

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

THIAGO CHIERIGHINI

ANÁLISE ITERATIVA DE ACELERAÇÃO LIVRE EM RAMPA E DESACELERAÇÃO
LIVRE EM ESTRADA PLANA (*COAST-DOWN*) PARA AVALIAÇÃO DE
PARÂMETROS DINÂMICOS LONGITUDINAIS DE VEÍCULOS

Joinville

2017

THIAGO CHIERIGHINI

ANÁLISE ITERATIVA DE ACELERAÇÃO LIVRE EM RAMPA E DESACELERAÇÃO
LIVRE EM ESTRADA PLANA (*COAST-DOWN*) PARA AVALIAÇÃO DE
PARÂMETROS DINÂMICOS LONGITUDINAIS DE VEÍCULOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva no Curso de Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.

Joinville

2017

AGRADECIMENTOS

A todos os membros da empresa Mobilis Veículos Elétricos pela confiança, oportunidade e auxílio em toda a execução desse trabalho.

Ao meu orientador Professor Dr. Leonel R. Cancino pela disponibilidade e ensinamentos ao longo da realização desse trabalho.

A Professora Dra. Vanessa Aparecida Alves de Lima por me ajudar na formatação e melhorias no meu trabalho.

Aos meus pais Tony e Varlei Chierighini que me proporcionaram e me incentivaram todos esses anos de graduação e são meus exemplos profissionais e pessoais.

Aos meus irmãos Diego Chierighini e Felipe Ferreira pelo incentivo, conselhos ensinamentos mesmo estando longe.

A minha namorada Luciana Malagotti por acreditar em mim, por sua dedicação, suporte, amor, carinho, por me dar mais alegria e motivação para seguir em frente.

A minha sogra Maristela da Silva Malagotti e meu sogro Luciano Guedert Malagotti por serem como pais para mim ao longo desses anos, sempre me apoiando.

Ao Leonardo Porto Carioni pela amizade e por toda parceria na execução desse trabalho e do artigo que fundamentou esse trabalho.

Aos meus amigos que sempre estão do meu lado, acreditaram e me fizeram acreditar que eu seria capaz de alcançar meus objetivos. Aos amigos de faculdade, pelas várias noites viradas de estudo, pelos ensinamentos durante a graduação, e por também estarem sempre ao meu lado.

À Universidade Federal de Santa Catarina pelo ensino de qualidade e toda a infraestrutura disponibilizada. Também agradeço a todo corpo docente, técnico e administrativo que muito contribuíram para minha formação acadêmica e contribuíram no meu crescimento intelectual.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado!

RESUMO

Com intuito de caracterizar dinamicamente um veículo elétrico de baixo peso quanto às inércias rotacionais, ao coeficiente de atrito de rolamento dos pneus e ao coeficiente de arrasto aerodinâmico, que são parâmetros importantes tanto para conhecer a dinâmica do veículo quanto para auxiliar no dimensionamento correto do seu Powertrain, foi desenvolvido um grupo de ensaios baseados nas curvas de velocidade em função do tempo em duas condições: desaceleração livre no plano (*coast-down*) e aceleração livre em rampa. Como se objetiva conhecer também as inércias rotacionais e não apenas obter a curva de forças resistivas e estimá-las a uma porcentagem da massa real do veículo, como proposto na norma ABNT NBR 10312:2014, foi feita uma análise iterativa da sobreposição dos dados dos dois ensaios. As metodologias podem ser validadas pela realização dos testes com veículos de passeio, cujos parâmetros são conhecidos pelos fabricantes ou bem estimados pela literatura, além de simulações que auxiliam na confiabilidade do resultado. Buscou-se manter as mesmas características entre os testes a fim de anular variações entre ensaios realizados para confrontar os resultados. Para a análise com o veículo de passeio, foram obtidos resultados com erro máximo de 7,84% em relação aos valores de referência.

Palavras-Chave: *Coast-down*. Coeficiente de resistência ao rolamento. Coeficiente de arrasto aerodinâmico. Inércias rotacionais. Veículos Elétricos.

ABSTRACT

With the purpose of characterizing the dynamics of a lightweight electric vehicle with regard to its rotational inertia, friction and drag coefficients, fundamental parameters for understanding the vehicle dynamics as well as aid the proper design of its powertrain, a series of tests was performed, considering the speed \times time curves for two conditions: free deceleration on a plane (coast-down) and free acceleration on a slope. As the aim is also to find out the rotational inertia, instead of just obtaining the curve of resistive forces and estimating them based on a percentage of the real mass of the vehicle, as proposed by the ABNT NBR 10312:2014 standard, an iterative analysis of the data overlap of the two tests was made. These methodologies may be validated realizing the tests with passenger vehicles whose parameters are known by manufacturers or fairly well estimated by literature, as well as through simulations, which help ensure reliability of the results. Characteristics were kept equal between tests in order to cancel variations and allow results to be comparable. Analyzing the passenger vehicle, the obtained results had a maximum error of 7.84% relative to reference values.

Keywords: Coast-down. Aerodynamics. Rolling resistance coefficient. Drag coefficient. Rotational inertias. Electric vehicle.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação da força peso agindo sobre o centro de gravidade do veículo em um aclone.....	19
Figura 2 - Evolução do coeficiente de arrasto dos veículos ao longo dos anos.	24
Figura 3 - Inércia de translação de um veículo.....	25
Figura 4 - Inércias Rotativas de um Veículo	26
Figura 5 - Fluxograma da análise iterativa	40
Figura 6 - Trecho escolhido para realização do teste de desaceleração livre no plano	43
Figura 7 – Pista utilizada nos testes de desaceleração livre no plano.....	44
Figura 8 - Chevrolet Onix utilizado nos testes	46
Figura 9 - Dispositivo de aquisição de dados do veículo durante os testes.....	48
Figura 10 - Curvas de aceleração livre em rampa	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de resistência ao rolamento em diferentes tipos de piso	18
Tabela 2 - Coeficientes a e b em função do tipo de pneu.....	19
Tabela 3 - Demonstração das equações para o cálculo das variáveis A , B , C , D e E necessárias para a obtenção dos coeficientes f_0 e f_2	31
Tabela 4 - Dados do veículo utilizados nos testes	46
Tabela 5 - Dados obtidos antes do teste de desaceleração livre no plano	49
Tabela 6 - Dados do ensaio de <i>coast-down</i>	50
Tabela 7 - Dados de velocidades, tempos médios de desaceleração e acelerações médias calculadas para o ensaio de <i>coast-down</i>	51
Tabela 8 - Dados obtidos antes e dados resultantes do teste de aceleração livre em rampa	52
Tabela 9 - Resultado da análise iterativa	53
Tabela 10 - Comparação entre os valores da referência e os obtidos na análise iterativa.....	54
Tabela 11 - Dados obtidos antes do teste de desaceleração livre no plano alternativo	55
Tabela 12 - Dados do ensaio de <i>coast-down</i> alternativo	56
Tabela 13 - Dados de velocidades, tempos médios de desaceleração e acelerações médias calculadas para o ensaio de <i>coast-down</i> alternativo	56
Tabela 14 - Resultado da análise iterativa alternativa	57
Tabela 15 - Comparação entre os valores da referência e os obtidos na análise iterativa alternativa	57

LISTA DE ABREVIATURAS

AIE - Agência Internacional de Energia

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAN - Controller Area Network

CG - Centro de Gravidade do Veículo

CFD - Computational Fluid Dynamic

ISO - International Organization for Standardization

OBD - On Board Diagnostics

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
α	Aceleração Angular	[rad/s ²]
a	Aceleração linear	[m/s ²]
A_f	Área frontal projetada do veículo	[m ²]
h_1	Altura no início da pista de testes	[m]
h_2	Altura no fim da pista de teste	[m]
a'	Coefficiente “ a' ” em função do tipo de pneu	[adimensional]
b	Coefficiente “ b ” em função do tipo de pneu	[adimensional]
C_x	Coefficiente de Arrasto Aerodinâmico	[adimensional]
f	Coefficiente de Resistência ao Rolamento	[adimensional]
f_t	Coefficiente de Resistência ao Rolamento e perdas na transmissão	[adimensional]
CV	Coefficiente de variação percentual das medições	[%]
f_0	Coefficiente do termo de ordem zero da equação genérica de forças resistivas ao deslocamento do veículo em função da velocidade	[N]
$f'_{0,k}$	Coefficiente do termo de ordem zero da equação genérica de forças resistivas ao deslocamento do veículo em função da velocidade não corrigido em temperatura e pressão	[N]
f_2	Coefficiente do termo de segunda ordem da equação genérica de forças resistivas ao deslocamento do veículo em função da velocidade	[N/(m/s) ²]
$f'_{2,k}$	Coefficiente do termo de segunda ordem da equação genérica de forças resistivas ao deslocamento do veículo em função da velocidade não corrigido em temperatura e pressão	[N/(m/s) ²]
σ	Desvio padrão das medições	[adimensional]
D	Diâmetro externo do pneu	[m]
Δs	Distância entre a altura do início e fim da pista de testes	[m]
$a_{\%}$	Elevação total da pista de testes	[%]
K_p	Fator de correção, estimado em $2,503 \times 10^{-4}$	[m/s ²]
K_T	Fator de correção, estimado em $8,6 \times 10^{-3}$	[K]
δ	Fator de massa equivalente às inercias de rotação	[adimensional]
F	Força aplicada a um corpo	[N]
G	Força normal da roda sobre o solo	[N]
F_m	Força motriz total para vencer as resistências ao movimento	[N]
θ	Inclinação da pista	[°]

J_r	Inércia de rotação das rodas e agregados	[kg/m ²]
J_t	Inércia de rotação da transmissão	[kg/m ²]
J_m	Inércia de rotação do motor	[kg/m ²]
J	Inércia de rotação, proporcional a massa e a geometria da peça girante	[kg/m ²]
i_{c_j}	j-ésima relação de transmissão da caixa de câmbio	[adimensional]
m	Massa de um corpo	[kg]
m_L	Massa dos equipamentos a bordo	[kg]
m_p	Massa dos ocupantes	[kg]
m_v	Massa do veículo em ordem de marcha	[kg]
ρ	Massa específica do ar	[kg/m ³]
m_t	Massa Translacional	[kg]
F_R	Módulo da força resistiva ao deslocamento	
M	Momento aplicado a um corpo	[N.m]
n	Número de desacelerações em cada sentido da pista	[adimensional]
P_m	Potência consumida na transmissão (perda mecânica)	[kW]
P_C	Potência no cubo de roda	[kW]
P_e	Potência efetiva no motor	[kW]
P	Pressão Atmosférica	[kPa]
P_0	Pressão padrão de 101,325	[kPa]
r_d	Raio dinâmico do pneu	[m]
r_e	Raio estático do pneu	[m]
i_d	Relação de transmissão do diferencial	[adimensional]
η_m	Rendimento mecânico de transmissão	[adimensional]
Q_A	Resistência Aerodinâmica	[N]
Q_S	Resistência ao Aclive	[N]
Q_R	Resistência ao Rolamento	[N]
Q_i''	Resistência correspondente a Inércia de Rotação	[N]
Q_i'	Resistência correspondente a Inércia de Translação	[N]
Q_I	Resistência Total de Inércia	[N]
E	Somatório dos produtos entre a aceleração média e os valores de velocidade média	[m ² /s ³]
A	Somatório dos valores de aceleração média	[m/s ²]
B	Somatório dos valores de velocidade média	[m/s]
D	Somatório dos valores de velocidade média à quarta	[m/s] ⁴
C	Somatório dos valores de velocidade média ao quadrado	[m/s] ²

T	Temperatura do Ambiente	[K]
T_0	Temperatura Padrão de 293,15	[K]
v	Velocidade do veículo	[m/s]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. OBJETIVOS.....	14
1.1.1. Objetivo Geral	14
1.1.2. Objetivos Específicos	14
2. REFERENCIAL TEORICO	16
2.1. Resistências ao movimento	16
2.1.1. Resistência ao Rolamento	16
2.1.1.1. <i>Coefficiente de Resistência ao Rolamento</i>	<i>18</i>
2.1.2. Efeito do Active.....	19
2.1.3. Forças Aerodinâmicas	20
2.1.3.1. <i>Resistência Aerodinâmica</i>	<i>21</i>
2.1.3.2. <i>Coefficiente de Arrasto.....</i>	<i>22</i>
2.1.4. Efeito da Inércia	24
2.1.4.1. <i>Massas em Translação</i>	<i>25</i>
2.1.4.2. <i>Massas em Rotação</i>	<i>25</i>
2.1.4.3. <i>Superposição dos Efeitos.....</i>	<i>27</i>
2.1.5. Resistência Mecânica	28
2.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA TOTAL AO DESLOCAMENTO	29
2.3. TESTES DE DESACELERAÇÃO LIVRE NO PLANO E ACELERAÇÃO LIVRE EM RAMPA	30
2.3.1. ABNT NBR 10312:2014 – Veículos rodoviários automotores leves – determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro.	30
2.3.2. Desaceleração livre no plano (<i>coast-down</i>).....	33
2.3.3. Aceleração livre em rampa.....	34

3. METODOLOGIA	35
3.1. DESACELERAÇÃO LIVRE NO PLANO (<i>COAST-DOWN</i>).....	35
3.2. ACELERAÇÃO LIVRE EM RAMPA	36
3.3. METODOLOGIA ITERATIVA DE DESACELERAÇÃO LIVRE EM ESTRADA PLANA E DE ACELERAÇÃO LIVRE EM RAMPA	37
3.4. METODOLOGIA ITERATIVA ALTERNATIVA DE DESACELERAÇÃO LIVRE NO PLANO PARA BAIXAS VELOCIDADES E ACELERAÇÃO LIVRE EM RAMPA.....	40
4. RESULTADOS	42
4.1. CONDIÇÕES DOS TESTES	42
4.1.1. Desaceleração livre no plano (<i>coast-down</i>).....	42
4.1.2. Aceleração livre em rampa.....	44
4.1.3. Veículo e equipamentos utilizados.....	45
4.2. METODOLOGIA DE ANÁLISE ITERATIVA BASEADA NA NORMA ABNT NBR 10312:2014.....	48
4.3. METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA BAIXAS VELOCIDADES.....	54
5. CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

Os meios de transportes são essenciais para o desenvolvimento econômico, pois expandem as fronteiras de comércio e de trabalho, reduzem o isolamento de áreas rurais e permitem o aumento da qualidade de vida das pessoas que precisam se deslocar para trabalhar ou obter lazer. Isto está diretamente ligado com o aumento no número de veículos rodando nas ruas nos dias atuais. Porém, com esse desenfreado aumento, também há a elevação do consumo de combustíveis fósseis e conseqüentemente maior emissão de poluentes na atmosfera o que também está ligado ao crescente consumo de energia.

