

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

MURILO HENRIQUE BAGGIO DE MELLO

MEDIÇÃO E ANÁLISE DO CONFORTO VEICULAR E QUALIDADE DE VIAS

Joinville

2017

MURILO HENRIQUE BAGGIO DE MELLO

MEDIÇÃO E ANÁLISE DO CONFORTO VEICULAR E QUALIDADE DE VIAS

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.

Orientador: Dr. Sérgio Junichi Idehara.

Joinville

2017

MURILO HENRIQUE BAGGIO DE MELLO

MEDIÇÃO E ANÁLISE DO CONFORTO VEICULAR E QUALIDADE DE VIAS

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Automotivo e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Automotiva na Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 29 de novembro de 2017.

Banca examinadora:

Prof. Sergio Junichi Idehara, Dr. Eng.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo de Medeiros, Dr. Eng.

Universidade do Estado de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar comigo nessa jornada.

Agradeço a minha família, aqueles que sempre estiverem ao meu lado, em todos os momentos, especialmente aos meus pais Luiz Carlos de Mello e Jusmarí Maria Baggio de Mello, que não mediram esforços para eu chegar onde cheguei e realizar meus sonhos. Aos meus irmãos Pedro Henrique Baggio de Mello e Leonardo Baggio de Mello que sempre me apoiaram nas minhas decisões, torceram pelo meu sucesso e sempre me motivaram a buscar o melhor. Sem vocês nada disso seria possível.

Agradeço a meu orientador Sergio Junichi Idehara por ter entregado sua confiança desde o início do trabalho, além de sua dedicação, paciência e cumplicidade na solução dos problemas.

Agradeço aos meus amigos que de certa forma ajudaram a chegar nesse momento. Em especial à Carlos, Cleomar, Émerson, Gabriel, Giovani, Hendrick, Ian, Lucas, Mateus, Mauri, Rauber e Renato.

A todos que, direta ou indiretamente, participaram da minha formação.

RESUMO

Um dos sistemas essenciais a todo veículo é o sistema de suspensão, pois faz a ligação entre a massa suspensa e a massa não suspensa do mesmo, sendo o mesmo conectado a outras estruturas como a direção e o freio. Desse modo, é o sistema responsável por garantir o contato pneu-solo, absorver as oscilações provenientes da via e manter a estabilidade do veículo distribuindo as forças, e, portanto, fornecendo o conforto e segurança aos ocupantes do carro. Entretanto, existem diferentes modelos que simulam o comportamento da dinâmica de uma suspensão, cada um com um nível de complexidade e precisão de resultados. Em vista disso, este trabalho visa comparar o estudo do modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo com a dinâmica real de um veículo, através de uma simulação no software Matlab. Assim, selecionou-se um veículo Renault Sandero 1.6 do ano de 2015 para ser instrumentado com acelerômetros triaxiais, através dos quais foram obtidos os dados de aceleração da massa suspensa e não suspensa do veículo ao ser submetido à passagem por uma lombada. Através da simulação e da medição da passagem do veículo pela lombada, pode-se realizar o ajuste de modelo a fim de obter os parâmetros aproximados do veículo. Além disso, utilizando o veículo instrumentado e os parâmetros ajustados, elegeram-se algumas vias da cidade de Joinville/SC para coletar seus dados em um teste veicular e calcular o *International Roughness Index* (IRI), índice de avaliação da qualidade da via. Assim, avaliando, também, a qualidade das vias, uma vez que estas têm papel fundamental na oscilação do veículo, e, portanto, no conforto dos ocupantes do veículo. Dos resultados, pode-se verificar que vias com alto valor de IRI resultam em um maior desconforto as pessoas no interior do veículo, já as com valor menor, ou seja, uma pista de maior qualidade, resultam em maior conforto ao motorista e seus passageiros.

Palavras-chave: Suspensão. $\frac{1}{4}$ de veículo. IRI. Conforto. Qualidade de vias.

ABSTRACT

One of the essential systems to every vehicle is the suspension system, due to it links vehicles' sprung mass and unsprung mass, also it is connected to other structures such as the steering and the brake. In this way, it is the system responsible for ensuring tire-grounding contact, absorbing the oscillations coming from the road and maintaining the stability of the vehicle distributing the forces, providing comfort and safety to vehicle occupants. However, there are different models that simulate the suspension dynamic behavior, each one with a level of complexity and accuracy of results. Thus, this study aims to compare the study of a vehicle quarter model with the real dynamics of a vehicle, by a Matlab simulation. Therefore, a Renault Sandero 1.6 model 2015 was selected to be instrumented with three-axis accelerometers, through which the acceleration data of sprung mass and unsprung mass was obtained when the vehicle passed through a speed bump. By simulating and measuring the vehicle's stroke through a speed bump, it can make the model update to obtain the approximate vehicle parameters. In addition, using the instrumented vehicle and the adjusted parameters, some roads of the city of Joinville/SC were chosen to collect their data in a vehicular test and calculate the International Roughness Index (IRI), index of evaluation of roads quality. Then, also evaluating the quality of the streets, as they have a fundamental role in the vehicle oscillation, and, thereby, in the comfort of vehicle occupants. From the results, it can be verified that high-value IRI streets result in greater discomfort to people inside the car, while those with a lower value of IRI, that is, a higher quality road, result in greater comfort for the driver and the passengers.

Keywords: Suspension. Quarter vehicle. IRI. Comfort. Road quality.

Lista de Figuras

Figura 1 – Suspensão McPherson.	16
Figura 2 – Relação entre o IRI e as características da via.....	19
Figura 3 – Renault Sandero 1.6l modelo 2015.....	20
Figura 4 – Fluxograma do trabalho.	21
Figura 5 - Modelo de um quarto de veículo.....	22
Figura 6 – Medição da lombada.	23
Figura 7 – Perfil da lombada obtido pelos pontos.	24
Figura 8 – Arduino Uno.	25
Figura 9 – Acelerômetro ADXL345.	26
Figura 10 – Circuito entre o Arduino e o ADXL345.	27
Figura 11 – Acelerômetro posicionado na massa suspensa.....	28
Figura 12 – Acelerômetro posicionado na massa não suspensa.....	28
Figura 13 – Instrumentação do veículo.	29
Figura 14 - Perfil da lombada do teste.	32
Figura 15 – Resultados da medição de vibração na lombada após as correções....	33
Figura 16 – Procedimento para a obtenção das forças nas molas.....	35
Figura 17 – Obtenção da força na mola dianteira direita.	36
Figura 18 – Gráfico da inclinação da suspensão.	36
Figura 19 – Comparação entre a simulação e a medição.....	38
Figura 20 – Primeira repetição da passagem pela lombada para comparação.....	39
Figura 21 – Segunda repetição da passagem pela lombada para comparação.....	39
Figura 22 –Mapa de Joinville/SC com os trechos analisados.....	42
Figura 23 – Rua Presidente Prudente de Moraes (1) e sua irregularidade.....	43
Figura 24 – Rua Blumenau (2) e sua irregularidade.	43
Figura 25 – Avenida Getúlio Vargas (5) e sua irregularidade.	43
Figura 26 – Avenida Coronel Procópio Gomes (6) e sua irregularidade.....	44
Figura 27 – Avenida Albano Schmitd (7) e sua irregularidade.....	44
Figura 28 – Avenida Helmut Falgatter (8) e sua irregularidade.	44
Figura 29 –Perfil da rua Presidente Prudente de Moraes.	45
Figura 30 – Perfil da rua Blumenau.....	45

Figura 31 – Acelerações das massas do veículo na Rua Presidente Prudente de Moraes.	46
Figura 32 – Acelerações das massas do veículo na Rua Blumenau.	46
Figura 33 – Variação do IRI ao longo da via.	49
Figura 34 – IRI para vias pavimentadas.	50
Figura 35 – IRI para vias não pavimentadas.	51

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Escala de desconforto segundo ISO 2631.....	18
Tabela 2 – Dados técnicos do ADLX345.	26
Tabela 3 – Distribuição de massa no veículo sem motorista e passageiro.	34
Tabela 4 – Distribuição de massa no veículo com motorista e passageiro.	34
Tabela 5 – Rigidezes da suspensão estimadas.....	37
Tabela 6 – Parâmetros do veículo segundo o ajuste de modelo.	40
Tabela 7 – Numeração das vias.....	42
Tabela 8 – IRI das ruas Presidente Prudente de Moraes e Blumenau.	47
Tabela 9 – IRI detalhado para a rua Presidente Prudente de Moraes.....	47
Tabela 10 – IRI detalhado para a rua Blumenau.	48
Tabela 11 – IRI das vias de Joinville/SC.....	48
Tabela 12 – IRI detalhado da rua Albano Schmitd.....	57
Tabela 13 – IRI detalhado da avenida Getúlio Vargas.....	57
Tabela 14 – IRI detalhado da rua Helmut Falgatter.	58
Tabela 15 – IRI detalhado da rua Marcílio Dias.	58

Lista de Símbolos

ASTM	American Society for Testing and Materials International
C_s	Coefficiente de amortecimento da suspensão
g	Aceleração da gravidade
IRI	International Roughness Index
ISO	International Organization for Standardization
K_s	Rigidez da suspensão
K_t	Rigidez do pneu
L	Distância percorrida pelo veículo
M	Massa suspensa
m	Massa não suspensa
RMS	Aceleração ponderada
Z	Deslocamento da massa suspensa
Z_u	Deslocamento da massa não suspensa
Z_r	Deslocamento da pista

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Objetivos	13
1.1.1. Objetivo Geral	13
1.1.2. Objetivos Específicos	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1. Suspensões	15
2.1.1. Suspensão McPherson	16
2.2. Conforto	17
2.3. IRI (International Roughness Index)	18
3. METODOLOGIA	20
3.1. Modelo dinâmico	22
3.2. Excitação pela base	23
3.3. Integrador numérico	24
3.4. Medições experimentais	24
3.4.1. Arduino	24
3.4.2. Acelerômetro inercial	25
3.4.3. Circuito elétrico dos acelerômetros e Arduino	26
3.5. Instrumentação do veículo	27
3.6. Estimativa do perfil da via	29
3.7. Análise da qualidade da via	29
4. RESULTADOS DO AJUSTE DE MODELO	31
4.1. Correções dos dados	31
4.2. Medição dinâmica na lombada	32
4.3. Simulação do modelo de ¼ de veículo	34
4.3.1. Peso do veículo e rigidez da suspensão	34
4.3.2. Ajuste de modelo	37
5. CÁLCULO DO IRI	41
5.1.1. Filtragem do sinal	41
5.1.2. Análise das vias	42
6. CONCLUSÃO	52

REFERÊNCIAS.....	53
APÊNDICES	55
Apêndice 1 – Algoritmo Arduino.	55
Apêndice 2 – IRI detalhado das vias de Joinville/SC.	57
Apêndice 3 – Algoritmo Matlab para analisar as medições na lombada.....	59
Apêndice 4 – Algoritmo Matlab para a simulação na lombada.....	61
Apêndice 5 – Algoritmo Matlab para cálculo do IRI.	62

1. INTRODUÇÃO

O sistema de suspensão é aplicado pela indústria nos veículos desde o princípio, devido à necessidade de absorver os efeitos vibratórios ocasionados pelas irregularidades das pistas. Segundo Stone e Ball (2004), a suspensão compreende a interface entre a superfície da via e o corpo do veículo. Portanto, esse sistema desempenha um papel fundamental para garantir o conforto ao usuário, absorvendo os impactos e as vibrações, fornecendo estabilidade e dirigibilidade ao carro, além de manter o contato pneu-solo. Estas funções são de extrema importância para manter a segurança do veículo e a satisfação do passageiro. (KNOWLES, 2011).

