C. **Uncertainty Quantification: An Accelerated Course with Advanced Applications in Computational Engineering**. Springer International Publishing, 2017.

STRIGEL, A., PECKELSEN, U., UNRAU, H. J., GAUTERIN, F. **Estimation of feasible ranges of functional tire characteristics based on tire dimension, inflation pressure, and wheel load**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2019.

SULLIVAN, T. J. **Introduction to Uncertainty Quantification**. Springer International Publishing Switzerland, 2015.

TAGHAVIFAR, H., MARDANI, A. **Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire**. Journal of Terramechanics, vol. 50, pp. 99-106, 2013.

VIAS SEGURAS. Disponível em: http://www.vias-seguras.com/layout/set/print/veiculos/pneumaticos/manual_twi_informacoes_tecnicas_sobre_pneus/o_pneu_composicao_e_estrutura. Acesso em: 05 Nov. 2021.

WANG, G. G., SHAN, S. **Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization.** Journal of Mechanical Design, vol. 129, 2007.

WONG, J. Y. **Theory of Ground Vehicles.** 3^a ed. John Wiley & Sons, Inc., 2001.

YOKOTA, K., HIGUCHI, E., KITAGAWA, M. **Estimation of Tire Temperature Distribution and Rolling Resistance under Running Conditions Including Environmental Factors.** SAE International by Swinburne Univ Of Technology, 2012.