Portanto, com esse acréscimo no consumo de energia no mundo, grande aumento do número de veículos rodando e do esgotamento dos combustíveis fósseis somados com as questões ambientais, são razões que justificam a utilização de veículos elétricos no lugar dos atuais veículos. O interesse em desenvolver esses veículos com fonte de energia limpa e renovável para substituir os atuais veículos à combustão vem aumentando constantemente nos últimos anos, pois os mesmos propõem uma boa e atraente solução para o transporte de pessoas em ambientes urbanos por serem ambientalmente mais amigáveis.

Visto isso, uma startup de veículos elétricos de Santa Catarina, criada para atender esse novo nicho de automóveis elétricos urbanos, tem a necessidade de criar metodologias de testes para seus carros fazendo com que esses possam ser caracterizados quanto a sua eficiência, autonomia, dinâmica, entre outras características, de forma simples, de baixo custo, porém que retornem resultados mais condizentes com seu desempenho real.

Este trabalho tem ênfase em validar uma metodologia de testes para utilizar em um automóvel elétrico de baixa relação peso-potência. Foram elaborados uma série de ensaios que permitissem caracterizar um veículo quanto à inércia rotacional equivalente (fator de massa) δ , ao coeficiente de arrasto aerodinâmico C_x e ao coeficiente de atrito de rolamento dos pneus e perdas na transmissão f_t . Serão discutidas as metodologias de ensaios e análise de dados desenvolvidas para determinação dos parâmetros de interesse, assim como a sua validação com veículos de passeio.

Os ensaios foram elaborados para permitirem avaliar o comportamento dos sistemas em campo e serem realizados com o veículo completo, de forma que a análise permitisse isolar os parâmetros de interesse sem que os ensaios para sua determinação fossem isolados em si. O estudo foi baseado na curva de velocidade ao longo do tempo de um veículo em desaceleração

livre no plano (*coast-down*) e aceleração livre em rampa, resolvendo iterativamente as soluções para C_x e f_t obtidas pela formulação para o ensaio de *coast-down* com δ calculada a partir da formulação para a aceleração livre em rampa.

A estratégia em se usar uma metodologia de análise iterativa parte da dificuldade em se desacoplar as inércias rotacionais do veículo quando são realizados ensaios de caracterização. De forma geral, os ensaios para obtenção dos coeficientes de arrasto aerodinâmico e de atrito dos pneus são baseados na medição da desaceleração livre do veículo, na qual a inércia tende a manter a quantidade de movimento do veículo e as resistências ao movimento tendem a desacelerá-lo. Neste caso, a formulação precisa das inércias rotacionais, através do fator de massa, como entrada na equação para calcular as perdas nos pneus e transmissão e aerodinâmicas que causam a desaceleração enquanto a inércia equivalente do veículo tende a mantê-lo em movimento.

A formulação é baseada no modelo quasi-estático proposto por Nicolazzi, Rosa e Leal (2012), onde as forças de resistência ao movimento são separadas em parcelas relacionadas a aerodinâmica, atrito dos pneus, aclave e perdas na transmissão iterativamente com a metodologia proposta por Santos (2012).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Validar duas metodologias de testes que objetivam caracterizar dinamicamente um veículo elétrico de baixo peso quanto às inércias rotacionais, ao coeficiente de resistência ao rolamento dos pneus e ao coeficiente de arrasto aerodinâmico que sejam simples, de baixo custo, porém robusta, utilizando de veículos de passeio com dados consolidados pelos seus respectivos fabricantes como meio de comparação para sua comprovação.

1.1.2. Objetivos Específicos

Encontrar o coeficiente de resistência aerodinâmica do veículo de passeio através da metodologia de análise iterativa e da metodologia de análise iterativa alternativa para comparar o resultado com os dados de fábrica;

Obter o coeficiente de resistência ao rolamento e o valor das inércias rotativas equivalente do veículo de passeio através da metodologia de análise iterativa e da metodologia de análise iterativa alternativa para comparar o resultado com os dados obtidos da referência;

2. REFERENCIAL TEORICO

A metodologia de análise de dados é baseada nos ensaios de desaceleração livre no plano (*coast-down*) e aceleração livre em aclave, na qual as formulações resultam nos parâmetros de interesse. Para que se tenha uma boa fundamentação teórica para o entendimento do que esse trabalho propõe, é feita a seguir uma breve revisão sobre dinâmica longitudinal de veículos a fim de se obter a formulação para cada ensaio em função dos parâmetros disponíveis.

2.1. RESISTÊNCIAS AO MOVIMENTO

Segundo Nicolazzi *et al.* (2012), a resistência total ao deslocamento resulta do somatório das forças que se opõem ao movimento do veículo a uma determinada velocidade e determinam o nível de potência necessário para manter esse movimento. A força resistente total deve ser equilibrada pela força transmitida por atrito ao solo, através das rodas motrizes, proveniente da potência gerada pelo motor.

Compõem a resistência total ao deslocamento:

- Resistência ao rolamento;
- Resistência ao aclave;
- Resistência aerodinâmica;
- Resistência inercial;
- Resistência mecânica.

2.1.1. Resistência ao Rolamento

A resistência ao rolamento é definida pela norma internacional ISO 18164:2005 como sendo a energia consumida pelo pneu por unidade de distância percorrida.

De acordo com Nicolazzi *et al.* (2012), a resistência de rolamento é uma força que sempre se opõe ao movimento do veículo, portanto ajuda a freá-lo. Com isso, para manter um pneu girando sobre o solo, é necessário dispendir certa quantidade de energia, consumida pelos diversos tipos de perdas que ocorrem. Estas perdas dão origem à resistência ao rolamento do pneu e são provenientes principalmente de duas fontes dissipadoras. Uma é o próprio pneu e a outra é o solo onde o veículo trafega.

Supondo um contato com o solo idealmente rígido, o pneu por apresentar em sua composição um material visco-elástico, deforma-se pela carga exercida tornando-se plano na zona de contato. Com isso, os cordões e lonas presentes na sua composição se deslocam. As repetidas deformações causam perda de energia devido ao fenômeno de histerese e são dissipadas na forma de calor, ocasionando uma resistência conhecida por resistência ao rolamento do veículo causada pela deformação do pneu. (NICOLAZZI *et al.*, 2012)

Para Nicolazzi *et al.* (2012), quando é considerado o pneu rígido e o solo deformável, todas as perdas que levam a um consumo de energia ocorrem no solo. Em seu movimento o pneu deixa um sulco no terreno deformável e para manter esse movimento, é necessário que atue na roda uma força de mesmo sentido e que compense a resistência ao avanço que o solo impõe. Quanto maior for a profundidade do sulco maior será a resistência ao rolamento do veículo oferecida pela deformação do solo.

Reimpell, Stoll e Betzler (2001) afirmam que a maior parte da resistência ao rolamento é gerada no piso de rodagem. Uma pista com baixo amortecimento melhora a resistência ao rolamento, mas ao mesmo tempo reduz o coeficiente de atrito na superfície da estrada em condição molhada.

Gillespie (1992) afirma que uma das maiores forças de resistência no veículo é a resistência ao rolamento dos pneus, que está presente desde o instante que as rodas começam a girar. Em baixas velocidades, a resistência ao rolamento é a principal resistência ao movimento, pois a resistência aerodinâmica iguala apenas em velocidades de 50 a 60 milhas por hora. O autor enumera sete mecanismos principais responsáveis pela resistência ao rolamento:

- Perda de energia devido à deflexão lateral do pneu perto da área de contato;
- Perda de energia devido à deflexão da banda de rodagem;
- Deslizamentos na área de contato;
- Deslizamento do pneu na direção longitudinal e direção lateral;
- Deflexão da superfície do solo;
- Arrasto do ar no interior e exterior do pneu;
- Perda de energia em impactos;

Genta (2006), afirma que, se tanto o conjunto pneu/roda quanto a estrada fosse perfeitamente indeformável, não haveria resistência e, conseqüentemente, não precisaria exercer uma força de tração para movimentar o veículo. Porém, no mundo real os corpos

perfeitamente rígidos não existem e ambos componentes estão sujeitos à deformação na zona de contato, gerando resistência.

2.1.1.1. Coeficiente de Resistência ao Rolamento

Segundo Nicolazzi *et al.* (2012), a resistência ao rolamento é proporcional à carga nominal que age sobre a roda. Essa proporcionalidade é expressa pelo coeficiente f , que varia com velocidade, pressão dos pneus, temperatura, carga radial, tipo de pneu, tipo do piso, entre outros fatores de menor importância, o que o torna bastante difícil de modelar.

Considerando então que f é coeficiente de atrito dos pneus, e é proporcional a carga que age sobre a roda, tem-se a força de resistência ao rolamento, mostrada na Equação 1:

$$Q_R = f m_t g \cos \theta \quad (1)$$

A Tabela 1 ilustra alguns valores de orientação para o coeficiente de rolamento em vários tipos de terrenos verificados experimentalmente.

Tabela 1 - Coeficiente de resistência ao rolamento em diferentes tipos de piso

Tipo de solo	f
Asfalto liso	0,010
Asfalto rugoso	0,011
Cimento rugoso	0,014
Paralelepípedo	0,020
Pedras irregulares	0,032
Pedra britada compacta	0,045
Pedra britada solta	0,080
Terra batida	0,060
Areia solta	0,100 ~ 0,300
Gramma	0,045 ~ 0,100
Barro	0,100 ~ 0,400
Neve Profunda	0,075 ~ 0,300

Fonte: Nicolazzi *et al.* (2012)

Nicolazzi *et al.* (2012) propõe uma orientação para o coeficiente de resistência de rolamento, considerando o efeito da velocidade, que é dado na Equação 2:

$$f = a' + b \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (2)$$

Os coeficientes a e b variam de acordo com o tipo de pneu e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes a e b em função do tipo de pneu

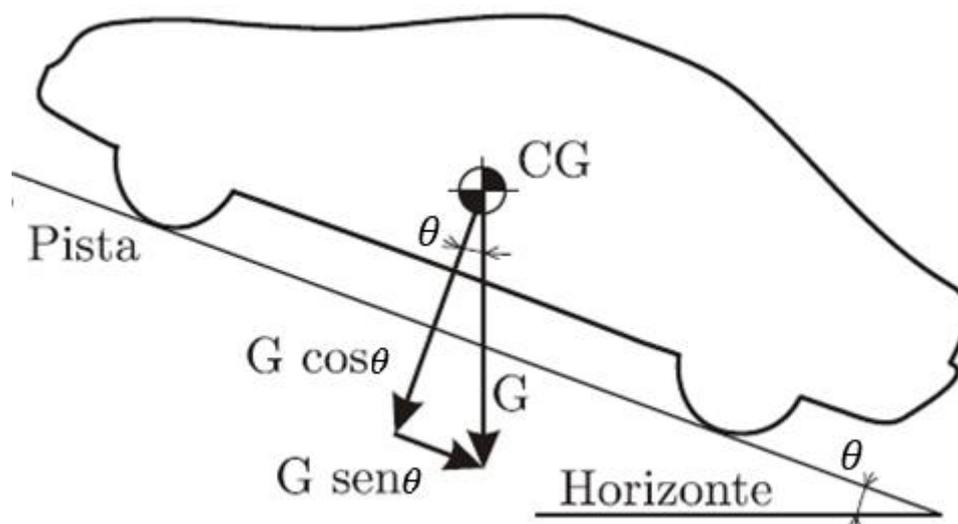
	a'	b
Pneus normais	0,0150	0,052
Pneus de alta histerese	0,0258	0,052

Fonte: Nicolazzi *et al.* (2012)

2.1.2. Efeito do Active

Ao subir ou descer um active, a inclinação da pista faz com que apenas parte do peso do veículo seja absorvida pelo piso, na forma da força normal. O restante do peso faz com que surja uma componente paralela à pista, realizando influencia no movimento do veículo e, quando o veículo está subindo o active, essa influência atua como uma resistência ao movimento conhecida como resistência ao active, mostrada na Figura 1, onde CG é o centro de gravidade do veículo. (NICOLAZZI *et al.*, 2012)

Figura 1 - Representação da força peso agindo sobre o centro de gravidade do veículo em um active



Fonte: Adaptado de Nicolazzi *et al.* (2012)

A força que o veículo precisa vencer para que haja o equilíbrio estático é apresentada na Equação 3:

$$Q_s = m_t g \text{sen}(\theta) \quad (3)$$

Tipicamente, o aclave é dado na forma da porcentagem θ de subida h em relação à distância horizontal percorrida s , sendo, portanto, $\theta = \text{atan}(h/s)$.

Esta força é intermitente e surge apenas quando o veículo percorre um trecho inclinado.

2.1.3. Forças Aerodinâmicas

Quando um corpo se movimenta através do ar, forças são geradas pelo movimento relativo entre o ar e as superfícies do objeto. O estudo destas forças geradas pelo ar, e as suas influências no desempenho do corpo, é chamado de aerodinâmica. (HUCHO, 1987)

Para Nicolazzi *et al.* (2012), devido à distribuição de pressão sobre a superfície livre de um corpo movendo-se no ar, este fica submetido a uma força resultante. Esta força resultante pode ser decomposta nas seguintes componentes:

- Força na direção axial do corpo, conhecida como força de arrasto ou resistência aerodinâmica e o momento em torno desse eixo é denominado momento de rolamento;
- Força na direção vertical, denominada de força de sustentação e o momento em torno desse eixo são conhecidos como momento de guinada;
- Força transversal horizontal à direção do deslocamento do corpo, denominado de efeito de ventos laterais e o momento em torno desse eixo é dito como momento de arfagem.

A força de arrasto, ou resistência aerodinâmica, causada quando um corpo está imerso em um fluido em movimento ou se desloca em relação ao fluido, depende da forma do corpo e é tanto maior quanto maior for a velocidade de deslocamento. (HUCHO, 1998).

Gillespie (1992) afirma que a força de arrasto é a maior e mais importante força aerodinâmica encontrada pelos carros de passageiros a velocidades normais em rodovias.

A definição de um veículo aerodinamicamente bem projetado está intimamente ligada ao seu arrasto. Uma razão para isto é o fato do arrasto influenciar diretamente no consumo de combustível do automóvel. (CASTEJON, 2011). Mesmo assim, embora os primeiros estudos detalhados tenham sido iniciados em 1920, até o dia de hoje a maioria dos carros possuem uma forma que leva a um desperdício de potência da ordem de 30%. (NICOLAZZI *et al.*, 2012).