O conforto é um dos fatores mais significativos que as pessoas buscam em um carro. Em vista disso, a evolução das suspensões é extremamente necessária para proporcionar o conforto desejado pelos ocupantes de um veículo. Walker et al (2015) afirmam que os motoristas demonstram notável sensibilidade frente a resposta do veículo, implicando que as montadoras levam em conta esse fator ao produzir um carro, definindo qual a aplicação do veículo e quem será o público alvo, para, desse modo, fornecer o melhor produto possível.

Os estudos desse sistema requerem grandes investimentos a fim de maximizar o conforto aos passageiros e reduzir os efeitos vibratórios que são nocivos à saúde humana e, também, ao veículo, pois, conforme Milliken e Milliken (1995), as junções entre a massa suspensa e a massa não suspensa do veículo, controlam as forças transmitidas através delas. Portanto, utiliza-se a dinâmica vertical para entender como o automóvel se comporta sob tais condições, para assim, proporcionar a melhor relação entre o desempenho do veículo e o desempenho da suspensão.

Segundo Wong (2001), como um veículo representa um complexo sistema de vibrações com diversos graus de liberdade, simplifica-se o sistema utilizando apenas os graus de liberdade mais relevantes ao estudo. Desse modo, nos estudos de dinâmica veicular são utilizados estes modelos simplificados para facilitar os cálculos. Entretanto, como esses modelos são aproximações, necessita-se verificar

o quão próximo do sistema de suspensão real o modelo se encontra. Para isso, devem ser realizados testes que comparem a resposta da suspensão retornada pelo modelo simplificado com a resposta medida do veículo real.

Outro ponto que tem impacto direto no sistema de suspensão e, conseqüentemente, no usuário do veículo é a via. Pois, quanto pior o estado de conservação da via, maior será a excitação transmitida para o veículo. Assim, procura-se manter a qualidade da via o melhor possível. Desse modo, alguns métodos foram desenvolvidos para monitorar e garantir que as estradas tenham condições apropriadas de uso. O principal método utilizado é o *International Roughness Index* (IRI), sendo altamente aplicado para avaliar a qualidade das vias nos Estados Unidos. (GENTA; MORELLO, 2009).

Para obter os dados do sistema de suspensão veicular e, também, da via, fazem-se o uso de sensores, como acelerômetros inerciais. Assim, o veículo deve ser instrumentado com os sensores a fim de obter as oscilações nas massas suspensa e não suspensa. Com esses dados é possível analisar se o modelo simplificado da suspensão condiz com o que, realmente, tem-se na prática em um carro. Além disso, com a oscilação das massas é possível calcular o IRI e, assim, determinar a condição de uso da via.

Em vista disso, este trabalho tem o intuito de instrumentar um veículo Renault Sandero 1.6 do modelo 2015 com acelerômetros, para obter os dados da suspensão do veículo e de oscilação das massas, assim, podendo comparar com o modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo. Posteriormente, ainda com o veículo instrumentado, pretende-se verificar a qualidade das vias da cidade de Joinville – SC com a utilização do índice padronizado IRI.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Comparar analiticamente e experimentalmente as respostas de aceleração do sistema de suspensão de um veículo Renault Sandero 1.6 (2015) com as do modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo e calcular do índice de qualidade de vias, analisando o conforto veicular.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Instrumentar e medir as vibrações do veículo quando excitadas pela via;
- Simular um modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo e ajustar o modelo com os resultados empíricos;
- Calcular o IRI como referência da qualidade das vias locais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo do conforto de um veículo parte da análise de sua dinâmica veicular a fim de identificar os parâmetros de maior influência, e verificando o tipo de suspensão que melhor se adequa a sua utilização. Assim, nos tópicos a seguir referenciam-se os tipos construtivos relacionados ao veículo de teste.

2.1. Suspensões

Conforme Milliken e Milliken (1995), suspensão é o meio de ligação entre a massa suspensa e a massa não suspensa de um veículo. De modo que reduza as oscilações que agem na massa não suspensa, provenientes da via, de chegarem à massa suspensa. Também, é o sistema de suspensão um dos responsáveis em manter a estabilidade do veículo, pois permite a distribuição das forças que agem sobre o mesmo. Por isso, são essenciais para se ter um bom comportamento dinâmico do carro e garantir o conforto aos seus ocupantes. (GENTA; MORELLO, 2009).

A fim de ter o desempenho desejado do veículo, o sistema de suspensão é projetado especificamente para determinado veículo e sua aplicação. Devido a isso, os automóveis, geralmente, têm suspensões diferentes na dianteira e na traseira, uma vez que cada uma delas está submetida a esforços e cargas diferentes.

Nos carros atuais, as suspensões dianteiras, em sua grande maioria, são independentes, pois se tem tração dianteira e também é onde está o sistema de direção, sendo a McPherson a mais utilizada. Por outro lado, as suspensões traseiras têm uma maior diversidade, devido as diferentes classes de carros. Os veículos de utilitários geralmente utilizam feixe de molas, por suportar mais carga; os populares apresentam eixo de torção, devido ao seu baixo custo e se adequarem a sua aplicação; já os veículos com um perfil mais esportivo e/ou os com tração traseira empregam, muitas vezes, em suspensões independentes.

Restringindo-se a um quarto do veículo por sua simplicidade, tem-se uma

McPherson, além de distribuir adequadamente as cargas da suspensão, também suporta cargas laterais e longitudinais. Entretanto, devido a sua altura, torna-se um limitador do projeto da carroceria.

2.2. Conforto

Segundo Genta e Morello (2009), definir conforto em um veículo é uma etapa complexa e subjetiva, uma vez que essa condição muda com o tempo e com a sensibilidade de cada usuário. Além disso, o conforto pode mudar conforme a situação momentânea e psicológica do motorista e/ou passageiros.

O perfil de veículo, juntamente com a idade do motorista, influencia em um requisito de conforto. Geralmente pessoas mais jovens procuram carros com maior potência, onde é necessário que a suspensão seja mais rígida a fim de se adequar a essa condição. Por outro lado, pessoas com mais idade tendem a exigir maior conforto.

No segmento automotivo, o conforto, propriamente dito, está diretamente relacionado com o movimento de *ride*, este é definido por Genta e Morello (2009) como a habilidade dos pneus e suspensões filtrarem vibrações externas ocasionadas pela via. Essas oscilações se não fossem amortecidas, agiriam sobre os ocupantes do veículo, resultando em desconforto para os mesmos. Dentre os principais fatores que a causam estão o ruído e a vibração, cujo estudo é denominado de NVH (Noise, Vibration and Hashness).

Gillespie (1992) afirma que a vibração é um dos critérios que mais tem influência no julgamento da qualidade do carro pelas pessoas. Assim, o conforto e o bem-estar dos ocupantes do veículo durante uma viagem geram muitos estudos, principalmente por parte das montadoras e das agências regulamentadoras. A primeira, com o intuito de aumentar as vendas tenta buscar o maior conforto possível, quando esse for o perfil do carro. Já para as agências regulamentadoras, os estudos são com o propósito de criar normas para garantir a segurança dos ocupantes do automóvel.

Conforme Drehmer (2012), para fins de pesquisa, o conforto é relacionado com a massa suspensa e com o habitáculo do veículo a fim de obter dados para tentar padronizar o conforto. Através de sensores colocados no veículo, procura-se avaliar as acelerações aceitáveis, conforme a Tabela 1, relacionadas a cada faixa de

frequências que agem sobre o motorista e passageiros, para assim, elaborar as normas, como a ISO 2631 (1997) que regulamenta o conforto e a segurança veicular.

Segundo Casas e Drehmer (2010), a norma ISO 2631 indica os parâmetros correlacionados com a frequência de vibração e a aceleração vertical, além de determinar as sensibilidades do corpo humano em diferentes eixos de atuação. A norma ainda apresenta uma escala de desconforto pela aceleração vertical, mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Escala de desconforto segundo ISO 2631.

Índice de conforto (m/s²)	Escala
Menor que 0,315	Confortável
0,315 – 0,63	Levemente confortável
0,5 – 1	Pouco confortável
0,8 – 1,6	Desconfortável
1,25 – 2,5	Muito desconfortável
Maior que 2	Extremamente desconfortável

Fonte: ISO 2631 (1997).

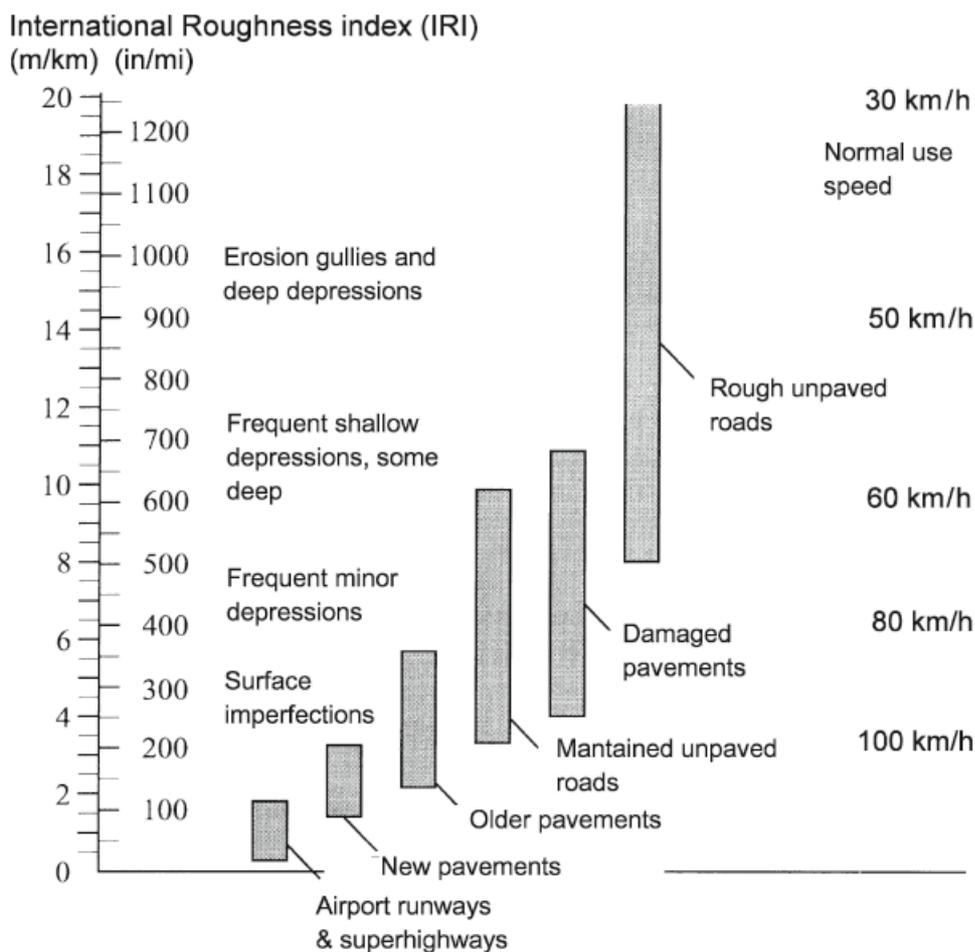
2.3. IRI (International Roughness Index)

Uma vez que a definição da qualidade de uma via é relativa às diferentes condições de operação, se faz necessário o uso de ferramentas padronizadas para medi-la. Portanto, foram criados métodos que auxiliem nessa avaliação.

O IRI é a ferramenta para quantificar a qualidade das vias mais utilizada no mundo e segundo Arhin *et al.* (2015), é uma medida padronizada da reação do veículo ao perfil e a rugosidade da via. Os dados do *International Road Roughness Experiment*, ocorrido em 1982 no Brasil, serviram como base para o desenvolvimento desse método em 1986. Então, o IRI é uma metodologia matemática utilizada para avaliar o perfil da via através da medição de aceleração, experimentalmente, em um veículo qualquer e ajustado a um modelo de ¼ de veículo. (ABULIZI *et al.*, 2016.).