2.1.3.1. Resistência Aerodinâmica

Nicolazzi *et al.* (2012) afirmam que a resistência aerodinâmica atuante em um veículo é uma das forças mais complexas de ser modelada e tem grande importância na contribuição à resistência total ao deslocamento e, principalmente em velocidades altas, e surge de três fontes distintas:

- **Resistência de forma:** Ocorre devido à geometria do veículo. Um corpo, ao se deslocar no ar produz um turbilhonamento na sua parte posterior, chamado de esteira, na qual os efeitos viscosos controlam completamente o comportamento do escoamento. A esteira, assim como a sua intensidade energética em termos de turbulência e dissipação viscosa depende especialmente da forma do corpo e é tanto maior quanto maior a velocidade de deslocamento do veículo/corpo. Dependendo da forma do corpo é possível evitar o descolamento da camada limite, o que impede a formação de turbulência, até certos valores de velocidade. Ramos (2012) afirma que a teoria de camada limite pode prever o ponto de separação, mas não pode avaliar com precisão a distribuição de pressões, em geral baixas, na região de descolamento. A diferença entre a alta pressão na região frontal e a baixa pressão na região traseira descolada traz uma grande contribuição para o arrasto chamada de arrasto de pressão.

- **Resistência de atrito:** Diz respeito à viscosidade do ar em contato com a superfície externa do veículo, praticamente desprezível para os carros atuais comparado com outros efeitos. Apenas em formas bastante aerodinâmicas é que o atrito do ar passa a ser sensível. Nesses casos, como em aviões ou veículos para recordes de velocidade, o acabamento superficial é de suma importância, exigindo-se assim uma superfície polida, pois a existência de rugosidades na superfície de atrito com o ar reduz a velocidade máxima do veículo;

- **Resistência de correntes:** Na movimentação de um automóvel, sempre irá existir um acoplamento ou interação do campo de escoamento externo (ao veículo) e o campo

de escoamento interno (do veículo), pois é do campo de escoamento externo que é tomado o ar para os diferentes subsistemas de arrefecimento de componentes mecânicos assim como o ar para conforto térmico da cabine de passageiros. Desta forma, devido à penetração do ar no interior do veículo para refrigeração, alimentação e ventilação do habitáculo, o ar perde parte de sua velocidade ao entrar no veículo e, assim, ao sair deve ser acelerado, consumindo, portanto, potência do veículo. As perdas por efeito de circulação do ar dentro do veículo, seja no motor ou no habitáculo, contribuem com 1 a 10% da resistência total, dependendo do veículo.

A resistência aerodinâmica é dada, considerando os três efeitos conjuntamente, pela Equação 4:

$$Q_A = \frac{1}{2} \rho v^2 C_x A_f \quad (4)$$

Sendo positiva quando é no mesmo sentido do deslocamento do veículo e negativa quando é contrária ao movimento.

2.1.3.2. Coeficiente de Arrasto

O coeficiente de arrasto aerodinâmico C_x , serve de medida para a aerodinâmica de um corpo e é determinado experimentalmente. Em seu valor estão considerados a influência de forma, do acabamento superficial e do fluxo necessário para refrigeração do motor e ventilação do interior do carro. Quanto menor o seu valor, tanto menor a resistência do ar. (NICOLAZZI *et al.*, 2012).

Para Barnard (2009), é útil ter algum meio simples de comparar o arrasto aerodinâmico produzido por diferentes formas de veículos, independente do seu tamanho ou da velocidade de condução. Isso é convenientemente fornecido pelo coeficiente de arrasto, que é principalmente dependente da forma do veículo.

Infelizmente, embora o coeficiente de arrasto dependa principalmente da forma do veículo, também é dependente de outros fatores, tais como as propriedades de turbulência do fluxo e o número de Reynolds. A dependência com o número de Reynolds significa que o coeficiente de arrasto varia com a velocidade. Porém, felizmente, ao longo de uma faixa normal de velocidades de um veículo rodoviário, as mudanças são normalmente insignificantes, e o C_x

pode ser tratado como se fosse uma constante. Apenas em teste em túneis de vento que a variação do C_x com o Reynolds é importante. (BARNARD, 2009).

Genta (2006) afirma que o coeficiente de arrasto C_x , é determinado experimentalmente por testes em túneis de vento ou testes de *coast-down*. Hoje em dia as simulações em CDF (*Computational Fluid Dynamics*) também se mostram muito eficientes.

Atualmente os testes em túneis de vento fechado ainda retornam resultados mais confiáveis do que os obtidos através de CFD no meio automotivo. Porém, segundo Hucho (1998), para que os testes em túneis de vento sejam precisos com a aproximação do ambiente real, algumas fontes de erros devem ser contornadas, como os efeitos de escala com o número de Reynolds, que impõe que para testar um veículo em escala, a velocidade do escoamento no túnel de vento deve ser multiplicada pelo número de vezes que o veículo é reduzido para que o Reynolds seja mantido. Por isso, geralmente, os veículos são testados em tamanho real, fazendo com que seja necessário observar o efeito da interferência na obstrução das paredes com o veículo testado para não alterar o escoamento em torno do automóvel. Outro ponto está associado à velocidade relativa da pista com o veículo, pois no túnel de vento a pista não se movimenta em relação ao que está sendo testado.

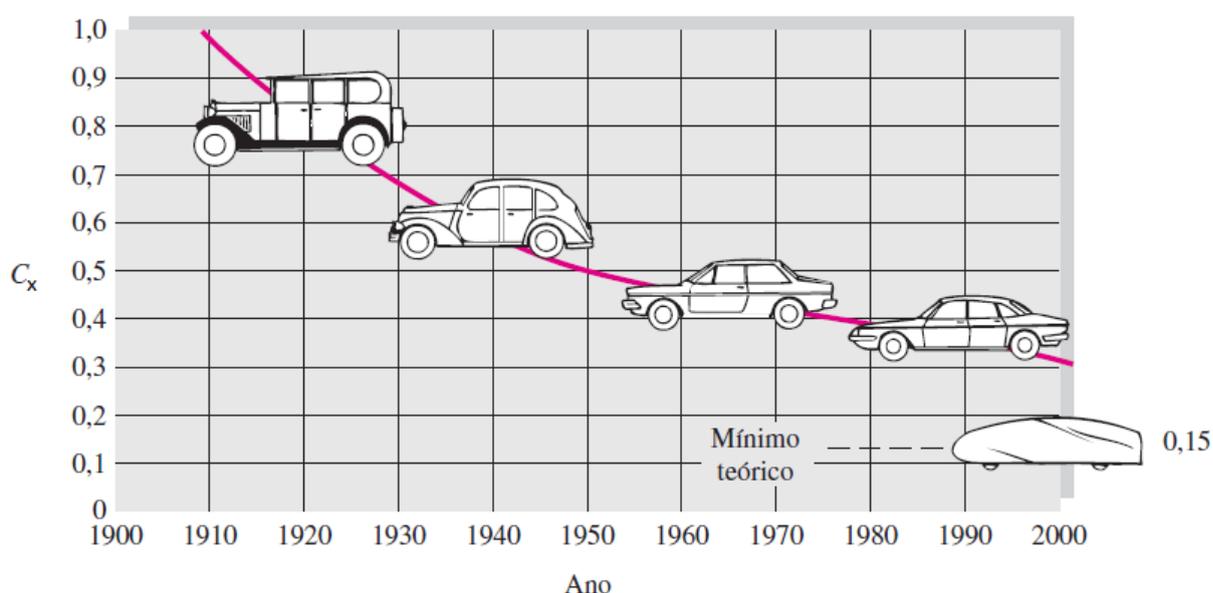
Com isso os custos operacionais dos túneis de vento acabam sendo muito elevados, surgindo necessidade da evolução dos estudos de códigos computacionais que permitam simular com maior facilidade os esforços aerodinâmicos e com menor custo.

A simulação computacional, que tem função de transformar o mundo real em computacional, consiste na divisão do volume de controle e da superfície do modelo em inúmeros volumes infinitesimais. Sobre tais volumes, constituídos por poliedros, são aplicados cálculos numéricos para solucionar as equações de Navier-Stokes (equação da Continuidade, Conservação do Momento e da Energia), determinando-se a pressão e os esforços aerodinâmicos em cada célula geométrica com formato definido (DO VALE JUNIOR, TEIXEIRA; FERREIRA, 2015).

Através de técnicas como diferenças finitas, volumes finitos ou elementos finitos, as características nas superfícies e no interior de cada um dos volumes infinitesimais são analisadas e tomadas como um todo, de forma a determinar os esforços aerodinâmicos aplicados sobre o protótipo. Este processo de discretização é de fato o grande desafio na simulação computacional. (CASTEJON, 2011). A grande vantagem da utilização do CFD é na diminuição das tentativas e erros dos estudos que somente utilizam túneis de vento, sendo assim, são largamente utilizados em conjunto.

Com a melhoria nas técnicas de obtenção do coeficiente de arrasto e também com o conhecimento de novas técnicas de otimização aerodinâmica, as formas mais aerodinâmicas dos carros tem trazido um grande decréscimo em seu coeficiente de arrasto, como mostra a Figura 2. Os carros modernos têm um coeficiente de arrasto médio em torno de 0,30. Como a área frontal também diminuiu significativamente, a força de arrasto bruta real sobre os carros diminuiu ainda mais. A Figura 2 também nos mostra o mínimo teórico de $C_x = 0,15$, para um veículo de passeio de quatro rodas. Porém valores menores são possíveis para veículos experimentais. (WHITE, 2011)

Figura 2 - Evolução do coeficiente de arrasto dos veículos ao longo dos anos.



Fonte: White (2011).

2.1.4. Efeito da Inércia

Sabe-se através da Segunda Lei de Newton que, para que um corpo tenha seu estado de movimento alterado, seja em repouso ou em movimento, é necessário imprimir a ele uma força.

Em um automóvel, que é um conjunto de inércias em translação e rotação, para conhecer as forças que devem ser aplicadas a fim de variar sua velocidade, deve ser levado em conta, além das massas em translação, as inércias rotativas. Isso porque as inércias rotativas são submetidas a acelerações angulares proporcionais a linear e, em função das relações de transmissão da caixa e do diferencial, podem ser responsáveis por uma grande parcela de

consumo de força, conseqüentemente potência, durante a aceleração de um automóvel. (NICOLAZZI *et al.*, 2012)

2.1.4.1. Massas em Translação

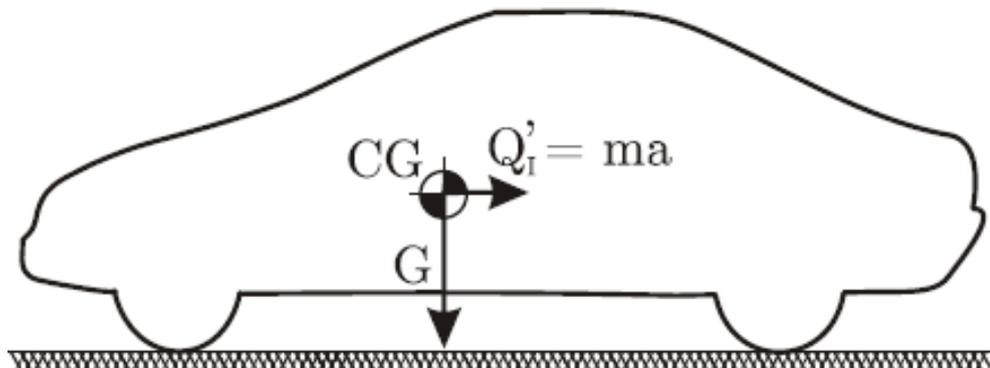
Sabe-se da dinâmica que para acelerar uma massa " m " em uma quantidade " a " é necessário aplicar uma força, dada por Equação 5:

$$F = ma \quad (5)$$

Esta força, que deve ser colocada à disposição do veículo pelo motor, corresponde a resistência de inércia de translação, mostrada na Figura 3, dada por Equação 6:

$$Q'_I = ma \quad (6)$$

Figura 3 - Inércia de translação de um veículo



Fonte: Nicolazzi *et al.* (2012).

2.1.4.2. Massas em Rotação

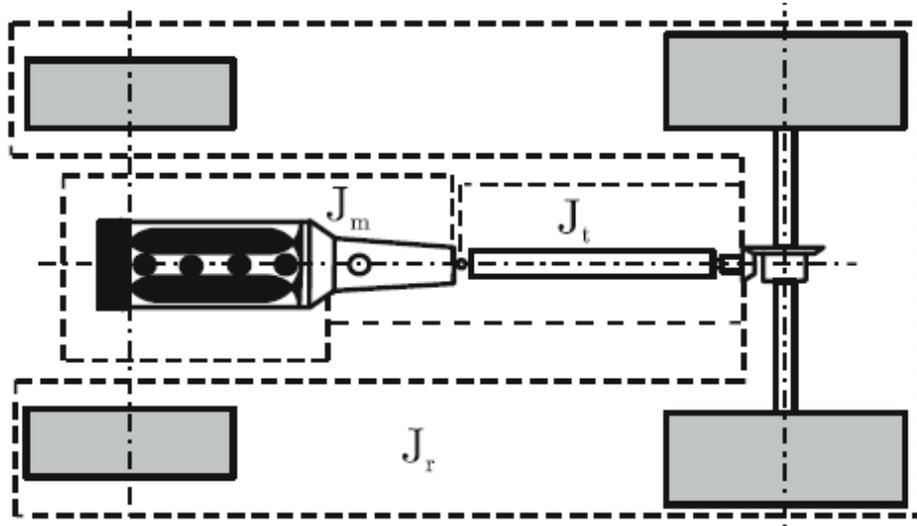
Para causar uma aceleração angular, α [rad/s^2], em uma inércia rotacional, J [kg/m^2], é necessário aplicar-se um momento dado por Equação 7:

$$M = J\alpha \quad (7)$$

Ao longo da cadeia de transmissão de potência do motor para as rodas, são considerados três grupos de inércias rotacionais, agrupados de acordo com a sua velocidade de

rotação: inércia do motor, inércia da transmissão e inércia das rodas, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Inércias Rotativas de um Veículo



Fonte: Nicolazzi *et al.* (2012).

Como existem diferentes tipos de inércias rotacionais, a Equação 7 não pode ser utilizada diretamente. Nicolazzi *et al.* (2012) apresenta uma equação que define a inércia rotativa total nas rodas em função da soma das parcelas do motor, da caixa e das rodas, mostrada na Equação 8 abaixo:

$$J = J_r + i_d^2(J_t + i_c^2 J_m) \quad (8)$$

Para obter a resistência equivalente à de inércia no ponto de contato com o solo, é necessário dividir o momento dado pela Equação 7, pelo raio dinâmico do pneu, como mostrado na Equação 9:

$$Q_i'' = \frac{J\alpha}{r_d} \quad (9)$$

Nicolazzi *et al.* (2012) define o dinâmico do pneu como sendo:

- Raio dinâmico (r_d): é definido a partir da distância percorrida em um giro do pneu, na condição de carga máxima admissível, com a velocidade padrão de 60 km/h.

Para uma primeira aproximação, o autor sugere usar a seguinte relação empírica mostrada abaixo para definir o raio dinâmico do pneu Equações 10 e 11:

$$r_e = 0,47D \quad (10)$$

$$r_d = 1,02r_e \quad (11)$$

Sabe-se que a relação entre a aceleração angular e linear, de uma roda no ponto de contato com o solo é o produto do raio dinâmico pela velocidade angular. Assim, a Equação 7 pode ser reescrita, resultando na Equação 12:

$$Q_i'' = \frac{Ja}{r_d^2} \quad (12)$$

2.1.4.3. Superposição dos Efeitos

A resistência total da aceleração é então dada pela soma das inércias de translação e da de rotação, como na Equação 13:

$$Q_I = Q_i' + Q_i'' \quad (13)$$

Ou, na Equação 14:

$$Q_I = ma\left(1 + \frac{J}{mr_d^2}\right) \quad (14)$$

Para facilitar o uso dessa expressão, Nicolazzi *et al.* (2012) define o coeficiente “ δ ” como fator de massa equivalente às inércias de rotação, e seu valor é mostrado na Equação 15:

$$Q_I = ma(1 + \delta) \quad (15)$$

Sendo Equação 16:

$$\delta = \frac{J}{mr_d^2} \quad (16)$$

A inércia equivalente representa o acréscimo da massa do veículo devido a necessidade de acelerar as inércias rotativas. Em primeira marcha pode chegar a 50%, da massa total do veículo, diminuindo para aproximadamente 5% nas marchas mais elevadas.

Uma boa estimativa de δ , para o anteprojeto de um automóvel, é dada na Equação 17:

$$\delta = 0,004 + 0,05i_{c_j}^2 \quad (17)$$

2.1.5. Resistência Mecânica

Segundo Nicolazzi *et al.* (2012), a potência gerada no motor deve ser transmitida às rodas motrizes para que o veículo possa efetivamente fazer uso dela. Essa potência gerada sempre será maior do que a entregue às rodas motrizes, pois neste percurso existem vários elementos mecânicos sujeitos ao atrito que irão consumir parte da mesma. Com isso, podemos afirmar que a resistência mecânica é considerada como toda e qualquer perda que ocorra entre o volante do motor e os mancais das rodas motrizes. Nesse valor estão incluídas perdas na caixa de câmbio, no diferencial, nos mancais e em outros pontos.

Uma maneira bastante simples de considerar as perdas é pelo uso do conceito do rendimento da transmissão de força, desde o motor até o eixo das rodas, aplicando a seguinte equação empírica Equação 18:

$$P_C = P_e \eta_m \quad (18)$$

Como a potência efetiva do motor é a soma das potências no cubo e a perda na transmissão, pode-se escrever que Equação 19:

$$P_m = (1 - \eta_m)P_e \quad (19)$$

O rendimento mecânico da transmissão de automóveis está, em geral, na faixa de 0,84 a 0,93, variando conforme as soluções construtivas que foram adotadas e com a marcha que está sendo utilizada. Para alguns tipos de câmbios, onde há uma marcha direta e não ocorre transmissão de força através das engrenagens da caixa de câmbio, e tem-se, nesta marcha, o maior o rendimento da transmissão.

2.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA TOTAL AO DESLOCAMENTO

A resistência total ao deslocamento é definida como sendo a soma de todas as forças resistivas expostas anteriormente, porém, para a modelagem proposta foi apenas levado em conta o comportamento longitudinal do veículo, excluindo para o objetivo deste trabalho a força de resistência aerodinâmica lateral, força de sustentação e perdas laterais como inclinação transversal da pista, pequenos ângulos de esterçamento, deriva dos pneus e vento transversal ao sentido de deslocamento.

Outra consideração é que, tipicamente, as perdas na transmissão são modeladas como uma eficiência global do sistema, que causa uma redução da potência disponível nas rodas, em comparação com a potência fornecida pelo motor e está contida na Resistência Mecânica.

Porém na formulação aqui apresentada, as perdas na transmissão são consideradas acopladas ao coeficiente de atrito dos pneus, representada por f_t . Essa adaptação da formulação não é ideal, pois considera que as perdas na transmissão variam significativamente com a massa translacional do veículo e com a inclinação da pista. Contudo, o veículo elétrico, alvo dos ensaios, não permite desacoplar a transmissão e a medição das perdas isoladas exigiria um conjunto de testes específicos que estão fora dos objetivos deste trabalho, já que resultados dos ensaios se provaram suficientemente satisfatórios mesmo com esta aproximação.

Com isso, as perdas mecânicas estão contidas no coeficiente de resistência ao rolamento, então, a resistência mecânica é desconsiderada no equacionamento das resistências totais, resultando na Equação 20:

$$F_m = Q_R + Q_S + Q_A + Q_I \quad (20)$$

Fazendo a substituição dos termos das resistências por suas respectivas formulações anteriormente apresentadas, obtemos Equação 21:

$$F_m = f_t m_t g \cos\theta + m_t g \sin\theta + \frac{1}{2} \rho v^2 C_x A_f + ma(1 + \delta) \quad (21)$$

Dos parâmetros dos quais as equações das forças resistivas dependem, quase todos podem ser determinados a partir de medições diretas ou relações com outros parâmetros, sem depender de testes específicos para isso, facilitando a obtenção de cada termo.

Para as condições dos testes realizados (curta duração, condições atmosféricas aproximadamente constantes, condições de carregamento aproximadamente constantes,

velocidades bastante abaixo da velocidade limite dos pneus, condições da pista uniforme ao longo dos ensaios), pode-se considerar que tanto as perdas nos pneus quanto as perdas na transmissão provocadas pelo atrito nos rolamentos, perdas viscosas, perdas por bombeamento na caixa de transmissão, que são dificilmente modeladas, são pequenas o suficiente para que seja aproximado como constante sem afetar a confiabilidade do teste.

2.3. TESTES DE DESACELERAÇÃO LIVRE NO PLANO E ACELERAÇÃO LIVRE EM RAMPA

2.3.1. ABNT NBR 10312:2014 – Veículos rodoviários automotores leves – determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro.

O teste de desaceleração livre no plano (*coast-down*), normatizado pela ABNT NBR 10312:2014, consiste na obtenção dos parâmetros de coeficiente de resistência aerodinâmica, C_x , e coeficiente de resistência ao rolamento, f , para determinação das resistências aerodinâmicas e de rolamento do veículo.

Para isso, a norma determina que o veículo deve ser acelerado a uma velocidade igual ou superior a 105 km/h e desacoplar o sistema de transmissão do motor, mudando o câmbio para a posição neutra, para que o automóvel possa iniciar a desaceleração livre, sem interferências dos freios até que atinja velocidade igual ou inferior a 30 km/h. Esse processo deve ser repetido por 10 desacelerações em pares com sentidos opostos (ida e volta).

Após coletados os dados conforme mencionados, é proposto pela ABNT NBR 10312:2014 um tratamento estatístico das informações baseado nos tempos que o veículo leva para percorrer intervalos de desaceleração de 10 km/h, de onde são obtidos os coeficientes f_0 e f_2 , que dependem da massa equivalente do veículo M_e . Esses coeficientes estão na equação genérica de forças resistivas ao deslocamento do veículo em função da velocidade, mostrada na Equação 22:

$$F_R = f_0 + f_2 v^2 \quad (22)$$

Para determinar os coeficientes de força é proposto a elaboração de uma tabela, representada pela Tabela 3, com os valores dos instantes e velocidades extraídos a partir da curva de desaceleração do veículo registrada em pista. As Equações 23 e 24 apresentam a

formulação para obtenção dos coeficientes f_0 e f_2 , para o k-ésimo ensaio, como mostrado a seguir:

$$f'_{0,k} = \left[\frac{DA - CE}{(n-1)D - C^2} \right] M_e \quad (23)$$

$$f'_{2,k} = \left[\frac{(n-1)E - CA}{(n-1)D - C^2} \right] M_e \quad (24)$$

Tabela 3 - Demonstração das equações para o cálculo das variáveis A , B , C , D e E necessárias para a obtenção dos coeficientes f_0 e f_2

Pontos de Medição	Instante	Velocidade	Aceleração média no intervalo	Velocidade média no intervalo	Velocidade média no intervalo elevada ao quadrado	Velocidade média no intervalo elevada à quarta potência	Velocidade média ao quadrado multiplicada pela aceleração média no intervalo
	[s]	[m/s]	[m/s ²]	[m/s]	[m/s] ²	[m/s] ⁴	[m ² /s ³]
	t_i	V_i	$a_i = \frac{V_{(i+1)} - V_i}{3,6 \times \Delta t}$	$\bar{V}_i = \frac{V_{(i+1)} + V_i}{2 \times 3,6}$	\bar{V}_i^2	\bar{V}_i^4	$a_i \bar{V}_i^2$
0	0	V_0	-	\bar{V}_0	\bar{V}_0^2	\bar{V}_0^4	$a_0 \bar{V}_0^2$
1	t_1	V_1	a_1	\bar{V}_1	\bar{V}_1^2	\bar{V}_1^4	$a_1 \bar{V}_1^2$
2	t_2	V_2	a_2	\bar{V}_2	\bar{V}_2^2	\bar{V}_2^4	$a_2 \bar{V}_2^2$
3	...	...	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...	...	...
...
...
...
n-1	t_{n-1}	V_{n-1}	a_{n-1}	\bar{V}_{n-1}	\bar{V}_{n-1}^2	\bar{V}_{n-1}^4	$a_{n-1} \bar{V}_{n-1}^2$
			$A = \Sigma a_1$	$B = \Sigma \bar{V}_i$	$C = \Sigma \bar{V}_i^2$	$D = \Sigma \bar{V}_i^4$	$E = \Sigma a_i \bar{V}_i^2$

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 10312:2014

Para se corrigir os coeficientes encontrados para as condições padrões a norma ABNT NBR 10312:2014 sugere as seguintes Equações 25 e 26 abaixo:

$$f_0 = f'_{0,k} [1 + K_T (T - T_0)] \quad (25)$$

$$f_2 = \frac{P_0 T}{P T_0} (f'_{2,k} - K_p f'_{0,k}) + K_p f_0 \quad (26)$$

Ainda segundo a norma ABNT NBR 10312:2014, a pista de rolamento para a realização do ensaio deve ser reta, plana, isenta de irregularidades, limpa e seca, podendo haver um desnível máximo de 1,5% considerando o trecho inicial e final a serem realizadas as medições. Durante o ensaio o veículo não deve alterar sua trajetória (mudar de faixa de rolamento). Caso seja necessário, a mudança de uma faixa para outra deve ser feita em um espaço de pelo menos 500 metros. As desacelerações devem ser executadas, além da alavanca de mudança de marchas na posição neutra, o pedal de embreagem, quando existente, deve estar não acionado.

Condições ambientais mínimas e máximas também são exigidas por norma, mesmo essa fornecendo correções para as condições padrões de ensaio. A velocidade do vento, a ser medida a uma altura de $0,70 \text{ m} \pm 0,05 \text{ m}$, a cada período de desaceleração não deve apresentar média superior a $3,0 \text{ m/s}$ e picos superiores a $5,0 \text{ m/s}$, e a componente transversal à pista de rolamento não deve ser superior a 2 m/s . A temperatura ambiente deve estar compreendida entre 5 a 35°C , à sombra. A temperatura considerada padrão para a correção dos resultados é de 20°C . Já a pressão atmosférica deve estar compreendida entre 91 kPa e 104 kPa e a pressão considerada padrão para a correção dos resultados é de $101,325 \text{ kPa}$. O veículo deve ser ensaiado com todas as janelas fechadas, ar-condicionado desligado e os dutos de ventilação fechados. Outros requisitos são que o veículo a ser ensaiado deva estar amaciado e com um mínimo de 3000 km rodados e os pneus devem apresentar profundidade dos sulcos entre 90 a 50% da profundidade inicial. A pressão dos pneus deve ser calibrada de com as recomendações do fabricante (ABNT NBR 10312:2014).

A norma propõe também que a massa equivalente do veículo seja sua massa em ordem de marcha acrescida de 3% e somada a 136 kg , resultando na Equação 27:

$$M_e = m_v(1 + 3\%) + 136 \quad (27)$$

Esta imposição independe do carregamento e inércia equivalente reais. Estes valores não são necessariamente aplicáveis ao veículo nas condições reais de teste, pois os integrantes e equipamentos podem não somar os 136 kg determinados para carga ou o fator de massa pode não ser 3% da massa em ordem de marcha do veículo. A massa do veículo e a massa transportada são facilmente medidas, mas a inércia equivalente precisa ser determinada de forma independente para que a força resistiva possa ser calculada para cada intervalo de desaceleração usando a formulação dos coeficientes.

2.3.2. Desaceleração livre no plano (*coast-down*)

O ensaio de desaceleração livre no plano (*coast-down*) é normatizado conforme já comentado. Porém, a obtenção dos parâmetros (C_x e f) podem ser obtidos de forma diferente da norma. O modelo proposto por Nicolazzi *et al.* (2012) é o de desacelerações em torno de uma velocidade de referência, com as acelerações calculadas em função do tempo que o veículo leva para variar a velocidade em torno dos limites do intervalo. São tomadas duas velocidades, com suas respectivas desacelerações, pois o modelo precisa ser capaz de resolver um sistema de duas incógnitas (C_x e f) simultaneamente. A curva de desaceleração é quadrática, mas aproximadamente linear para os intervalos analisados, por isso a aceleração, na forma da Equação 28:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (28)$$

Neste modelo, as únicas forças atuando no movimento são a inércia (que tende a manter a quantidade de movimento) e as resistências aerodinâmica e de rolamento dos pneus e transmissão (que tendem a desacelerar o veículo), já que o ensaio é feito no plano, resultando nas Equações 29 e 30 a seguir:

$$Q_I + Q_A + Q_R = 0 \quad (29)$$

$$M_{e_j} a_i + \frac{1}{2} \rho_j A_f C_x v_i^2 + m_{t_j} g f = 0 \quad (30)$$

Onde o subíndice j caracteriza que os parâmetros devem ser medidos ou considerados constantes para um ensaio e o subíndice i determina o instante do ensaio nos quais são tomadas a aceleração a_i a uma determinada velocidade de referência v_i . Esta equação será aplicada no modelo de análise típico do *coast-down*, envolvendo duas velocidades de referência, para determinar C_x e f .

2.3.3. Aceleração livre em rampa

Santos (2012) propõe uma metodologia de ensaio para obtenção do coeficiente de resistência ao rolamento de um veículo de elevada eficiência que consiste em permitir a aceleração livre do veículo, a partir do repouso, no início de uma rampa, lendo a velocidade ao longo do tempo e terminando numa cota mais reduzida, percorrendo esse caminho reto sem que haja ação de qualquer força exterior se não a da gravidade.