O cálculo do IRI irá retornar um valor adimensional ou com unidades não consistentes, $\left(\frac{m}{km}\right)$ ou $\left(\frac{in}{mi}\right)$, este último geralmente é mais usado. A relação entre o IRI e as características da via é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Relação entre o IRI e as características da via.



Fonte: Genta e Morello (2009).

Percebe-se que quanto menor o IRI, maior será a qualidade da via. Desse modo, pistas utilizadas em aeroportos e novos pavimentos tem um IRI abaixo de 5 e velocidade de tráfego superiores à 100 km/h. Entretanto, vias de menor qualidade, apresentam um maior do valor do IRI, resultando em velocidades de trânsito mais baixas.

3. METODOLOGIA

A fim de avaliar se o modelo de um quarto de veículo é uma boa aproximação de uma suspensão real, será realizado um estudo comparando os valores de vibração medidos em um veículo com a simulação do modelo de um quarto de veículo. Primeiramente, foi selecionado o veículo a ser estudado, um Renault Sandero 1.6l do modelo 2015, mostrado na Figura 3. Uma vez selecionado o carro, foram buscados os dados sobre as suspensões utilizadas pelo veículo em questão, bem como rigidez, amortecimento e os tipos estruturais utilizados. Com os dados do veículo, uma simulação de um quarto de veículo foi realizada com o auxílio do software Matlab, o qual se apresenta como uma fácil linguagem de programação, além de grande versatilidade. Assim, todos os algoritmos para simulações e cálculos no Matlab foram desenvolvidos pelo autor deste trabalho.

Figura 3 – Renault Sandero 1.6l modelo 2015.



Fonte: Autor (2017).

Para a realização da simulação, o modelo dinâmico de um quarto de veículo foi gerado, baseando-se no modelo dinâmico apresentado por Gillespie (1992). Modelo, este, que é desenvolvido através da Segunda Lei de Newton para montar

as equações de movimento. Devido as simplificações, este modelo apresenta apenas dois graus de liberdade, um relacionado a massa suspensa e outro a massa não suspensa do veículo.

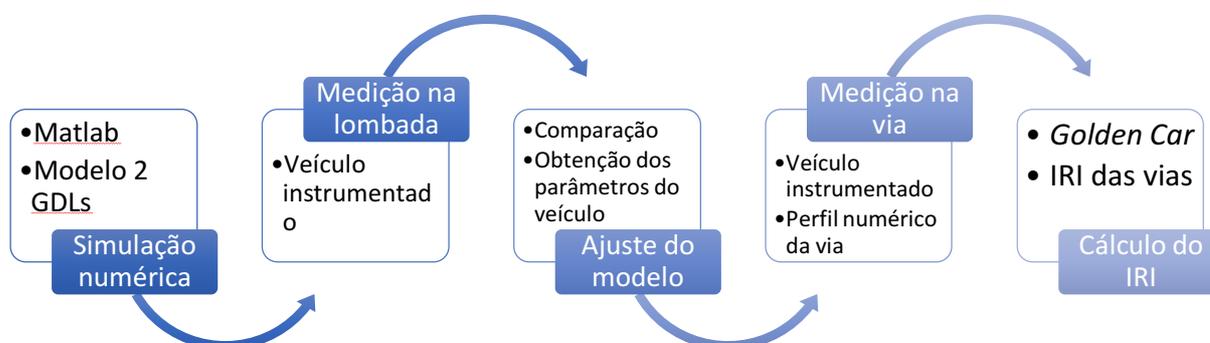
Segundo Ruthes (2016), o dado de entrada pode ser uma função pulso, o que simula a passagem do veículo sobre uma lombada. Para tal, baseou-se nas normas construtivas de lombadas retiradas da resolução 39/98 do Conselho Nacional de Trânsito, CONTRAN (1998). Neste trabalho, utilizou-se um perfil de lombada menor, empregado para redução de velocidade em áreas de estacionamento, como fonte de excitação da pista.

Experimentalmente, foram posicionados acelerômetros no veículo a fim de se obter os dados reais do comportamento da suspensão, como o modo de *bounce* e da massa não suspensa. Analisando as respostas do carro as condições de via e as situações em que é submetido. Para tal, estes testes foram realizados em ruas da cidade de Joinville, Santa Catarina, onde é possível analisar como o veículo se comporta em diferentes situações de estrada.

Após, realizados os testes e simulações, as respostas serão obtidas no domínio do tempo para, assim, fazer uma comparação do efeito da excitação na resposta do sistema real e do modelo simulado. Além disso, com os dados obtidos foi calculado o International Roughness Index (IRI) para determinar a qualidade das vias de Joinville.

Um fluxograma da sequência do trabalho é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma do trabalho.



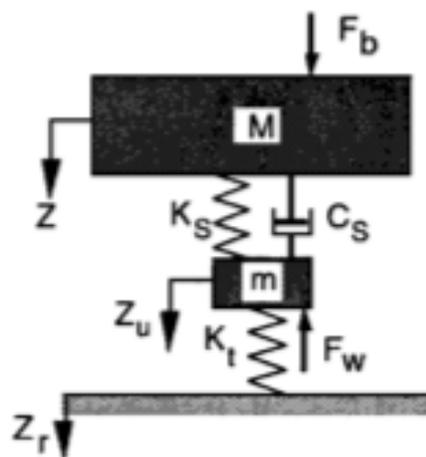
Fonte: Autor (2017).

3.1. Modelo dinâmico

Para fazer uma primeira análise do veículo, podem ser usados modelos dinâmicos simplificados, como o modelo de um quarto do veículo que será utilizado aqui. Neste modelo o automóvel é dividido em quatro partes, ou seja, cada parte é associada a uma roda e suspensão.

Este modelo, mostrado na Figura 5, é constituído pela massa suspensa M , que representa a carroceria, e a massa não suspensa m , representada pela massa do eixo mais a massa da roda. O sistema de suspensão apresenta os parâmetros de rigidez K_s e de amortecimento C_s . Por fim, o pneu é representado por sua rigidez K_t .

Figura 5 - Modelo de um quarto de veículo.



Fonte: GILLESPIE (1992).

Onde:

F_b = Força na massa suspensa.

F_w = Força na massa não suspensa.

Z = Deslocamento da massa suspensa.

Z_u = Deslocamento da massa não suspensa.

Z_r = Deslocamento da pista.

Conforme Gillespie (1992), através da Segunda Lei de Newton, pode-se encontrar as equações de movimento para a massa suspensa e massa não suspensa. Também, a fim de simplificar e por não haver nenhuma força agindo na

carroceria ou na roda, as forças F_b e F_w são nulas. Portanto, as equações de movimento resultantes são demonstradas nas Equações (1) e (2):

$$M\ddot{Z} + K_s(Z - Z_u) - C_s(\dot{Z} - \dot{Z}_u) = 0 \quad (1)$$

$$m\ddot{Z}_u + K_t(Z_u - Z_r) - K_s(Z - Z_u) - C_s(\dot{Z} - \dot{Z}_u) = 0 \quad (2)$$

3.2. Excitação pela base

Para se utilizar o mesmo perfil de lombada utilizado na medição experimental como excitação da simulação numérica, mediu-se a altura da lombada com uma trena a laser apoiada sobre uma estrutura horizontal, mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Medição da lombada.

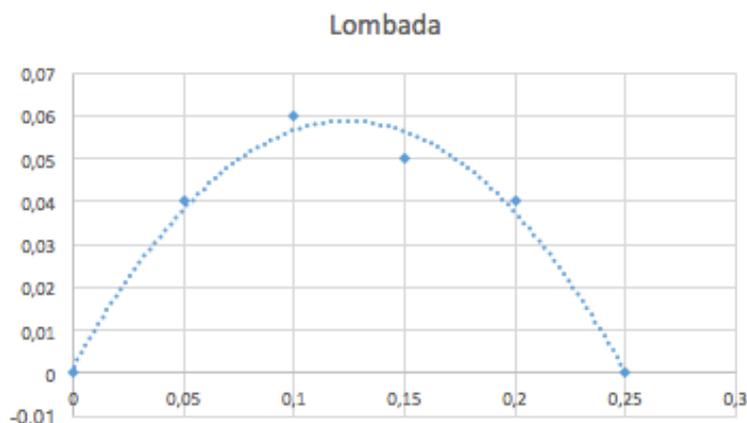


Fonte: Autor (2017).

Através dos pontos obtidos, foi possível encontrar uma equação aproximada que descreve o perfil desta lombada, descrita na Equação (3). Sendo que esta equação de segundo grau tem uma boa aproximação do perfil da lombada pelos pontos medidos, como demonstrado na Figura 7.

$$y = -3,7143 \cdot x^2 + 0,9229 \cdot x - 0,0014 \quad (3)$$

Figura 7 – Perfil da lombada obtido pelos pontos.



Fonte: Autor (2017).

3.3. Integrador numérico

A simulação para a solução do sistema de equações diferenciais é feita no software Matlab. Para isso, o integrador numérico *ode45* foi utilizado. Segundo McEvoy (2009), o *ode45* é uma técnica de integração Runge-Kutta de 4ª e 5ª ordem para resolver uma equação diferencial do tipo $f(t,y)$, onde y depende de t , e, portanto, ambos são definidos numa função anterior ao código de programação, conforme apresentado nos Apêndices 3, 4 e 5.

3.4. Medições experimentais

Para as medições serem realizadas, a utilização de sensores, como os acelerômetros, se mostra uma maneira simples e eficaz. Então, como já mencionado, esse será o método de obtenção dos dados. Entretanto, se faz necessário o uso de outros equipamentos juntamente com os acelerômetros, sendo o principal deles o hardware de aquisição de dados, Arduino.

3.4.1. Arduino

O Arduino surgiu na Itália em 2005 com um professor chamado Massimo Banzi, que buscava ensinar eletrônica e programação para seus alunos, porém, devido ao custo dos equipamentos e complexidade das linguagens de programação,

isso não era uma tarefa fácil. Pensando nisso, ele juntamente com o professor David Cuartielles decidiram criar uma placa própria e uma linguagem de programação, facilitando, assim, o aprendizado. Conforme Silva *et al.* (2014), o resultado do projeto foi uma ferramenta eletrônica de placa única, que se tornou acessível devido aos baixos custos, flexível pelas inúmeras possibilidades de utilização e de fácil montagem.

Segundo Oliveira (2015), o Arduino é uma placa de controle de entrada de dados (IN), como sensores, e saída de dados (OUT), para acionamento de motores e leds. As informações ou ordens são transmitidas de um computador para a placa que devem ser traduzidas utilizando a linguagem Wiring, onde o software interage diretamente com o hardware. Neste trabalho, será utilizado o Arduino Uno, mostrado na Figura 8, pois possui um número suficiente de portas de entradas e saídas disponíveis, sendo então ideal para o projeto.

Figura 8 – Arduino Uno.



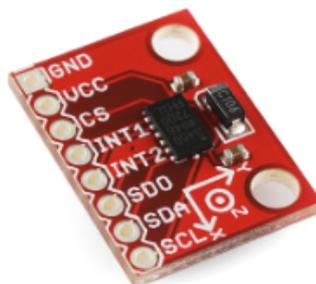
Fonte: Arduino.cc (2017).

Assim, através do Arduino, pode-se montar um circuito e conectar os acelerômetros para fazer as medições.

3.4.2. Acelerômetro inercial

O acelerômetro que será utilizado é o ADLX345 com três eixos, pois, conforme o Data Sheet do equipamento, além de apresentar alta resolução, este acelerômetro é ideal para a medição de aceleração estática de gravidade em aplicações de detecção de inclinação e aceleração dinâmica resultante do movimento ou choque. O acelerômetro é ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Acelerômetro ADXL345.



Fonte: SparkFun (2017).

Os dados técnicos do equipamento são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados técnicos do ADXL345.

Tensão de alimentação	2.0-3.6VDC
Consumo de potência	40uA em modo medição e 0.1uA em standby 2.5V
Interfaces	SPI e I2C
Dados de saída	Pares de 16 bits
Faixa de trabalho	2, 4, 8, 16 g

Fonte: Autor (2017).

Nas medições realizadas, os acelerômetros foram configurados para $\pm 8g$ de faixa, suficiente para não ocorrer “overload” nos sinais e taxa de amostragem de 55Hz. A discretização dos dados foi em torno de 0,02 segundos.

3.4.3. Circuito elétrico dos acelerômetros e Arduino

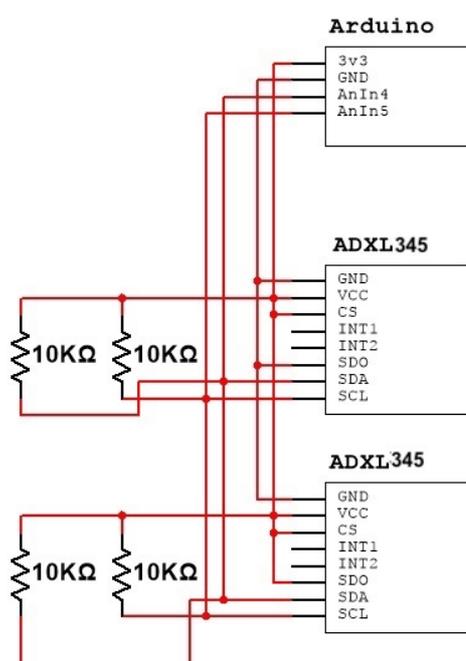
Com o Arduino e os dois acelerômetros em mãos, deve-se montar o circuito para serem realizadas as medições. Segundo o Code Young (2013), para tal, é utilizado o modo de comunicação I2C, com as seguintes conexões:

- Arduino 3.3V conectado ao VCC e CS de ambos os ADXL345.
- Arduino GND conectado ao GND de ambos os ADXL345.

- ADXL345 SDA conectados ao Arduino 3.3V usando um resistor de 10k Ohms.
- ADXL345 SCL conectados ao Arduino 3.3V usando um resistor de 10k Ohms.
- SDA de ambos os ADXL345 conectados ao Arduino I2C Data (A4).
- SCL de ambos os ADXL345 conectados ao Arduino I2C Clock (A5).
- SDO dos ADXL345 conectados um ao GND e outro ao 3.3V do Arduino.

O circuito montado para dois acelerômetros pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Circuito entre o Arduino e o ADXL345.



Fonte: Autor (2017).

3.5. Instrumentação do veículo

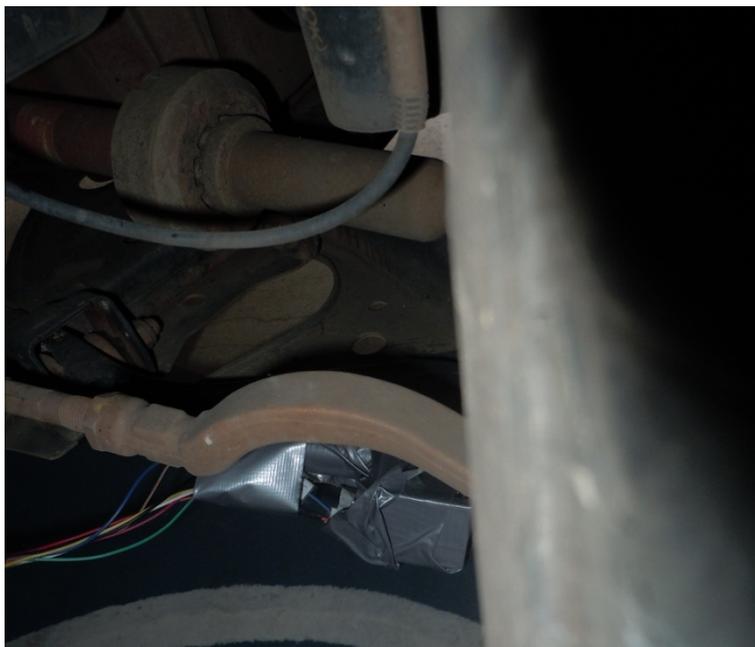
Para analisar a resposta da suspensão do veículo a uma excitação, foram utilizados os dois acelerômetros, um posicionado na massa não suspensa do veículo e outro na massa suspensa. Como será utilizado o modelo de um quarto de veículo, selecionou-se apenas a parte dianteira direita do veículo, onde um dos sensores foi posicionado na caixa de roda e o outro no braço da suspensão, Figura 11 e Figura 12 respectivamente.

Figura 11 – Acelerômetro posicionado na massa suspensa.



Fonte: Autor (2017).

Figura 12 – Acelerômetro posicionado na massa não suspensa.



Fonte: Autor (2017).

Os acelerômetros foram conectados ao Arduino, este ligado a um computador para gravar os dados resultantes, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Instrumentação do veículo.



Fonte: Autor (2017).

Uma vez que o veículo foi instrumentado, podem-se fazer as medições da resposta da massa suspensa e da massa não suspensa ao passar com o veículo sobre a lombada do teste e em via pública.

3.6. Estimativa do perfil da via

Através dos dados do veículo coletados, estimou-se o perfil da via numérico, que será aplicado no cálculo do IRI. Para tal, foi utilizada a Equação (2), isolando o termo de excitação pela base Z_r , resultando na Equação (4).

$$Z_r = \frac{m\ddot{Z}_u + K_t(Z_u) - K_s(Z - Z_u) - C_s(\dot{Z} - \dot{Z}_u)}{K_t} \quad (4)$$

Como os termos do lado direito da equação são todos conhecidos ou por medição ou cálculo numérico, é possível encontrar perfil numérico da via Z_r .

3.7. Análise da qualidade da via

Conforme Du *et al.* (2014), existe uma forte relação entre o IRI e a aceleração vertical do veículo, uma vez que é baseado no modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo. Desse modo, utilizando a estimativa do perfil da via e, segundo Genta e Morello

(2009), através de um novo modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo com dois graus de liberdade é possível calcular o valor do IRI, modelo este chamado de *Golden Car*, onde tem as seguintes razões definidas nas Equações (5), (6), (7) e (8):

$$\frac{K_s}{M} = 63,3 \text{ s}^{-2} \quad (5)$$

$$\frac{K_t}{M} = 653 \text{ s}^{-2} \quad (6)$$

$$\frac{m}{M} = 0,15 \quad (7)$$

$$\frac{C_s}{M} = 6,147 \text{ s}^{-1} \quad (8)$$

As equações dinâmicas do *Golden Car* para cálculo do IRI são as mesmas do modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo mostradas nas Equações (1) e (2), entretanto, a excitação do modelo se dá pelo perfil numérico da via obtido pela Equação (4).

Utilizando os valores do *Golden Car*, pode-se calcular o IRI através da Equação (9) para uma velocidade de referência na simulação numérica de 80km/h, definida por Du *et al.* (2014):

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L |\dot{Z} - \dot{Z}_u| dt \quad (9)$$

Onde:

L = Distância percorrida pelo veículo (m).

\dot{Z} = Velocidade da massa suspensa (m/s).

\dot{Z}_u = Velocidade da massa não suspensa (m/s).

4. RESULTADOS DO AJUSTE DE MODELO

Com as medições realizadas na lombada e os dados obtidos conforme a metodologia apresentada anteriormente (3.5. Instrumentação do veículo), fez-se necessário processar os dados a fim de obter o ajuste de modelo. Para tal, foi utilizado o Matlab para realizar os cálculos.

4.1. Correções dos dados

Ao posicionar os acelerômetros no veículo, os mesmos tiveram uma inclinação devido à superfície de fixação. Deste modo, foi necessário utilizar fatores de correção e uma matriz de rotação para que os dados resultantes estejam na direção vertical.

Primeiramente, foi realizada uma medição com os acelerômetros sobre uma superfície horizontal a fim de adquirir os componentes do vetor de aceleração da gravidade para cada um dos eixos dos acelerômetros. Posteriormente, com os sensores já instalados no veículo, realizou-se uma medição com o carro parado para obter os valores da inclinação resultante do posicionamento dos mesmos no veículo. Assim, pode-se calcular a matriz de rotação para a medição na direção vertical, demonstrado na Equação (10).

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \quad (10)$$

O vetor à direita representa as direções em x, y e z medidas já convertidas em m/s^2 dos acelerômetros instalados no veículo e o vetor à esquerda, sendo g igual a $9,81 m/s^2$, é o sentido em que se quer os dados após a transformação com a matriz, neste caso medindo a aceleração gravitacional. Com esses dois vetores é possível calcular a matriz de rotação, esta que foi calculada através das seguintes

funções do Matlab, *Vrrotvec* e *Vrrotvec2mat*. Portanto, a Equação (11) e a Equação (12) representam as matrizes de rotação calculadas para a excitação com a lombada para a massa não suspensa e massa suspensa, respectivamente.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -0,2206 & -0,9104 & -0,35 \\ -0,9104 & 0,321 & -0,261 \\ 0,35 & 0,261 & -0,8997 \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} -3,4569 \\ -2,5783 \\ 8,8864 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9857 & 0,1682 & 0,0105 \\ 0,1682 & -0,9779 & -0,1238 \\ -0,0105 & 0,1238 & 0,9922 \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} 0,1077 \\ -1,2662 \\ 10,1467 \end{pmatrix} \quad (12)$$

4.2. Medição dinâmica na lombada

A medição dinâmica foi com o veículo passando sobre a lombada, a qual tem o perfil ilustrado na Figura 14 e descrito no tópico 3.2. Excitação pela base. O teste foi realizado no estacionamento do Bloco E da UFSC – Campus Joinville no dia 19/08/2017. Também, foi definido a velocidade para realização do teste como, aproximadamente, 9 km/h (veículo com motor em rotação de marcha lenta na primeira marcha).

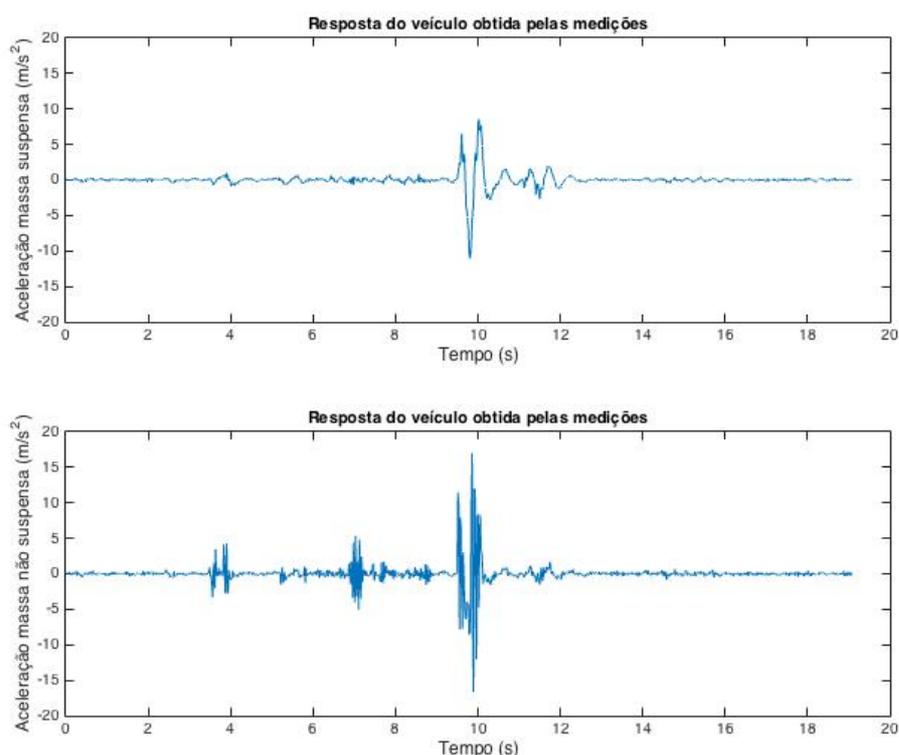
Figura 14 - Perfil da lombada do teste.