No modelo de aceleração livre devido a inclinação da rampa, não há força motriz aplicada, assim como no ensaio de *coast-down*. O efeito de aclave é responsável pela geração de quantidade de movimento e as forças de atrito dos pneus, aerodinâmica e inércia são resistências ao movimento, como mostrado na Equação 28:

$$Q_S + Q_A + Q_R + Q_I = 0 \quad (31)$$

Ao final de uma distância estabelecida é possível comparar a velocidade calculada que seria de esperar através do balanço energético de todas as forças que atuam no veículo, mostrado na Equação 29, nos pontos de velocidade zero (i_{inicial}) e velocidade máxima (i_{final}) da pista com a velocidade verificada experimentalmente. Após ser atingido este ponto do cálculo há que fazer variar o coeficiente de resistência ao rolamento dos pneus de modo a que a diferença média quadrática entre a velocidade esperada e a velocidade verificada seja mínima.

$$m_{t_j} g \sin(\theta_j) + \frac{1}{2} \rho_j C_x A_f v_i^2 + m_{t_j} g \cos(\theta_j) f + M_{e_j} a_i = 0 \quad (32)$$

Onde o subíndice j representa os dados constantes ao longo do ensaio e o subíndice i indica o instante no ensaio.

A inclinação da pista deve ser medida neste caso, pois, ao contrário do ensaio de *coast-down*, o efeito do aclave gera a quantidade de movimento para o teste, que tem a inércia, perdas aerodinâmicas e de rolamento dos pneus como resistências.

No trabalho de Santos (2012), também é analisado o perfil de rugosidade da pista, sua inclinação transversal e longitudinal, inércias e perdas no sistema de transmissão para calcular o coeficiente de atrito dos pneus através de um modelo bastante complexo. Neste caso, as inércias rotacionais e perdas na transmissão foram medidas previamente com os sistemas em bancada, o que foge da proposta deste trabalho de buscar testes simples de baixo custo com bons resultados que possam ser realizados com o veículo em sua configuração final.

3. METODOLOGIA

O estudo foi baseado no modelo proposto por Nicolazzi *et al.* (2012) que considera os efeitos das forças que atuam sobre um veículo em movimento através da curva de velocidades ao longo do tempo de um veículo em desaceleração livre no plano (*coast-down*), respeitando as condições de ensaio da norma ABNT NBR 10312:2014, e aceleração livre em rampa, através da metodologia proposta por Santos (2012), resolvendo iterativamente as soluções para o coeficiente de resistência aerodinâmica, C_x , e o coeficiente de resistência ao rolamento e perdas na transmissão, f_t , obtidas pela formulação para o ensaio de *coast-down* com o fator de massa, δ , calculado a partir da formulação para a aceleração livre em rampa.

Os ensaios foram elaborados para permitirem avaliar o comportamento dos sistemas em campo e serem realizados com o veículo completo, de forma que a análise permitisse isolar os parâmetros de interesse sem que os ensaios para sua determinação fossem isolados em si.

Essas duas referências, e a iteração entre as elas, que é o objetivo desse trabalho, serão explicitadas nesse capítulo.

3.1. DESACELERAÇÃO LIVRE NO PLANO (*COAST-DOWN*)

Para que o teste de determinação da resistência total ao deslocamento de um veículo, ou teste *coast-down* seja válido, este deve seguir rigorosamente as exigências proposta pela norma ABNT NBR 10312:2014.

Como a norma estabelece, o veículo deve ser acelerado a uma velocidade igual ou superior a 105 km/h e iniciar a desaceleração livre. Quando atingir 100 km/h, inicia-se as medições de tempo em intervalos iguais de velocidade de 10 km/h, até que o veículo atinja 30km/h. Devem ser efetuados pelo menos cinco ensaios em cada sentido da pista de rolamento.

No ensaio de desaceleração livre no plano, os parâmetros de interesse que devem ser obtidos são os coeficientes de arrasto aerodinâmico C_x e o de atrito dos pneus e perdas na transmissão f_t . Aplicando a Equação 30, que descreve as forças que agem sobre o veículo no ensaio de *coast-down*, a duas velocidades diferentes ao longo da curva de desaceleração global ou aos dois intervalos do ensaio fracionado, conforme mostrado nas Equações 33 e 34:

$$M_{e_j} a_{i-1} + \frac{1}{2} \rho_j A_f C_x v_{i-1}^2 + m_{t_j} g f_t = 0 \quad (33)$$

$$M_{e_j} a_i + \frac{1}{2} \rho_j A_f C_x v_i^2 + m_{t_j} g f_t = 0 \quad (34)$$

Agora, se isolarmos f_t nas Equações 33 e 34, e igualarmos as duas, podemos obter C_x , conforme representado pelas Equações 35 e 36:

$$\frac{M_{e_j} a_{i-1} + \frac{1}{2} \rho_j A_f C_x v_{i-1}^2}{m_{t_j} g} = \frac{M_{e_j} a_i + \frac{1}{2} \rho_j A_f C_x v_i^2}{m_{t_j} g} \quad (35)$$

Então, isolando C_x obtemos:

$$C_x = \frac{2M_{e_j}}{\rho_j A_f} \left(\frac{a_{i-1} - a_i}{v_i^2 - v_{i-1}^2} \right) \quad (36)$$

Analogamente, a partir das Equações 33 e 34, se isolarmos C_x e igualarmos as duas, podemos obter f_t , conforme representado pelas Equações 37 e 38:

$$-\frac{M_{e_j} a_{i-1} + m_{t_j} g f_t}{\frac{1}{2} \rho_j A_f v_{i-1}^2} = -\frac{M_{e_j} a_i + m_{t_j} g f_t}{\frac{1}{2} \rho_j A_f v_i^2} \quad (37)$$

Isolando f_t na Equação 37, obtemos:

$$f_t = \frac{M_{e_j}}{m_{t_j} g} \left(\frac{a_{i-1} v_i^2 - a_i v_{i-1}^2}{v_{i-1}^2 - v_i^2} \right) \quad (38)$$

No ensaio de *coast-down*, serão calculados os valores de C_x e f_t para todos os pares de velocidades no intervalo de desaceleração e tomadas as médias dos valores obtidos. As velocidades v_i do ensaio de *coast-down* são as velocidades médias do intervalo (95 km/h para o intervalo de 100 km/h a 90 km/h, 85 km/h para o intervalo de 90 km/h a 80 km/h, etc.) e a aceleração a_i é aceleração, em função do tempo, para reduzir os 10 km/h do intervalo em torno de v_i .

3.2. ACELERAÇÃO LIVRE EM RAMPA

No modelo de aceleração livre, devido a inclinação da rampa, não há força motriz aplicada, assim como no ensaio de *coast-down*. O efeito de alicive é responsável pela geração

de quantidade de movimento, o que acaba sendo equivalente a uma força motriz, e as forças de atrito dos pneus, aerodinâmica e inércia são resistências ao movimento. Diferentemente do modelo de *coast-down*, não serão usadas duas velocidades na análise proposta, pois o objetivo do teste de aclave é obter o fator de inércia de translação equivalente à de rotação δ a partir dos outros parâmetros, resultando em apenas uma variável a ser determinada, que está implícita na massa equivalente M_e na formulação das forças no aclave através da Equação 39:

$$M_{e_j} = m_v(1 + \delta) + m_{p_j} + m_{L_j} \quad (39)$$

Portanto a formulação do aclave apresentada através da Equação 32 passa a ser a Equação 40:

$$m_{t_j}g \sin(\theta_j) + \frac{1}{2}\rho_j C_x A_f v_i^2 + m_{t_j}g \cos(\theta_j) f_t + [m_v(1 + \delta) + m_{p_j} + m_{L_j}] a_i = 0 \quad (40)$$

Se isolarmos o fator de massa δ , obtemos a Equação 41 que resulta na variável desejada:

$$\delta = \frac{[m_{t_j}g(\sin\theta_j + \cos\theta_j f_t) + \frac{1}{2}\rho_j C_x A_f v_i^2]}{m_v a_i} - \left(\frac{m_{p_j} + m_{L_j}}{m_v}\right) - 1 \quad (41)$$

Lembrando que $m_{t_j} = m_v + m_{p_j} + m_{L_j}$.

3.3. METODOLOGIA ITERATIVA DE DESACELERAÇÃO LIVRE EM ESTRADA PLANA E DE ACELERAÇÃO LIVRE EM RAMPA

A metodologia proposta nesse trabalho foi pensada pois existem alguns impedimentos nas metodologias já existentes. A análise do *coast-down* pela norma ABNT NBR 10312:2014, por exemplo, considera uma massa equivalente fixa estimada em 3% da massa do veículo para testes, que é a massa do veículo em ordem de marcha somada a 136 kg para considerar ocupantes e equipamentos, independentemente do carregamento e inércia equivalente reais. Assim, a inércia equivalente considerada terá valores que não são necessariamente aplicáveis nas condições reais de teste, pois os integrantes e equipamentos podem não somar os 136 kg determinados para carga ou o fator de massa pode não ser 3% da massa em ordem de marcha

do veículo. A massa do veículo e a massa transportada são facilmente medidas, mas a inércia equivalente precisa ser determinada de forma independente para que a força resistiva possa ser calculada para cada intervalo de desaceleração usando a formulação dos coeficientes.

Ou seja, por este método, além de não se conhecerem as inércias rotativas, a resposta dinâmica do veículo não é representada corretamente. O foco principal do ensaio de *coast-down* padronizado é obter a curva de forças resistivas em função da velocidade, na forma $F = f_0 + f_2 v^2$, para determinação da potência de frenagem em um dinamômetro de chassi durante um ensaio de emissões, o que não é a proposta da análise que está sendo desenvolvida.

Já a metodologia de ensaio proposta por Santos (2012) é pretendida para um veículo de elevada eficiência baseada na formulação energética entre dois estados de movimento durante uma aceleração livre ao longo de um plano inclinado, baseada na formulação proposta por Cavalheira (2012). No trabalho, é analisado o perfil de rugosidade da pista, sua inclinação transversal e longitudinal, inércias e perdas no sistema de transmissão para calcular o coeficiente de atrito dos pneus através de um modelo bastante complexo. Neste caso, as inércias rotacionais e perdas na transmissão foram medidas previamente com os sistemas em bancada, o que foge da proposta deste artigo de buscar testes confiáveis de baixo custo que possam ser realizados com o veículo em sua configuração final.

Nesse trabalho objetiva-se validação de uma metodologia de teste proposta por Carioni, Hoeltgebaum e Chierighini (2017) que, de forma iterativa entre as metodologias apresentadas por Nicolazzi *et al.* (2012) e Santos (2012), retorna o valor do coeficiente de resistência aerodinâmica, C_x , o coeficiente de resistência ao rolamento e perdas na transmissão, f_t , e o fator de massa, δ .

A análise iterativa consiste em arbitrar um valor qualquer de δ para a iteração $k = 0$ e, com esse valor, calcular os valores de f_t e C_x a partir da formulação do *coast-down* apresentadas através das Equações 36 e 38. Estes valores serão usados no modelo de aclave para calcular um novo valor de δ através da Equação 41, que será realimentado nas Equações 36 e 38 para obter um novo par de valores para C_x e f_t , e assim sucessivamente até que os resultados convirjam.

Ou seja, do modelo desenvolvido para o *coast-down*, tem-se os coeficientes de arrasto aerodinâmico C_x e de perdas nos pneus e transmissão f_t para a k -ésima iteração de análise, como mostram as Equações 42 e 43, em função dos parâmetros constantes para o ensaio e do valor atual de δ , também na k -ésima iteração. Para iniciar as interações, é atribuído um valor qualquer para δ_k , onde $k=0$. Assim, o modelo se torna:

$$f_{t_k} = \frac{m_v(1 + \delta_k) + m_{p_j} + m_{L_j} \left(\frac{a_{i-1}v_i^2 - a_2v_{i-1}^2}{v_{i-1}^2 - v_i^2} \right)}{m_{t_j}g} \quad (42)$$

$$C_{x_k} = \frac{2 \left[m_v(1 + \delta_k) + m_{p_j} + m_{L_j} \right] \left(\frac{a_{i-1} - a_i}{v_i^2 - v_{i-1}^2} \right)}{\rho_j A_f} \quad (43)$$

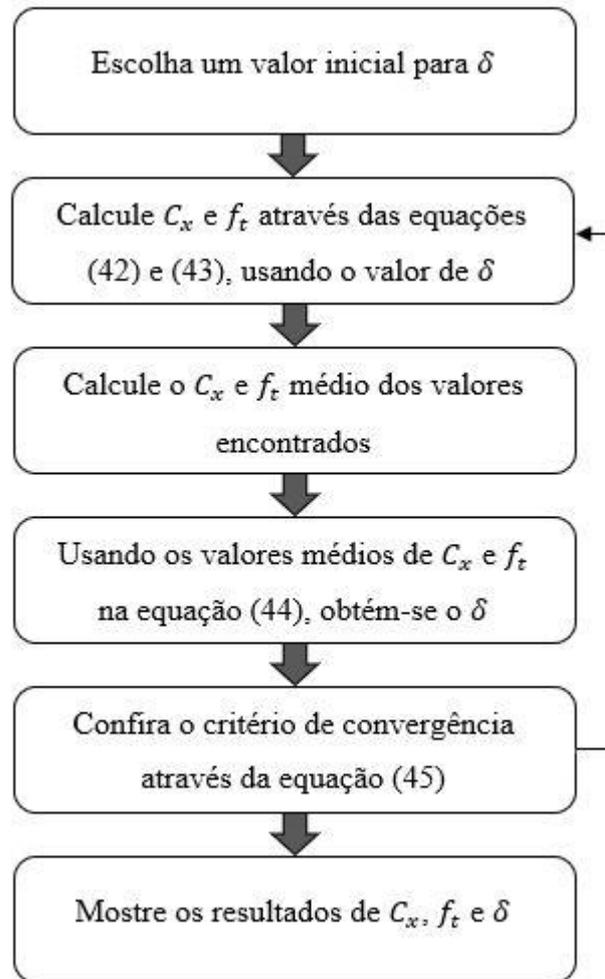
Da formulação do ensaio de aclave e usando os valores atuais de C_x e f_t na k -ésima iteração obtidos nas Equações 42 e 43, obtém-se o novo valor de δ :

$$\delta_{k+1} = \frac{\left[m_{t_j}g(\sin\theta_j + \cos\theta_j f_{t_k}) + \frac{1}{2}\rho_j C_{x_k} A_f v_i^2 \right]}{m_v a_i} - \left(\frac{m_{p_j} + m_{L_j}}{m_v} \right) - 1 \quad (44)$$

Lembrando que a velocidade v_i e aceleração a_i usadas para calcular δ_{k+1} são provenientes do ensaio de aclave e não são as mesmas usadas para calcular C_{x_k} e f_{t_k} , que são os valores médios dos pares de velocidade v_i e v_{i-1} ao longo da desaceleração completa.