Fonte: Autor (2017).

A matriz de rotação foi empregada a cada ponto x, y e z obtido por meio do teste para se ter o resultado na direção de vertical. Assim, os resultados já corrigidos da massa suspensa e não suspensa são mostrados na Figura 15.

Figura 15 – Resultados da medição de vibração na lombada após as correções.



Fonte: Autor (2017).

Através dos gráficos, verifica-se que, como já esperado, ao passar pela lombada, próximo a 10s, tem-se uma aceleração tanto a parte não suspensa do veículo como na parte suspensa. As acelerações da massa não suspensa são cerca de 1,8 vez maior que a da massa suspensa uma vez que está em contato direto com o solo e, desse modo, é mais sensível a variações da pista. Também se observa no gráfico, onde pequenas irregularidades na pista antes da lombada ocasionaram oscilação nas rodas. Já para a massa suspensa, as acelerações são menores, isso demonstra o trabalho do sistema de suspensão que atenua as oscilações provenientes da via para não atingir os ocupantes do veículo na massa suspensa. Além disso, pode-se observar, claramente, que é um sistema subamortecido, pois se reduz as oscilações em função do tempo.

4.3. Simulação do modelo de ¼ de veículo

Para avaliar o modelo de ¼ de veículo foi realizada uma simulação no Matlab, desse modo, é possível comparar com os dados que foram obtidos na medição com os acelerômetros e, assim, definir se a aproximação pelo modelo é adequada. Sendo a entrada do sistema na simulação uma excitação pela lombada com o mesmo perfil testado, pretende-se avaliar se as respostas obtidas são na medição e na simulação são similares.

4.3.1. Peso do veículo e rigidez da suspensão

A fim de determinar a distribuição de massa em cada uma das rodas, com os ocupantes dentro do veículo, utilizaram-se balanças automotivas. Com o auxílio de um elevador automotivo, levantou-se o carro e o posicionou sobre as balanças, tendo, assim, a massa resultante em cada uma das rodas, conforme Tabela 3 e Tabela 4. Considerando-se o veículo com o motorista (~52kg) e um passageiro (~68kg), e o tanque abastecido.

Tabela 3 – Distribuição de massa no veículo sem motorista e passageiro.

Roda	Força na mola (kgf)
Dianteira esquerda	319,0
Dianteira direita	315,4
Traseira esquerda	200,2
Traseira direita	213,6
Total	1048,2

Fonte: Autor (2017).

Tabela 4 – Distribuição de massa no veículo com motorista e passageiro.

Roda	Força na mola (kgf)
Dianteira esquerda	351,0
Dianteira direita	350,0

Roda	Força na mola (kgf)
Traseira esquerda	224,8
Traseira direita	245,2
Total	1171,0

Fonte: Autor (2017).

Para estimar a rigidez da suspensão, seguiu-se o mesmo procedimento. Os valores de peso da balança foram medidas na iminência de tocar o solo (balança), apoiado no elevador automotivo, e em condição com molas comprimidas, obtendo-se assim a deflexão e a força das molas. O procedimento é ilustrado na Figura 16 e Figura 17. Assim, considerando a reação no eixo como uma força F atuando sobre as molas e x como a deflexão estática da mola, as constantes elásticas de mola K podem ser obtidas pela Lei de Hooke, Equação (13).

$$F = Kx \quad (13)$$

Figura 16 – Procedimento para a obtenção das forças nas molas.



Fonte: Autor (2017).

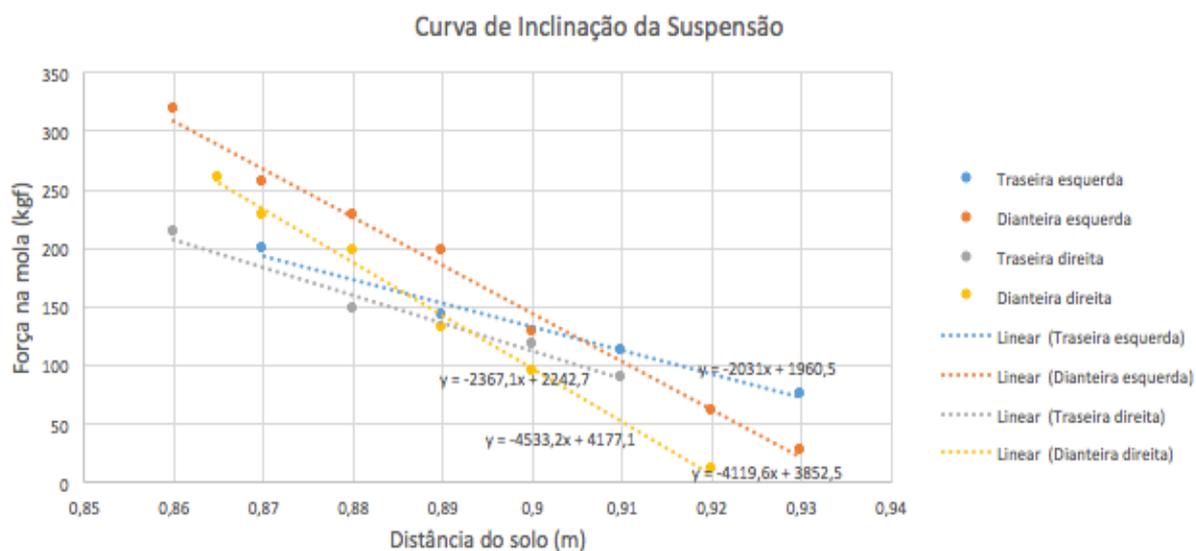
Figura 17 – Obtenção da força na mola dianteira direita.



Fonte: Autor (2017).

Com os dados obtidos, foi possível gerar os gráficos da altura do veículo em relação ao solo pela força exercida sobre a mola. Como mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Gráfico da inclinação da suspensão.



Fonte: Autor (2017).

Repetiram-se os ajustes para as outras partes do veículo, e, assim, pode-se calcular a rigidez da suspensão pela inclinação da reta, então, os valores médios de rigidezes obtidos são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Rigidezes da suspensão estimadas.

Eixo	Rigidez (N/m)
Dianteira direita	44470,692
Traseira direita	23221,251
Dianteira esquerda	40413,276
Traseira esquerda	19924,11

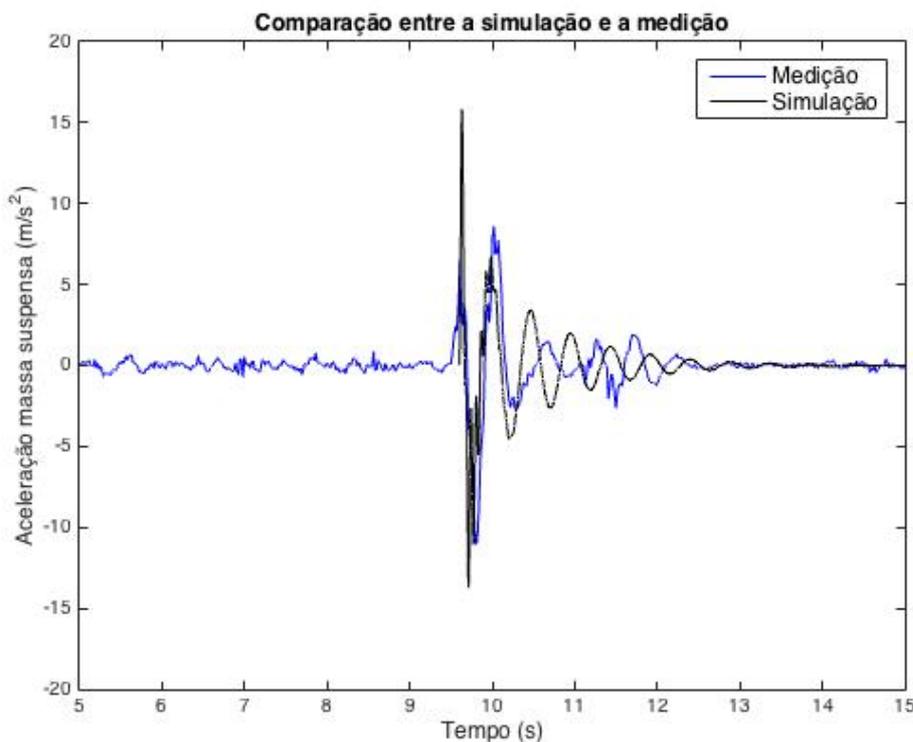
Fonte: Autor (2017).

4.3.2. Ajuste de modelo

Devido à dificuldade de fazer a medição do coeficiente de amortecimento e determinar a massa separada das rodas/suspensão e da carroceria, fez-se um ajuste de modelo. Onde se sobrepôs os gráficos resultantes da simulação e da medição. Uma vez que o medido traz os valores reais do veículo, ajustou-se a frequência de oscilação através da distribuição de peso entre a massa suspensa e não suspensa, e o decremento da oscilação proporcionado pelo coeficiente de amortecimento da suspensão.

Assim, pode-se comparar a simulação do modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo com o teste experimental com acelerômetros. Entretanto, só foi comparado a massa suspensa, pois a massa não suspensa apresenta baixo deslocamento, resultando em uma alta aceleração, mas o sensor não tem uma resposta rápida o suficiente para capturá-la. Assim, a comparação é mostrada na Figura 19.

Figura 19 – Comparação entre a simulação e a medição.

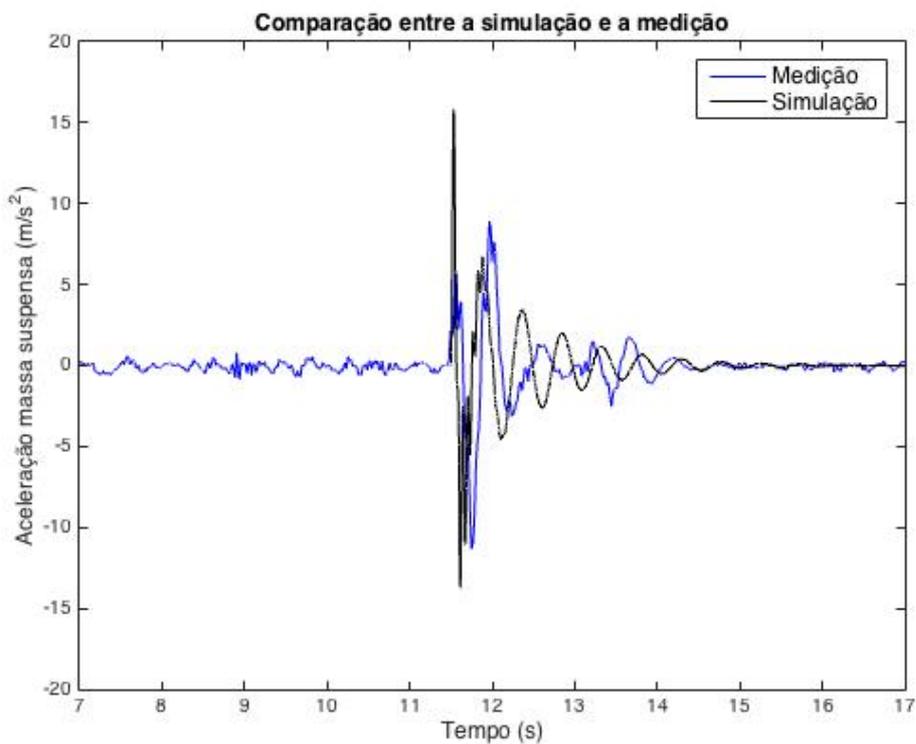


Fonte: Autor (2017).