Para facilitar o entendimento da metodologia proposta, a Figura 5 apresenta um fluxograma do funcionamento da análise iterativa de uma forma mais intuitiva.

Figura 5 - Fluxograma da análise iterativa



Fonte: Autor

Os critérios de convergência para os três parâmetros de interesse são dados por:

$$\begin{cases} |\delta_k - \delta_{k-1}| < 0,00001 \\ |C_{x_k} - C_{x_{k-1}}| < 0,001 \\ |f_{t_k} - f_{t_{k-1}}| < 0,001 \end{cases} \quad (45)$$

Basicamente, considera-se que os valores convergiram quando não há alteração nos quatro primeiros algarismos significativos dos parâmetros C_x , f_t e δ .

3.4. METODOLOGIA ITERATIVA ALTERNATIVA DE DESACELERAÇÃO LIVRE NO PLANO PARA BAIXAS VELOCIDADES E ACELERAÇÃO LIVRE EM RAMPA

Essa variação da metodologia explicada no tópico anterior foi pensada para ser aplicada no veículo elétrico que é alvo desse trabalho. Como a velocidade máxima do veículo é esperada um pouco acima de 60 km/h na versão homologada para as ruas, foi proposta uma análise de desaceleração livre no plano com a região de análise modificada de 100 km/h a 30 km/h, conforme proposto pela norma, para o intervalo de 60 km/h a 20 km/h. Quando o veículo atingir 60 km/h, inicia-se as medições de tempo em intervalos iguais de velocidade de 10 km/h, até que o veículo atinja 20 km/h. Assim o teste consegue se adequar as condições dinâmicas do veículo elétrico.

Apenas essa modificação foi feita no teste, ou seja, tudo que foi falado anteriormente do método de execução e avaliação da análise iterativa, inclusive a formulação proposta pelas Equações 42, 43 e 44 segue exatamente igual assim como o critério de convergência da Equação 45. A localização dos testes também foi idêntica para que a comparação dos resultados seja válida. O teste em rampa também foi exatamente igual, no mesmo lugar seguindo as mesmas condições.

4. RESULTADOS

A metodologia proposta para os dois tipos de testes e as análises iterativas (segundo a norma e alternativa) dos dados foi validada testando-a com veículos de passeio, pois os parâmetros de interesse estão prontamente disponíveis na literatura. A leitura dos dados de velocidade do veículo foi feita através da rede CAN na porta OBD-II através de um scanner automotivo e os dados foram analisados posteriormente usando a formulação descrita neste trabalho. A seguir, serão mostradas as condições do teste e os resultados obtidos na análise iterativa de desaceleração livre no plano e aceleração livre em rampa seguindo o ensaio proposto pela norma e a forma alternativa proposta.

4.1. CONDIÇÕES DOS TESTES

4.1.1. Desaceleração livre no plano (*coast-down*)

Enquanto o veículo estiver em desaceleração livre, deve estar com as janelas fechadas, entradas de ar para ventilação e ar-condicionado desligados ou inoperantes. Deve também desacoplar o sistema de transmissão, mudando a alavanca de câmbio para a posição neutra. Os freios, assim como o pedal de embreagem, não podem ser acionados. As únicas forças atuando no movimento são a inércia (que tende a manter a quantidade de movimento) e as resistências aerodinâmica e de rolamento dos pneus (que tendem a desacelerar o veículo). Deve-se evitar o esterçamento do volante durante as desacelerações e caso seja necessária à mudança de pista deve-se realizar com distância mínima de 500 metros.

Para isso, o comprimento da pista de rolamento deve ser suficiente para permitir as medições especificadas a pista de testes. Deve ser reta, plana, isenta de irregularidades, limpa e seca. No trecho onde ocorrerão as medições, o desnível do final da pista de rolamento com relação ao início, não pode exceder $\pm 1,5\%$, com variações de até $\pm 0,5\%$.

Diante das exigências mostradas, o ensaio de desaceleração livre no plano foi realizado na Rodovia João Gualberto Soares, no trecho entre o Parque Estadual do Rio Vermelho e o Terminal Lacustre do Rio Vermelho, em Florianópolis, Santa Catarina. Essa escolha foi feita, pois, a pista de ensaio possui extensão de 1,7 km, mostrada em verde e amarelo na Figura 6, com duas porções levemente curvas para atingir a velocidade de início do teste, mostradas em amarelo e pontos de retorno indicados pelas setas azuis.

O trecho da pista de rolamento foi escolhido na execução de testes de desempenho por apresentar longas distâncias de pista reta, boa qualidade de asfalto e os desníveis apresentados estão dentro da tolerância prescrita na norma. Na norma não há exigências da rugosidade do pavimento da pista de rolamento, mas o ideal é evitar pavimentos com rugosidade elevada de modo a influenciar a área de contato entre pneu e pavimento e conseqüentemente nos resultados. O tráfego de veículos deve estar reduzido ou ausente porque serão realizadas dez desacelerações em cada sentido da pista de rolamento para uma mesma direção.

Outro fator na escolha da pista de teste é que possui arvores altas nas laterais, favorecendo a baixa incidência de ventos laterais, conforme mostrado na Figura 7. Isso foi muito positivo, pois a norma exige que a velocidade não pode apresentar média superior a 3 m/s (10,8 km/h) e picos superiores a 5 m/s (18 km/h), sendo medida uma altura de 0,70m da pista de rolamento em cada período de desaceleração. A temperatura ambiente deve estar compreendida entre 5 °C e 35 °C, à sombra e a pressão atmosférica entre 91 kPa e 104 kPa.

O sentido definido como 1 foi na direção Terminal Lacustre - Parque Estadual (sul-norte) e o sentido 2, Parque Estadual -Terminal Lacustre (norte-sul).

Figura 6 - Trecho escolhido para realização do teste de desaceleração livre no plano



Fonte: Adaptado de Google Maps (2017)

Figura 7 – Pista utilizada nos testes de desaceleração livre no plano



Fonte: Google Maps (2017)

Foram feitas desacelerações completas (100-30 km/h) e desacelerações fracionadas (90-70 km/h e 45-35 km/h), conforme estabelecido pela norma, para comparar os resultados por ambos os métodos descritos. Na análise, percebeu-se que a desaceleração completa resultou em valores mais próximos às referências e, por isso, este trabalho tratará apenas da análise das desacelerações entre 100 km/h e 30 km/h.

A cada desaceleração foram recolhidas as respectivas curvas de velocidade em função do tempo, assim como as condições atmosféricas. Os tempos das desacelerações foram coletados em um intervalo de tempo de 0,100 segundos e de velocidade de 1 km/h. Como a norma estabelece que devem ser efetuados pelo menos cinco ensaios em cada sentido da pista de rolamento, foram feitos 10 em cada sentido, e dentre eles, os 5 com o menor desvio padrão nos tempos de desacelerações foram escolhidos. A combinação de testes escolhida foram as passagens 2, 3, 4, 8 e 9.

4.1.2. Aceleração livre em rampa

O segundo ensaio que compõe a análise iterativa é o de aceleração livre em rampa. Para a realização do teste, o veículo deve ser posicionado no ponto de início da rampa de aclive conhecido (é importante esse ponto seja sempre o mesmo) e, com a aquisição de dados

habilitada, deve-se liberar os freios e permitir que o carro acelere livremente até o fim da rampa. Pode-se estabelecer um ponto de frenagem antes do final da rampa, se for necessário. É de se esperar que a variação de velocidade seja linear, com aceleração constante ao longo da rampa, já que o efeito da aerodinâmica, que tornaria a curva quadrática, é pequeno em baixas velocidades.

Para as condições de teste, devem ser cumpridos os mesmos requisitos do ensaio de *coast-down*. Devido ao aclive ser unidirecional, não será possível realizar ensaios nos dois sentidos da rampa para reduzir o efeito do vento e de oscilações na pista.

O ensaio foi realizado na garagem do Shopping Iguatemi, no bairro Santa Mônica em Florianópolis, Santa Catarina, na rampa de saída do estacionamento do primeiro andar. Esse local foi escolhido por apresentar uma rampa longa e com grande inclinação, permitindo maior tempo de aquisição e maior variação de velocidade. Por ser uma rampa de estacionamento, ela tende a ter uma inclinação constante e, por ser coberta, praticamente anula os efeitos de velocidade do vento.

A inclinação da pista foi medida com o aplicativo Angle Pro para iPod, que faz a medição da através dos seus acelerômetros, com precisão de medida de até $\pm 0.3^\circ$ comparando-se o valor lido com o carro no plano e parado na rampa, tomando a diferença entre as duas leituras como a inclinação. É recomendado que se faça mais de uma medição ao longo do comprimento da rampa, para conferir a invariabilidade da inclinação. Podem ser feitas parando o carro no início, no meio e no final da rampa. É importante que o carro esteja completamente parado, para que não haja influências externas sobre o acelerômetro usado na medição.

4.1.3. Veículo e equipamentos utilizados

Para os testes realizados, foi utilizado o veículo da montadora General Motors (Chevrolet), modelo Onix, ano de fabricação 2012, modelo 2013 exibido na Figura 8. Conforme exigido por norma, o veículo apresenta odômetro superior a 3.000 quilômetros, o pneu apresenta utilização de aproximadamente 20000 km e altura média de sulcos entre 50% e 90% em relação a profundidade inicial. Os pneus estão montados em uma roda de aço, sem câmara de ar e com calotas, conforme veio de fábrica.

Figura 8 - Chevrolet Onix utilizado nos testes



Fonte: Autor

Os dados técnicos do veículo são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir:

Tabela 4 - Dados do veículo utilizados nos testes

Ficha Técnica do veículo	
Fabricante	Chevrolet
Modelo	Onix LT 1.4
Ano de Fabricação/Modelo	2012/2013
Dados Mecânicos	
Transmissão	Manual de 5 marchas
Tração	Dianteira
Capacidade do reservatório de combustível	54 litros
Parâmetros do veículo e usados como referência	
Massa do veículo em ordem de marcha (m_v)	1067 kg
Área frontal (A_f)	2,15 m ²
Coefficiente de resistência aerodinâmica (C_x)	0,35
Coefficiente de resistência ao rolamento (f)	0,010-0,015
Inércia Equivalente (δ)	5%-10%
Marca e modelo dos pneus	Goodyear Eagle Sport
Característica dos pneus	185/65 R15 88H
Pressão de Insuflação (dianteiros)	32 Psi
Pressão de Insuflação (traseiros)	32 Psi

Fontes: Adaptado de Manual do Proprietário (2012) e Nicolazzi (2012)

O veículo apresentado realizou os testes com pressão de insuflação dos 4 pneus de acordo com o recomendado de fábrica, de 32 Psi, foi submetido a geometria, balanceamento e alinhamento antes dos testes, teve o volante girado de batente a batente com o veículo em movimento e foi aquecido por pelo menos 30 minutos antes do teste, conforme solicita a norma.

O veículo possui massa em ordem de marcha informada pelo manual de 1067 kg e o tanque de combustível possui capacidade de 54 L, mas estava com 1/3 de gasolina no tanque. Na validação da metodologia utilizando veículos, foi utilizada a massa em ordem de marcha constada no manual, sem levar em conta a variação de massa decorrente do consumo de combustível.

A massa total do veículo em translação é importante para o modelo de análise e deve ser determinada anteriormente ao ensaio. É composta pela massa do veículo, dos ocupantes e dos equipamentos utilizados no momento do teste. O modelo de análise é feito em função da inércia equivalente δ , para eliminar o uso da massa m_t em cada formulação, sempre que possível.

Nos testes, deve-se saber a massa do veículo m_v . A massa m_v só deve variar caso haja alguma alteração no veículo que cause alteração da sua massa, que não foi o caso. Caso contrário, não é necessário que se faça essa pesagem a cada ensaio.

A massa dos ocupantes m_p deve ser determinada antes do ensaio, pesando os ocupantes com seus itens pessoais (carteira, celular, relógio, água, etc), excluindo-se equipamentos utilizados para o ensaio.

Deve-se também listar os equipamentos levados a bordo do veículo durante os testes (computador, caderno de anotações, etc) para que sejam pesados antes ou depois dos ensaios. A massa m_L resultante dessa medição será tipicamente pequena e irrelevante para a inércia do veículo, mas é uma fonte de erros que pode ser eliminada facilmente por este processo.

Finalmente, a massa translacional total do veículo é dada pela soma das massas listadas anteriormente.

Em todos os casos, foi feita mais de uma medição para determinar a variância dos dados e usar a média dos valores, caso seja constatado um desvio-padrão aceitável.

Em cada desaceleração, foi verificado a temperatura ambiente e pressão barométrica. Na medição da temperatura ambiente foi utilizado um termopar do tipo K com um multímetro Icel Manaus AD-7910 e a velocidade e direção do vento, a umidade relativa e pressão do ar foram tomadas na hora do teste no site Clima tempo.

A velocidade do veículo em função do tempo foi adquirida através de um mini scanner automotivo Bluetooth ELM-327, mostrado na Figura 9, ligado a saída OBDII do veículo. Os

dados do mini scanner puderam ser extraídos e analisados em uma planilha de Excel através do aplicativo Torque Pro, para celulares *Android*.

Figura 9 - Dispositivo de aquisição de dados do veículo durante os testes



Fonte: Autor

4.2. METODOLOGIA DE ANÁLISE ITERATIVA BASEADA NA NORMA ABNT NBR 10312:2014

Os testes de desaceleração livre no plano foram realizados na Rodovia João Gualberto Soares, no trecho entre o Parque Estadual do Rio Vermelho e o Terminal Lacustre do Rio Vermelho, em Florianópolis, Santa Catarina. Essa escolha foi feita, pois, a pista de ensaio possui extensão de 1,7 km, mostrada em verde e amarelo na Figura 6, com porções levemente curvas para atingir a velocidade de início do teste e pontos de retorno. Também foi decisivo na escolha da pista de teste ela ser cercada de árvores dos dois lados em toda sua extensão, como mostra a Figura 7, assim tendo menor interferência do vento nos testes.

A elevação total da pista de ensaio foi estimada pela medição de altitude através do Google Maps Find Altitude (2017), conforme mostrado pela Equação 46:

$$a_{\%} = \frac{h_2 - h_1}{\Delta s} * 100 \quad (46)$$

Com isso foi constatado que a pista pode ser considerada plana, pois possui 0,2% de grau de inclinação entre os pontos de início e fim da pista, atendendo os requisitos da norma. As desacelerações de 100 km/h a 30 km/h usaram, em média, 1,5 km da pista por cada ensaio

de 10 pares feitos, dos quais apenas 5 pares de cada sentido (ida e volta) foram escolhidos para serem usados, conforme a norma estabelece, por obter o menor desvio padrão entre os testes. Foi percorrido em torno de 67 km no teste como um todo.