Observa-se que o modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo funciona como uma aproximação simples e eficiente de um veículo real. O primeiro pico de aceleração representa a passagem das rodas dianteiras sobre a lombada e o segundo pico, das rodas traseiras. O restante das oscilações é a resposta natural do sistema. As amplitudes de oscilação estão próximas, assim como, o tempo de atenuação da oscilação. Entretanto, as frequências de oscilação se mostram ligeiramente diferentes. Uma vez que o principal problema desse modelo é não considerar a influência entre os outros graus de liberdade do veículo (modos de arfagem, rolamento e das outras massas não suspensas). Nesse caso, por exemplo, a passagem das rodas traseiras sobre a lombada acaba influenciando na dianteira, mesmo que seja uma pequena influência. Outro ponto que interferiu na comparação foi o fato de as rodas sofrerem dois impactos durante a passagem pela lombada, um ao subi-la e outro ao descê-la.

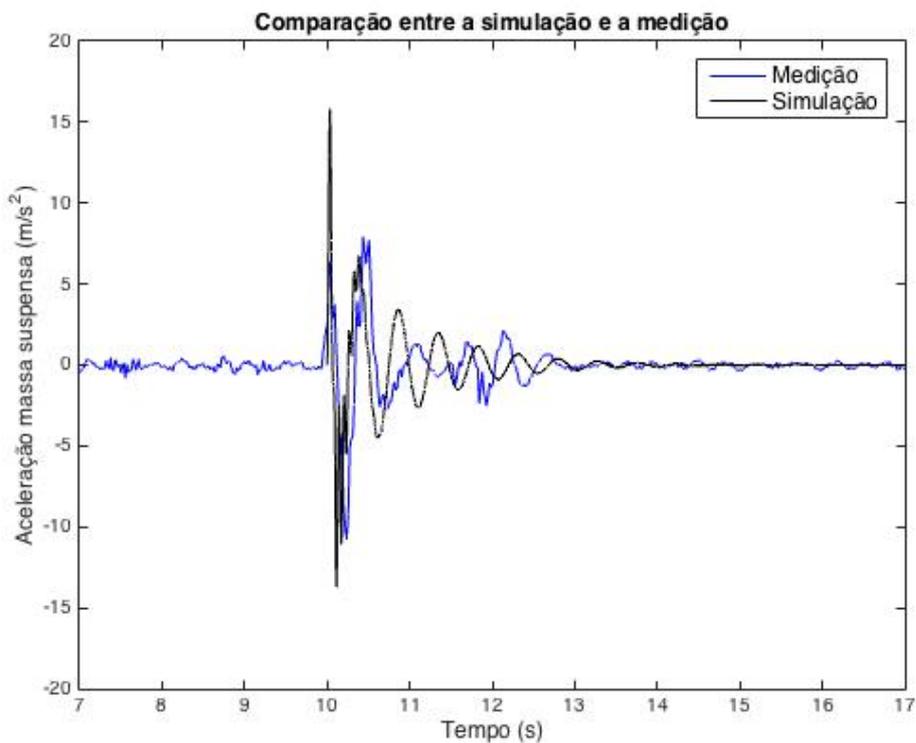
Repetiu-se o teste duas vezes, mas seguiu-se o mesmo padrão. Como mostrado na Figura 20 e na Figura 21.

Figura 20 – Primeira repetição da passagem pela lombada para comparação.



Fonte: Autor (2017).

Figura 21 – Segunda repetição da passagem pela lombada para comparação.



Fonte: Autor (2017).

Os parâmetros do veículo para a suspensão dianteira direita encontrados no ajuste de modelo, através de resultados empíricos e fazendo com que os picos iniciais coincidam, estão descritos na Tabela 6. Restringe-se o ajuste a esse ponto do veículo porque as medições na via foram realizadas somente nela, considerando a dinâmica de $\frac{1}{4}$ de veículo.

Tabela 6 – Parâmetros do veículo segundo o ajuste de modelo.

Parâmetro	Valor
Rigidez da suspensão dianteira direita	55000,0 (N/m)
Coeficiente de amortecimento dianteiro direito	800,0 (N.s/m)
Massa suspensa dianteira direita	294,0 (kg)
Massa não suspensa dianteira direita	56,0 (kg)
Rigidez do pneu dianteiro direito	550000,0 (N/m)

Fonte: Autor (2017).

Verifica-se uma diferença entre o dado de rigidez obtido experimentalmente e o obtido através do ajuste de modelo, sendo a rigidez ajustada cerca de 19% maior que a medida, devido as aproximações tanto durante as medições, quanto do modelo.

5. CÁLCULO DO IRI

Uma vez finalizado o ajuste de modelo é possível seguir para o cálculo do IRI, onde, após instrumentar o veículo, foram feitas medições nas ruas da cidade de Joinville/SC, no dia 22 de outubro de 2017. Entretanto, como se teve que posicionar os acelerômetros no veículo novamente, foi necessário fazer uma nova correção nos dados através das matrizes de rotação para massa suspensa e massa não suspensa descritas nas Equações (14) e (15), respectivamente.

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9929 & 0,0868 & 0,0813 \\ 0,0868 & -0,062 & -0,9943 \\ -0,0813 & 0,9943 & -0,0691 \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} 1,0572 \\ -1,5062 \\ 10,0265 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3453 & 0,9328 & 0,1037 \\ 0,9328 & -0,3289 & -0,1478 \\ -0,1037 & 0,1478 & 0,9836 \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} 0,8076 \\ -9,8804 \\ 0,6867 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Com os dados da medição corrigidos, foi realizado um processamento numérico a fim de obter o perfil da pista (3.6. Estimativa do perfil da via) para, posteriormente, calcular o IRI. Todavia, esse perfil de pista é numérico, ou seja, é um perfil de pista equivalente ao real por ser identificado através de um modelo de ordem menor do que o do veículo, em virtude do modelo de ¼ de veículo não avaliar todos os graus de liberdade e das aproximações feitas no ajuste de modelo, mas é adequado para o cálculo do IRI, definido pela norma ASTM E1926-08 (2015) com esta metodologia.

5.1.1. Filtragem do sinal

Após as medições em vias, fez-se necessário fazer uma filtragem digital do sinal coletado para eliminar a componente DC. Assim, foi utilizado um filtro Butterworth passa-alto de segunda ordem com taxa de amostragem de 55,5401 Hz e frequência de corte de 1,0 Hz a todos os sinais dos acelerômetros. Os parâmetros do filtro foram retirados de Fisher (2017).

5.1.2. Análise das vias

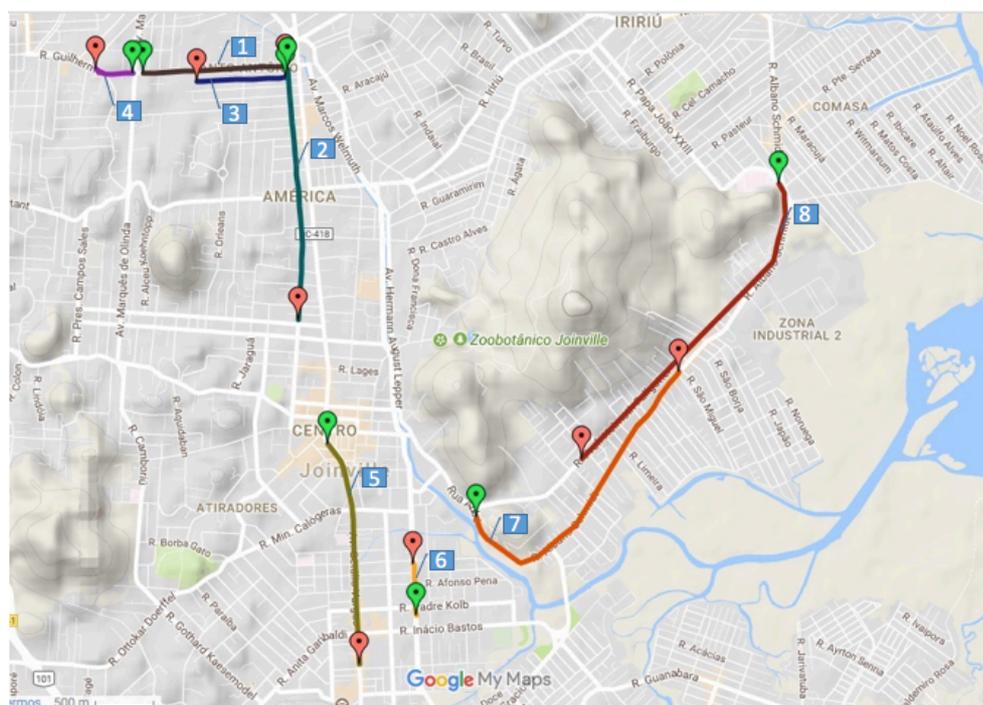
Selecionaram-se algumas das principais vias de Joinville-SC para a análise, além de outras vias pavimentadas. O mapa de Joinville com as vias analisadas é mostrado na Figura 22, onde as vias foram numeradas conforme a Tabela 7. O teste foi realizado uma única vez em cada via e com velocidade em torno de 40 km/h.

Tabela 7 – Numeração das vias.

Numeração	Via
1	Rua Presidente Prudente de Moraes
2	Rua Blumenau
3	Rua Marcílio Dias
4	Rua Guilherme
5	Avenida Getúlio Vargas
6	Avenida Coronel Procópio Gomes
7	Avenida Albano Schmitd
8	Avenida Helmut Falgatter

Fonte: Autor (2017).

Figura 22 –Mapa de Joinville/SC com os trechos analisados.



Fonte: Autor (2017).

As imagens de algumas das vias testadas e suas respectivas irregularidades são mostradas nas Figura 23 a Figura 28.

Figura 23 – Rua Presidente Prudente de Moraes (1) e sua irregularidade.



Fonte: Autor (2017).

Figura 24 – Rua Blumenau (2) e sua irregularidade.



Fonte: Autor (2017).

Figura 25 – Avenida Getúlio Vargas (5) e sua irregularidade.



Fonte: Autor (2017).

Figura 26 – Avenida Coronel Procópio Gomes (6) e sua irregularidade.



Fonte: Autor (2017).

Figura 27 – Avenida Albano Schmitd (7) e sua irregularidade.



Fonte: Autor (2017).

Figura 28 – Avenida Helmut Falgatter (8) e sua irregularidade.

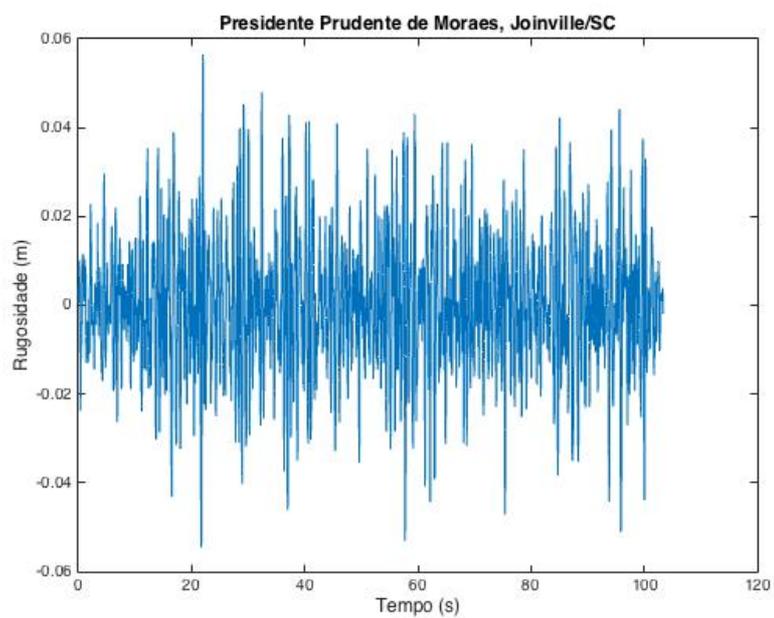


Fonte: Autor (2017).

Entretanto, o estudo teve foco, principalmente, nas ruas Presidente Prudente de Moraes e Blumenau, sendo que esta última precisou ser medida em duas partes,

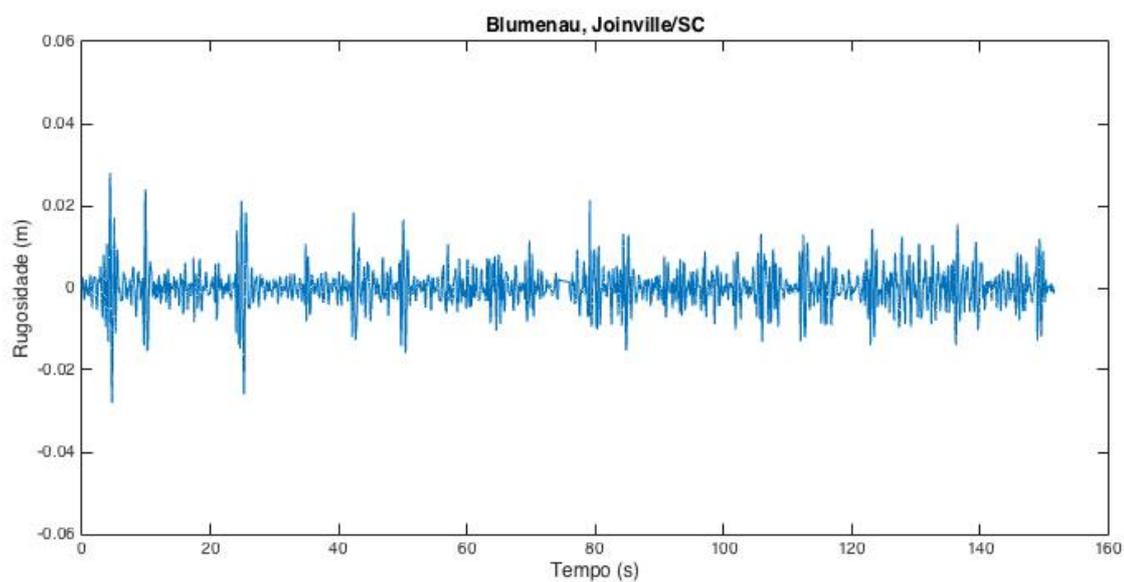
mas para a análise, apresentam-se os dados juntos. Assim, foi encontrado o perfil numérico de suas pistas, mostrados na Figura 29 e Figura 30.

Figura 29 –Perfil da rua Presidente Prudente de Moraes.



Fonte: Autor (2017).

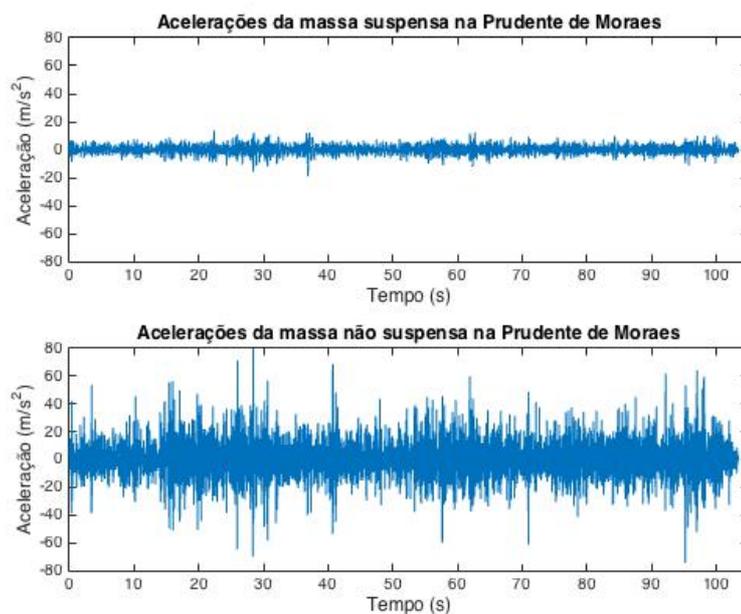
Figura 30 – Perfil da rua Blumenau.



Fonte: Autor (2017).

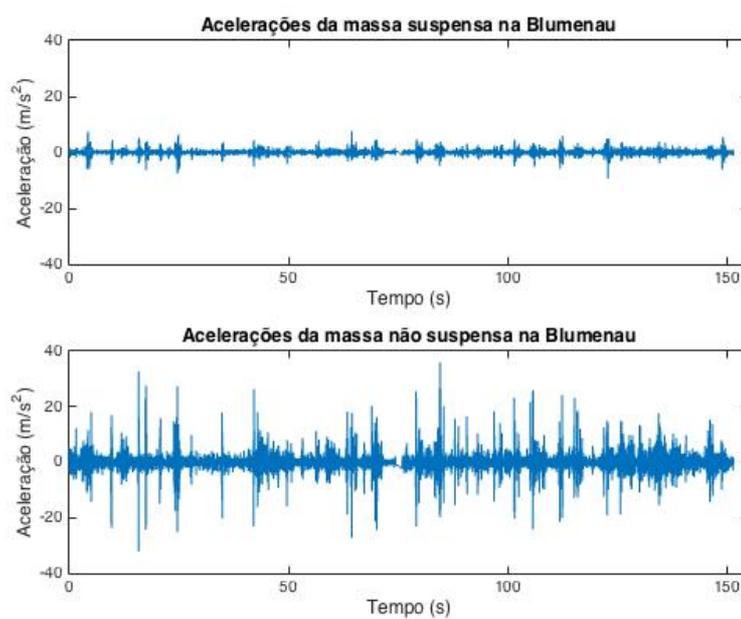
Também, são apresentadas, na Figura 31 e na Figura 32, as acelerações da massa suspensa e não suspensa do veículo ao trafegar as duas ruas.

Figura 31 – Acelerações das massas do veículo na Rua Presidente Prudente de Moraes.



Fonte: Autor (2017).

Figura 32 – Acelerações das massas do veículo na Rua Blumenau.



Fonte: Autor (2017).

Através desses perfis e com os parâmetros do *Golden Car*, calculou-se o valor do IRI para cada uma das vias, apresentados na Tabela 8. Os valores referem-se ao IRI de todo o comprimento medido da via. As discussões dos resultados são apresentadas ao final deste tópico na forma comparativa entre estas duas vias.

Tabela 8 – IRI das ruas Presidente Prudente de Moraes e Blumenau.

Rua	Distância (m)	IRI
Presidente Prudente de Moraes	1.149,04	14,88
Blumenau	1.684,53	3,69

Fonte: Autor (2017).

Mas para uma análise da variação deste valor ao longo da trajetória, calculou-se o IRI a cada 200 m para as duas vias, conforme Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9 – IRI detalhado para a rua Presidente Prudente de Moraes.

Início (m)	Final (m)	IRI
0	200,08	12,76
200,08	400,19	16,24
400,19	600,15	14,74
600,15	800,09	17,31
Média		14,96
Desvio Padrão		1,8364

Fonte: Autor (2017).

Tabela 10 – IRI detalhado para a rua Blumenau.

Início (m)	Final (m)	IRI
0	200,02	4,11
200,02	400,12	3,35
400,12	600,09	3,36
600,09	800,06	3,43
800,06	1000,11	3,5
1.000,11	1200,02	3,79
1.200,02	1400,17	3,61
1.400,17	1600,12	4,13
Média		3,66
Desvio Padrão		0,3179

Fonte: Autor (2017).

Seguindo os mesmos princípios, calculou-se o valor do IRI para as outras vias em que foram realizadas as medições, descritos na Tabela 11, para distância total medida.

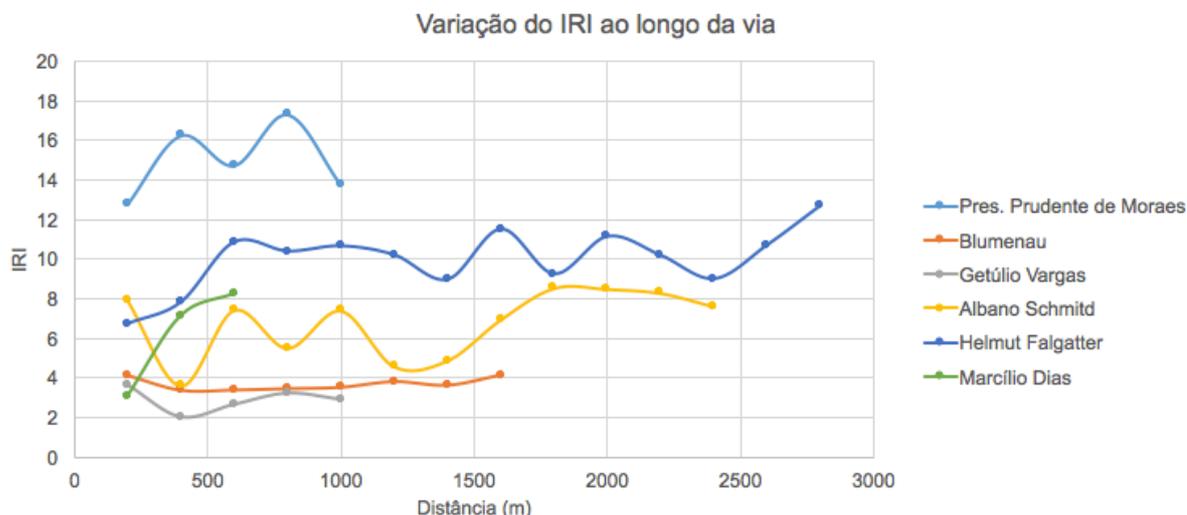
Tabela 11 – IRI das vias de Joinville/SC

	Rua	Distância (m)	IRI
3	Rua Marcílio Dias	744,14	5,25
4	Rua Guilherme	109,01	16,01
5	Avenida Getúlio Vargas	1.088,44	2,92
6	Avenida Coronel Procópio Gomes	356,90	4,82
7	Avenida Albano Schmitd	2.499,64	6,86
8	Avenida Helmut Falgatter	2.838,83	10,11

Fonte: Autor (2017).

O IRI detalhado, a um intervalo de cada 200m, dessas vias da Tabela 11 se encontra nos anexos. A variação do IRI ao longo das vias é mostrada na Figura 33.

Figura 33 – Variação do IRI ao longo da via.



Fonte: Autor (2017).