Para os testes de aceleração livre em rampa foi utilizada uma rampa de garagem coberta que possui grau de inclinação uniforme de 20,65%, ou 11,67 graus, em toda sua extensão de cerca de 65 metros de comprimento. Realizou-se 3 ensaios de aceleração em rampa pois o teste apresentou grande repetitividade. A inclinação da pista foi medida com o aplicativo *Angle Pro* para *iPod*, que faz a medição da através dos acelerômetros do aparelho, com precisão de medida de até $\pm 0,3^\circ$, comparando-se o valor lido com o carro no plano e parado na rampa e tomando a diferença entre as duas leituras como a inclinação. Para averiguar se a rampa tinha inclinação uniforme, foram feitas 3 medições de sua, no começo, no meio e no fim e o valor da inclinação utilizado foi a média dessas 3 medições, que se mostrou extremamente uniforme. É importante que o carro esteja completamente parado, para que não haja influências externas sobre o acelerômetro usado na medição.

Em ambos os testes realizados, os dados de velocidade e tempo foram obtidos pela rede CAN do veículo na porta OBD-II através de um scanner automotivo que lê os valores de velocidade com intervalos de 1 km/h e de tempo com variação de 0,100 segundos.

Antes do início da aquisição de dados no teste de desaceleração livre, as massas dos ocupantes, m_p , e dos equipamentos utilizados durante o ensaio, m_L , foram medidas e adicionadas na Tabela 5 juntamente com a massa do veículo em ordem de marcha, m_v , e área frontal do veículo, A_f , retirada do manual disponibilizado pela fabricante, a aceleração da gravidade, g , a massa específica do ar, ρ , e a massa translacional, m_t , que é a soma das massas indicadas anteriormente. Esses dados são ditos como constantes durante a realização do teste dado que a variação de combustível no tanque não foi considerada.

Tabela 5 - Dados obtidos antes do teste de desaceleração livre no plano

m_v [kg]	1067,00
m_p [kg]	81,80
m_L [kg]	5,80
m_t [kg]	1154,60
A_f [m ²]	2,15
g [m/s ²]	9,79
ρ [kg/m ³]	1,1784

Fonte: Autor

A pista escolhida para o teste ser feito possui pouco movimento de veículos em dias normais e horários normais, mas, mesmo assim, optou-se por realizar o teste em um horário que garanta que se tenha pouco ou nenhum movimento de veículos durante o ensaio. Nenhuma interferência de outros veículos foi obtida nos ensaios forçando a anulação dos dados obtidos daquela passada.

Após realizadas as desacelerações, os dados que geraram o menor desvio-padrão dos tempos foram as passagens 2, 3, 4, 8 e 9, com os valores de intervalo de velocidade e o tempo de desaceleração em cada teste mostrados na Tabela 6

Tabela 6, onde foi atribuído um padrão para nomear cada ensaio no qual o primeiro dígito indica o número do teste realizado e o segundo indica o sentido, sendo que o “1” foi na direção Terminal Lacustre - Parque Estadual (sul-norte) e o sentido “2”, Parque Estadual - Terminal Lacustre (norte-sul). Ou seja, o teste 2.1 será o segundo teste realizado no sentido sul-norte. O valor da temperatura, pressão e umidade do ar local foram medidas a cada 5 ensaios realizados e o resultado, também mostrado na Tabela 6, está dentro do estabelecido pela norma.

Tabela 6 - Dados do ensaio de *coast-down*

v_1 [km/h]	v_2 [km/h]	Δt [s]									
		2.1	3.1	4.1	8.1	9.1	2.2	3.2	4.2	8.2	9.2
100	90	7,70	8,20	8,00	8,30	7,50	7,50	8,11	8,00	7,8	7,50
90	80	9,00	9,60	9,40	9,70	9,40	9,30	9,49	9,41	8,998	8,50
80	70	10,40	11,70	11,60	11,20	11,00	9,80	12,00	10,89	9,7	10,00
70	60	12,50	12,10	11,70	12,30	11,10	11,30	11,90	11,99	12,005	11,10
60	50	13,10	13,60	13,40	14,00	12,60	13,70	13,90	13,20	12,098	12,90
50	40	16,20	15,40	15,40	16,40	14,50	15,70	16,40	14,90	15,201	15,10
40	30	18,81	18,40	17,61	18,60	18,29	18,40	18,30	16,90	17,297	17,20
T [°C]		25	25	25	26	26	25	25	25	26	26
p [kPa]		101	101	101	101	101	101	101	101	101	101
ϕ [%]		74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%

Fonte: Autor

A partir dos dados mostrados acima, foram calculadas as velocidades médias, tempos médios e as acelerações médias em cada intervalo de velocidade para que seja possível calcular C_x e f_t para aplicar a análise iterativa, conforme mostrado na Tabela 7. Também foi calculado o desvio padrão, σ , dos dados de tempo de desaceleração a fim de obter o coeficiente de variação percentual, CV , que é o valor do desvio padrão sobre a média, convencionado pela norma ABNT NBR 10312:2014 que seja menor de 10% para validade do teste.

Tabela 7 - Dados de velocidades, tempos médios de desaceleração e acelerações médias calculadas para o ensaio de *coast-down*

v_1 [km/h]	v_2 [km/h]	v_i [m/s]	Δt_i [s]	σ	CV	a_i [m/s ²]
100	90	26,39	7,86	0,29	3,65%	0,3534
90	80	23,61	9,28	0,34	3,65%	0,2993
80	70	20,83	10,83	0,78	7,21%	0,2565
70	60	18,06	11,80	0,46	3,94%	0,2354
60	50	15,28	13,25	0,57	4,29%	0,2096
50	40	12,50	15,52	0,61	3,95%	0,1790
40	30	9,72	17,98	0,63	3,52%	0,1545

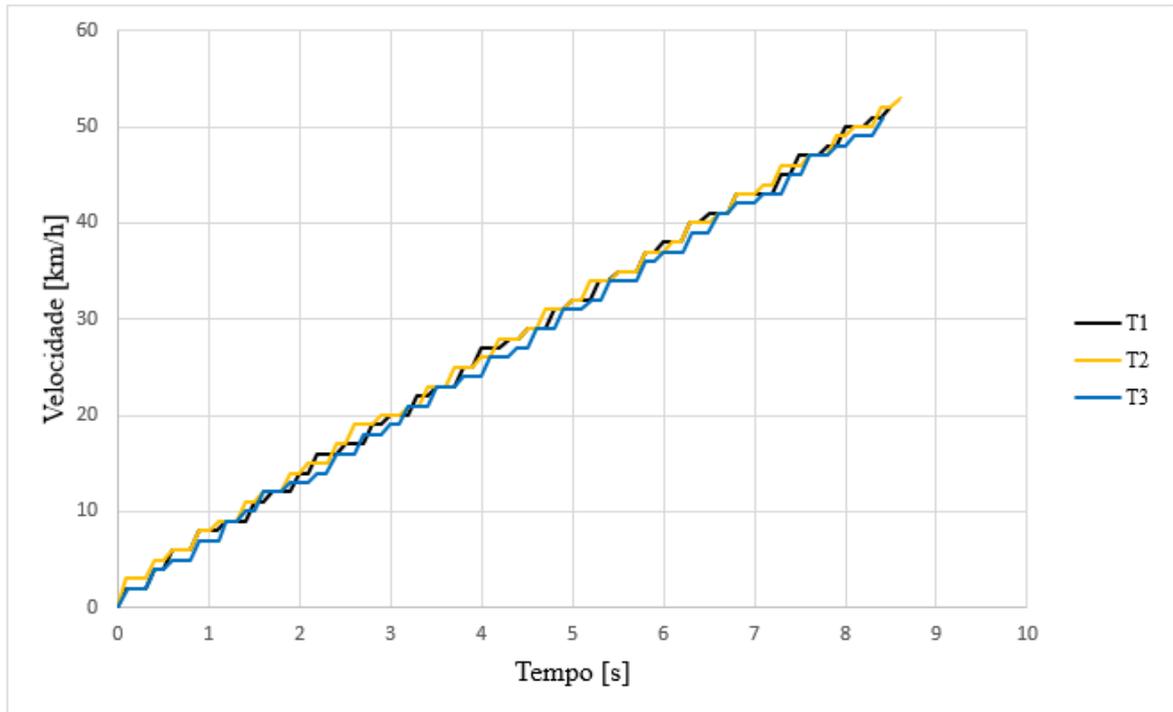
Fonte: Autor

Para o teste de aceleração livre em rampa, praticamente toda Tabela 5 se mantém idêntica em razão de que o veículo usado nos testes foi o mesmo e os ocupantes e materiais utilizados no teste também foram os mesmos. O único parâmetro que alterou foi a massa específica do ar, ρ , pois esse é dependente, além de outros parâmetros, da temperatura ambiente e a umidade do ar local, como pode ser visto na Tabela 8. Nesse teste também é necessário obter o valor da inclinação da rampa, θ .

Esse teste feito em uma rampa de garagem também não teve nenhuma interferência de outros veículos já que havia pouco movimento no período de ensaio.

Depois de feitas as acelerações livres, as curvas de velocidade em função do tempo foram geradas e são apresentadas na abaixo:

Figura 10 - Curvas de aceleração livre em rampa



Fonte: Autor

Podemos observar através das curvas mostradas que realmente a aceleração em cada teste pode ser aproximada como constante, pois as curvas se assemelham muito a uma reta. É possível averiguar também que os testes apresentaram uma grande repetitividade entre eles. Com os dados das curvas, foi possível obter os parâmetros que faltam para a análise iterativa. Esses parâmetros são a aceleração média constante entre os testes e a média da velocidade máxima obtida nos testes, mostrados na Tabela 8 abaixo:

Tabela 8 - Dados obtidos antes e dados resultantes do teste de aceleração livre em rampa

m_v [kg]	1067,00
m_p [kg]	81,80
m_L [kg]	5,80
m_t [kg]	1154,60
A_f [m ²]	2,15
g [m/s ²]	9,79
ρ [kg/m ³]	1,1821
θ [°]	-11,67
a [m/s ²]	1,6424
v_{max} [m/s]	14,4444

Fonte: Autor

Por fim, a análise iterativa é feita aplicando os dados das Tabelas 5 e 7 nas Equações 42 e 43 para obter o valor de C_x e f_t , partindo de um valor de δ qualquer para dar início a análise. Em seguida, utilizamos a Tabela 8 na Equação 44 para calcular δ com base nos valores de C_x e f_t obtidos na iteração anterior até que a condição de convergência, mostrada na Equação 45, seja atingida, conforme descrito no fluxograma da Figura 5.

Quase todos os parâmetros que são necessários para obter os valores de C_x , f_t e δ podem ser determinados indiretamente pela sua relação com outros parâmetros ou por medição direta, sem a necessidade de testes específicos. Aqueles que permanecem desconhecidos são obtidos com a solução da análise iterativa.

Realizou-se os passos mostrados no fluxograma da Figura 5, e o critério de convergência foi atingido na sétima iteração ($k = 7$), conforme mostrado pela Tabela 9

Tabela 9. As informações das iterações de $k = 3$ até $k = 5$ foram omitidas para melhor visualizar os resultados mais relevantes mostrados na Tabela 9 abaixo:

Tabela 9 - Resultado da análise iterativa

k 0		k 1		k 2		...	k 6		k 7	
δ [%]	0,0000%	δ [%]	-9,4321%	δ [%]	10,5278%	...	δ [%]	8,4509%	δ [%]	8,4504%
f_t [-]	C_x [-]	f_t [-]	C_x [-]	f_t [-]	C_x [-]	...	f_t [-]	C_x [-]	f_t [-]	C_x [-]
0,008	0,355	0,008	0,324	0,009	0,389		0,009	0,382	0,009	0,382
0,011	0,316	0,010	0,289	0,012	0,347		0,012	0,341	0,012	0,341
0,018	0,178	0,016	0,163	0,019	0,196	...	0,019	0,192	0,019	0,192
0,015	0,253	0,013	0,231	0,016	0,278		0,016	0,273	0,016	0,273
0,012	0,362	0,011	0,331	0,013	0,397		0,013	0,390	0,013	0,390
0,012	0,362	0,011	0,330	0,013	0,397		0,013	0,390	0,013	0,390
0,01257	0,30436	0,01148	0,27783	0,01380	0,33398	...	0,01356	0,3281	0,01356	0,3281

Fonte: Autor

Quando comparamos os resultados encontrados com os valores de referência para os parâmetros de interesse, conforme pode ser visto na Tabela 10, é notável que a análise iterativa proposta, por mais simples que seja, fornece resultados satisfatórios para os dados coletados.

Tabela 10 - Comparação entre os valores da referência e os obtidos na análise iterativa

Parâmetro	Referência	Resultado	Erro %
δ_k [%]	8%	8,45%	5,63%
$f_{t,k}$ [-]	0,013	0,0136	4,27%
$C_{x,k}$ [-]	0,35	0,33	6,25%

Fonte: Autor

O coeficiente de arrasto aerodinâmico, C_x , foi o único dos três parâmetros cujo valor de referência foi um dado de obtido da fabricante, logo, dado como exato. O coeficiente de resistência ao rolamento, f_t , e o fator de massa, δ , foram estimados a partir da literatura.

O valor de f_t é esperado que esteja mais próximo do limite superior do intervalo de pavimentação de asfalto, mostrado na Tabela 4, uma vez que na análise iterativa está incluído não apenas as perdas pelo atrito dos pneus, mas também as perdas na transmissão. O resultado do fator de massa, δ , foi coerente com o que se espera em veículos de passeio, e está contido no intervalo mostrado na Tabela 4.

A partir dos resultados mostrados na Tabela 10, podemos considerar que a metodologia proposta é um método válido para encontrar o coeficiente de arrasto aerodinâmico, o fator de massa e o coeficiente de resistência ao rolamento e perdas na transmissão para as condições testadas.

4.3. METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA BAIXAS VELOCIDADES

Foi proposto por esse trabalho, além de validar uma metodologia de análise iterativa entre os testes de desaceleração livre no plano seguindo a norma ABNT NBR 10312:2014 e aceleração livre em rampa seguindo a metodologia proposta por Santos (2012), validar também uma metodologia alterativa na qual é focada em testar veículos com baixa relação peso-potência, que é o caso do veículo elétrico principal foco desse trabalho.

O que diferencia as duas metodologias é somente a forma com que é conduzido o teste de desaceleração livre no plano, o restante, já explicado, se mantém exatamente da mesma forma. Inclusive o teste de aceleração livre em rampa é compartilhado nos dois testes, para que a análise seja focada realmente em validar a mudança proposta na metodologia que segue a norma. Essa mudança se resume que ao invés de analisarmos as curvas de velocidade em função do tempo no intervalo de velocidades de 100 km/h a 30 km/h, nós analisaremos no intervalo de

60 km/h a 20 km/h. Dessa forma o teste é aplicável ao veículo elétrico da Mobilis que terá velocidade em torno de 60 km/h para o uso urbano.

Dessa forma, tudo que já foi explicado anteriormente sobre as condições de validação da metodologia de análise iterativa é aplicável a essa também. O veículo utilizado, os locais de teste, a forma de obtenção dos dados, por exemplo, foram os mesmos para os dois testes.

As desacelerações de 60 km/h a 20 km/h usaram, em média, 720 metros do comprimento da pista. Foram feitas também 10 desacelerações em cada sentido da pista, sendo que desses, apenas 5 com os menores desvio padrão entre as medições foram usadas. No total, também foram percorridos 67 km durante este teste em razão de que, mesmo usando um comprimento menor da pista de testes, os retornos para iniciar o teste seguinte no sentido contrário, indicados por setas azuis na Figura 6 foram os mesmos usados nos testes de 100 km/h a 30 km/h.

A Tabela 5 é quase inteiramente compartilhada com esse teste, já que foi feito com o mesmo veículo. A única mudança foi na massa específica do ar, ρ , já que houve uma pequena variação na temperatura e umidade do ar entre os dois testes. Assim os dados iniciais medidos antes do teste de desaceleração livre no plano analisado no intervalo de 60 km/h a 20 km/h são mostrados na Tabela 11 abaixo:

Tabela 11 - Dados obtidos antes do teste de desaceleração livre no plano alternativo

m_v [kg]	1067,00
m_p [kg]	81,80
m_L [kg]	5,80
m_t [kg]	1154,60
A_f [m ²]	2,15
g [m/s ²]	9,79
ρ [kg/m ³]	1,1721

Fonte: Autor

Após realizadas as desacelerações, os dados dos ensaios que geraram o menor desvio-padrão foram: 1, 2, 5, 9 e 10. A Tabela 12 abaixo mostra os valores do intervalo de velocidade e o tempo de desaceleração em cada ensaio, onde o padrão para nomear cada ensaio foi mantido do outro. O valor da temperatura, pressão e umidade do ar local foram medidas a cada 5 ensaios realizados e o resultado, também mostrado na Tabela 12 e Tabela 6, está dentro do estabelecido pela norma.

Tabela 12 - Dados do ensaio de *coast-down* alternativo

v_1 [km/h]	v_2 [km/h]	Δt [s]									
		1.1	2.1	5.1	9.1	10.1	1.2	2.2	5.2	9.2	10.2
60	50	13,50	13,30	12,10	12,45	13,00	13,50	13,50	13,30	12,899	13,55
50	40	16,70	16,16	14,80	14,60	14,70	14,80	15,95	16,10	15,103	15,99
40	30	18,50	18,20	18,00	18,10	17,30	16,40	18,29	18,30	17,199	18,38
30	20	19,10	18,95	19,10	17,90	18,90	18,90	19,20	18,80	18,6	18,70
T [°C]		27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
p [kPa]		101	101	101	101	101	101	101	101	101	101
ϕ [%]		75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%

Fonte: Autor

Com os dados obtidos acima, foram calculadas as velocidades médias, tempos médios e as acelerações médias em cada intervalo de velocidade, conforme mostrado na Tabela 13, para que, posteriormente, calculemos C_x e f_t para aplicar a análise iterativa alternativa. Também foi calculado o desvio padrão, σ , dos dados de tempo de desaceleração a fim de obter o coeficiente de variação percentual, CV , que é o valor do desvio padrão sobre a média, convencionado pela norma ABNT NBR 10312:2014 que seja menor de 10% para validade do teste.

Tabela 13 - Dados de velocidades, tempos médios de desaceleração e acelerações médias calculadas para o ensaio de *coast-down* alternativo

v_1 [km/h]	v_2 [km/h]	v_i [m/s]	Δt_i [s]	σ	CV	a_i [m/s ²]
60	50	15,28	13,11	0,47	3,60%	0,2119
50	40	12,50	15,49	0,73	4,68%	0,1793
40	30	9,72	17,87	0,64	3,60%	0,1555
30	20	6,94	18,82	0,35	1,87%	0,1476

Fonte: Autor

O teste de aceleração livre em rampa utilizado nesse teste é exatamente o mesmo utilizado na análise iterativa apresentada anteriormente. Então os dados para o cálculo da análise iterativa alternativa do teste de aceleração livre em rampa virão da Tabela 8.

Realizou-se os passos mostrados no fluxograma da Figura 5, e o critério de convergência para essa outra metodologia proposta foi atingido na sexta iteração ($k = 6$), conforme mostrado pela Tabela 14. As informações das iterações correspondentes a $k = 3$ e $k = 4$ foram omitidas para melhor visualizar os resultados mais relevantes mostrados na Tabela 14 abaixo:

Tabela 14 - Resultado da análise iterativa alternativa

k 0		k 1		k 2		...	k 5		k 6	
δ [%]	0,0000%	δ [%]	-9,4914%	δ [%]	10,5887%	...	δ [%]	8,5045%	δ [%]	8,5081%
f_t [-]	C_x [-]	f_t [-]	C_x [-]	f_t [-]	C_x [-]	...	f_t [-]	C_x [-]	f_t [-]	C_x [-]
0,012	0,387	0,011	0,353	0,013	0,425		0,012	0,418	0,012	0,418
0,012	0,354	0,011	0,323	0,013	0,389		0,013	0,382	0,013	0,382
0,014	0,155	0,013	0,142	0,016	0,170	...	0,015	0,167	0,015	0,167
0,01266	0,29904	0,01155	0,27281	0,01390	0,32830	...	0,01365	0,3225	0,01365	0,3226

Fonte: Autor

Analisando os resultados obtidos e comparando com os valores de referência para os parâmetros de interesse, conforme pode ser visto na Tabela 15, pode ser dito que a análise iterativa alternativa proposta também nos fornece resultados muito adequados para os dados coletados.

Tabela 15 - Comparação entre os valores da referência e os obtidos na análise iterativa alternativa

Parâmetro	Referência	Resultado	Erro %
δ_k [%]	8%	8,51%	6,35%
$f_{t,k}$ [-]	0,013	0,0137	5,01%
$C_{x,k}$ [-]	0,35	0,32	7,84%

Fonte: Autor

A partir dos resultados mostrados na Tabela 15, podemos considerar que a metodologia proposta para ser aplicada no veículo elétrico alvo é um método válido para encontrar o coeficiente de arrasto aerodinâmico, o fator de massa e o coeficiente de resistência ao rolamento e perdas na transmissão para as condições testadas e pode ser implementada.

5. CONCLUSÃO

Com base no conjunto de dados disponíveis a partir dos testes que foram realizados com um veículo de passeio, um erro absoluto máximo de 7,84% do valor de referência para o teste alternativo à norma e de 6,25% seguindo as suas orientações, foi considerado muito satisfatório para a simplicidade dos testes nos levando a acreditar que a série de ensaios e análises proposta seja uma maneira viável de caracterizar alguns parâmetros relevantes de um veículo.

Os parâmetros de fator de massa, δ , e coeficiente de resistência ao rolamento, f , tinham referências na forma de intervalos, em que foram tomados as médias para representarem o cálculo do erro. Como nas duas metodologias abordadas foi adotado o coeficiente f_t para resistência ao rolamento e perdas na transmissão, esperava-se que o valor obtido com os testes fosse mais próximo do limite superior do intervalo, uma vez que se tinha outra perda adicionada conjuntamente. Já o coeficiente de resistência aerodinâmica, C_x , foi um dado extraído do fabricante do veículo, por isso é uma referência dada como exata. Partindo disso, analisando a Tabela 10 e a Tabela 15 podemos observar que os resultados se enquadram dentro da faixa de valores que foi atribuída como referência, e o coeficiente f_t de ambos os testes se aproxima mais do limite superior do intervalo do que do inferior, como esperado. O valor obtido para C_x apresentou erros baixos e é o parâmetro com a melhor referência dos três.

Então, mesmo que o teste de aceleração livre em rampa exigisse uma faixa longa e íngreme e o método de *coast-down* seja influenciado por condições externas, como a densidade do ar, vento cruzado, rugosidade e ondulação da pista, e precise de vários ensaios para reproduzir resultados representativos, tornando o método longo e exaustivo, os resultados estavam dentro de um intervalo considerado aceitável para um simples par de testes. Não foi muito difícil contornar esses obstáculos, inclusive a execução dos testes foi feita de forma simples, porém com muita atenção aos detalhes e por isso as metodologias cumprem com seu objetivo de ser um teste econômico, que produza resultados condizentes com a realidade analisando o veículo como um todo, sem necessidade de avaliar parâmetros separadamente, com formulação e análise simples.

A análise iterativa baseada na norma também foi aplicada em outro veículo de passeio, conforme mostrado por Carioni et. al. (2017), e os resultados ficaram muito próximos dos obtidos neste trabalho, o que reforça a validade da metodologia proposta. A metodologia alternativa foi pensada para ser aplicada no futuro no veículo elétrico da Mobilis que será

homologado para as ruas e possui capacidade de chegar a 60 km/h. A empresa atualmente possui um protótipo que se trata da versão não homologada e está focada em ser utilizada com condomínios residenciais, aeroportos, shopping, campus universitários, entre outras aplicações, como um veículo de carga ou locomoção e, por isso, sua velocidade é reduzida e o teste não pode ser aplicado ainda.

O objetivo principal desse trabalho de validar as metodologias propostas para caracterizar dinamicamente um veículo foi alcançado com sucesso, bem como encontrar o coeficiente de resistência aerodinâmica, o valor das inércias rotativas equivalente e o coeficiente de resistência ao rolamento e de perdas na transmissão através das metodologias e comparar com os valores de referência, e, por isso, a metodologia será aplicada futuramente no veículo alvo.

Como possibilidade de pesquisas futuras, recomenda-se: aplicar os testes com o veículo elétrico de baixa relação peso-potência alvo deste trabalho; implementar os testes com outros veículos de passeio em condições variáveis, como diferentes tipos de pavimentação, variar a massa de translação ou usar diferentes inclinações de rampas; considerar o coeficiente adotado como resistência ao rolamento e perdas na transmissão como efeitos separados e avaliar se eles realmente estão sendo bem aproximados como uma resistência constante.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **10312**: Veículos rodoviários automotores leves — Determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 13 p.

BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. 25. ed. São Paulo. Editora Blücher. 2005.

BARNARD, R. H. **Road vehicle aerodynamic design: An Introduction**. 3. ed. St Albans: Machaero Publishing, 2009.

CASTEJON, D. V. **Métodos de redução do arrasto e seus impactos sobre a estabilidade veicular**. 2011. 108. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

CARIONI, L. P.; HOELTGEBAUM, T.; CHIERIGHINI, T.; Iterative analysis of free acceleration on a ramp and free deceleration (*coast-down*) on a flat road for evaluating longitudinal dynamics parameters of vehicles. In: A mobilidade inteligente e a transição para o futuro, ISSN 0148-7191, 2017, São Paulo. **Anais... SAE Brasil**, 09 nov. 2017. 1-8.

CAVALHEIRA, P. **An experimental method to measure the tire rolling resistance coefficient of an ultra-efficient vehicle**”, presented at ICEM15, Portugal, jul. 22-27, 2012.

DO VALE JUNIOR, C.; TEIXEIRA, M. B.; FERREIRA, V. Estudo da diminuição do arrasto aerodinâmico e do consumo de combustível de uma geometria veicular. In: XII SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 12., **Anais...** 28, 29 e 30 de outubro de 2015. Associação Educacional Dom Bosco, Resende, 2015. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/32822383.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2017.

GENTA, G; MORELLO, L. **The Automotive Chassi: Components design**. Dortrecht: Springer, 2006.

GILLESPIE, T. D. **Fundamental of vehicles dynamics**. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992.

GOOGLE MAPS FIND ALTITUDE. **DaftLogic**. Disponível em: <<https://www.daftlogic.com/sandbox-google-maps-find-altitude.htm>>. Acesso em: 06 abr. 2017.

GOOGLE MAPS. **Pista utilizada nos testes de desaceleração livre no plano**. Disponível em <https://www.google.com.br/maps/@-27.5332238,-48.4315266,3a,75y,187.97h,92.7t/data=!3m6!1e1!3m4!1sQ_7vCFZVgTvB-MUvqHK_PA!2e0!7i13312!8i6656>. Acesso em: 06 abr. 2017.

GOOGLE MAPS. **Trecho escolhido para realização do teste de desaceleração livre no plano**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/dir/-27.5561651,-48.4372408/>>

27.5271533,-48.4275084/@-27.5490838,-48.4311782,5083a,35y,270h/data=!3m1!1e3!4m2!4m1!3e0> Acesso em: 06 abr. 2017.

HUCHO, W. H. **Aerodynamics of road vehicles**: From fluid mechanics to vehicle engineering. 4. ed. Londres: Butterworth Heinemann, 1987.

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

MANUAL DO PROPRIETÁRIO. **Dados do veículo utilizados nos testes**. Disponível em: <https://www.chevrolet.com.br/content/dam/Chevrolet/lat-am/Brazil/nscwebsite/pt/Home/Owners/Vehicle%20Manuals/2013/02_pdf/Manual_Onix_2013.pdf> Acesso em: 10 out. 2017.

NICOLAZZI, L. C.; ROSA, E.; LEAL, L. C. M. **Uma introdução à modelagem quase-estática de veículos automotores**. Florianópolis: Publicação interna do GRANTE – Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, 2012. 347 p. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC078/Bibliografia/2012_Apostila_Veiculos.pdf>. Acesso em: 01 set. 2017.

RAMOS, M. **Estudo das melhores práticas da aerodinâmica veicular, visando a melhoria de consumo de combustível e redução de emissões de poluentes aplicadas a veículos de passeio**. 2012. 70. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Automotiva, Instituto Mauá de Tecnologia, Centro Universitário Mauá. São Caetano do Sul, 2012. Disponível em: <<http://maua.br/files/monografias/estudo-das-melhores-praticas-da-aerodinamica-veicular-visando-a-melhoria.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2017.

REIMPELL, Jornsens; STOLL, Helmut; BETZLER, Jurgen W. **The automotive chassis: Engineering principles**. 2. ed. Würzburg: Butterworth Heinemann, 2001. 444 p.

SANTOS, N. **Medição experimental do coeficiente de resistência ao rolamento e do coeficiente de arrasto aerodinâmico de um veículo automóvel de elevada eficiência energética**. Master's Dissertation, Mechanical Engineering Department, Faculdade de Ciências e Tecnologia, University of Coimbra. Coimbra, 2012.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 880 p.