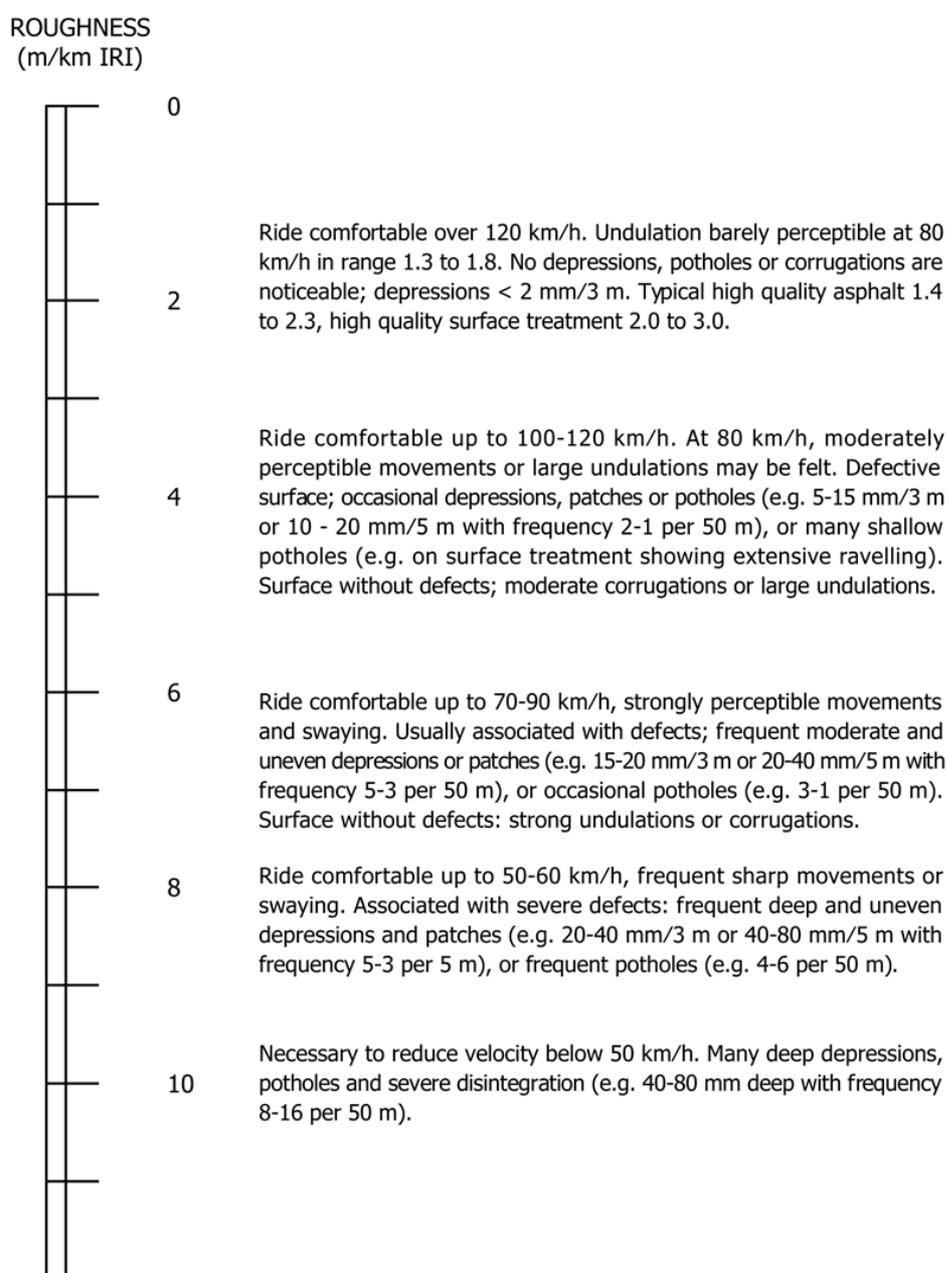
Através dos gráficos na Figura 29 e na Figura 30, observa-se que em vias com maior rugosidade, pavimentadas com paralelepípedos, como o caso da Rua Presidente Prudente de Moraes ($IRI = 14,88$), as acelerações das massas do veículo são maiores do que em vias asfaltadas e resultam em um valor de IRI maior. E como demonstrado na Figura 2 por Genta e Morello (2009) e pela norma ASTM E1926-08 (2015) na Figura 34 e na Figura 35, esse maior valor de IRI evidencia que a via não é pavimentada ou está com seu pavimento danificado. Quando uma via não está bem conservada haverá maior número de desníveis e ondulações, o que resulta em uma maior oscilação das massas do veículo e, portanto, é recomendada uma velocidade de até 40 km/h para maior conforto e preservação dos componentes mecânicos do veículo.

Além disso, vias com um valor de IRI maior fazem com que as acelerações sobre os ocupantes do veículo também sejam mais elevadas, prejudicando seu conforto. Conforme a norma ISO 2631 (1997), demonstrada na Tabela 1, acelerações acima de 1 m/s^2 já fazem com que os ocupantes sintam desconforto se forem apresentadas com alta incidência. Assim, calculou-se a média RMS da massa suspensa, da Figura 31, para comparar os valores de aceleração, resultando em $3,12 \text{ m/s}^2$, e indicativo de extremo desconforto aos ocupantes do veículo.

Por outro lado, as ruas com melhor estado de conservação, como a Blumenau, apontam para um menor valor de IRI ($IRI = 3,69$), uma vez que as

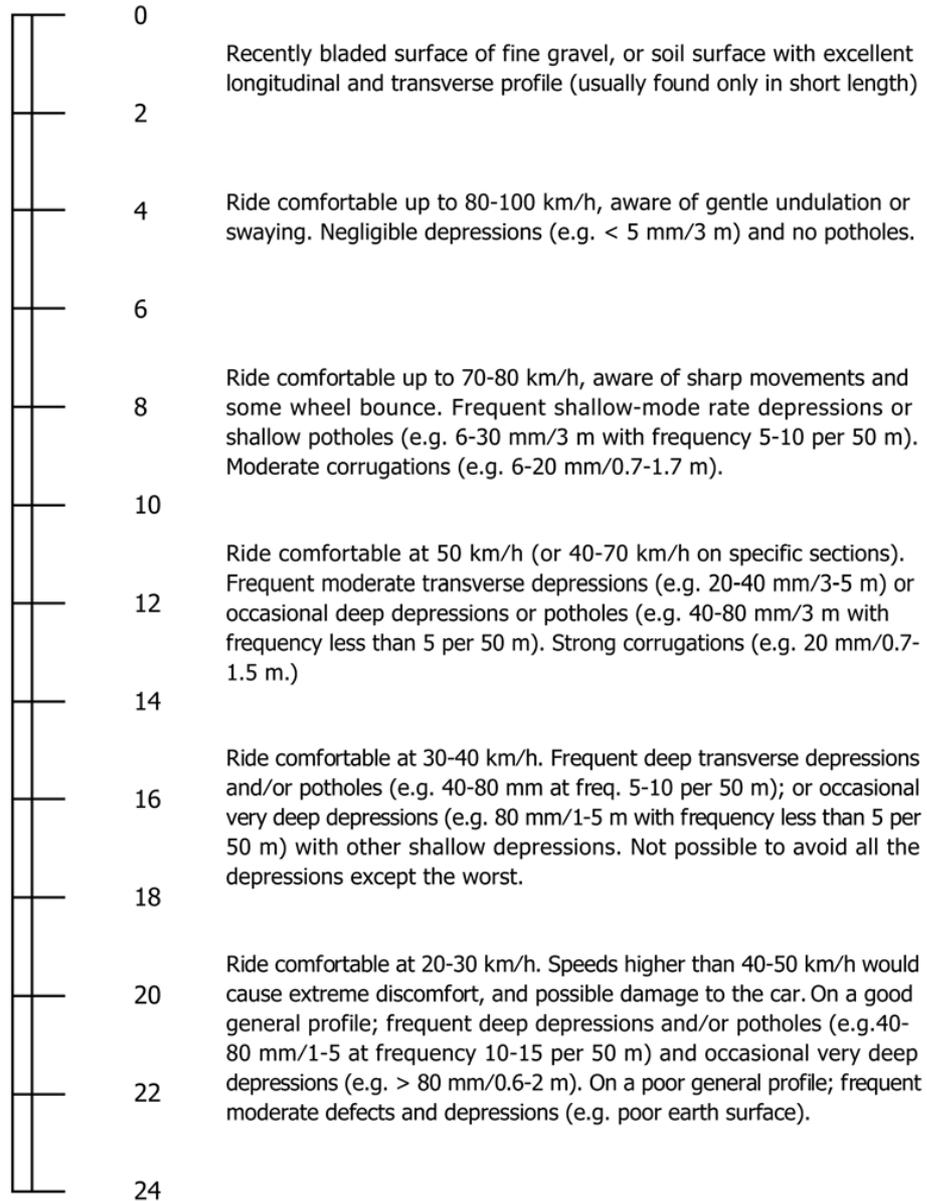
oscilações durante o percurso pela via são baixas. Assim, são recomendadas velocidades de até 120 km/h, pois as oscilações em vias com um valor de IRI menor, as acelerações sentidas pelos ocupantes do veículo são mais baixas. E para comparar com a norma ISO 2631 (1997), a média RMS da massa suspensa calculada da Figura 32 para esta via foi de 1,03 m/s², sendo pela Tabela 1 caracterizada como pouco confortável, isso devido às pequenas irregularidades presentes no asfalto.

Figura 34 – IRI para vias pavimentadas.



Fonte: ASTM E1926-08 (2015).

Figura 35 – IRI para vias não pavimentadas.

ROUGHNESS
(m/km IRI)

Fonte: ASTM E1926-08 (2015).

6. CONCLUSÃO

Durante o projeto de um veículo, o uso de simulações se torna uma importante ferramenta, pois é possível obter respostas rápidas, diminuindo o custo do projeto e otimizando-o. Para o projeto de uma suspensão não é diferente, sendo necessário simular a dinâmica do veículo. E os modelos desenvolvidos para este fim, juntamente com softwares, como o Matlab, para resolver as equações se mostram poderosos instrumentos ao projeto. O modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo se mostrou uma aproximação limitada, mas eficaz pela sua simplicidade, uma vez que usa somente dois graus de liberdade do veículo. Como esse modelo não considera os outros graus de liberdade que influenciam na dinâmica do veículo podem ocorrer divergências dos resultados simulados quando comparados ao real, portanto, recomenda-se utilizá-lo apenas para obtenção de dados preliminares ou cálculos específicos do projeto. Assim, a utilização de modelos mais completos seria mais eficaz no projeto visando garantir o conforto dos usuários do veículo.

Visto que o IRI é utilizado para medir as irregularidades das vias, esse índice apresenta uma forte relação com o conforto do usuário do veículo. Pois, ao se obter um valor alto de IRI em determinada via, as pessoas no interior do veículo sentiriam desconforto ao trafegarem por ela. Assim, os dados coletados através desse instrumento podem ser usados como base para verificar se são necessários reparos na via. As medições realizadas resultaram em valores de IRI próximos ao esperado, devido o estado de conservação da via.

Todavia, em algumas das ruas medidas resultaram em um valor muito elevado do IRI, equiparando-se a vias não pavimentadas, portanto, essas ruas poderiam necessitar de reformas, de modo que melhorem o conforto do usuário e não danifiquem o sistema de suspensão do veículo. Além disso, em vias secundárias, em que não se esperam velocidades acima de 40km/h, o uso de pavimentos com altos valores de IRI pode induzir os motoristas a respeitarem o limite de velocidade, como medida de maior segurança no trânsito.

REFERÊNCIAS

ABULIZI, N. *et al.* Measuring and Evaluating of Road Roughness Conditions with a Compact Road Profiler and ArcGIS. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**. p.398-411, 2016.

Arduino, **Plataforma Arduino**. Disponível em <<https://www.arduino.cc>>. Acesso em julho de 2017.

ARHIN, Stephen A.; NOEL, Errol C.; RIBBISO, Asteway. Acceptable International Roughness Index Thresholds based on Present Serviceability Rating. **Journal of Civil Engineering Research**, Washington, EUA. p.90-96, 2015.

ASTM E1926-08; **Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements**. American Society for Testing and Materials International. 2015.

CASAS, W. J. P; DREHMER, L. R. C. **Avaliação do Conforto do Motorista na Área Veicular**. CONEM 2010. Paraíba, Brasil. 2010.

CODE YOUNG, **Code Young: Connecting two ADXL345s to one Arduino**. Disponível em < <http://codeyoung.blogspot.com.br/2013/06/connecting-two-adxl345s-to-one-arduino.html> >. Acesso em agosto de 2017.

CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito 1998. Resolução. Art. 12 da lei n 9.503 de 23 de set. de 1997. Disponível em: < <http://denatran.gov.br/download/lombadas.pdf>>. Acesso em 20 jun 2017.

DREHMER, L. R. C. **Otimização de Parâmetros Concentrados de Suspensão para Conforto e Segurança Veicular**. 2012. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DU, Y. *et al.* **Measurement of International Roughness Index by Using Z-Axis Accelerometers and GPS**. Shanghai, China. Jun. 2014.

FISHER, T. **Butterworth / Bessel / Chebyshev Filters**. Disponível em < <http://www-users.cs.york.ac.uk/~fisher/mkfilter/trad.html> >. Acesso em setembro de 2017.

GENTA, G.; MORELLO, L. **The Automotive Chassis: Volume 1: Components Design**. Dordrecht: Springer, 2009.

GENTA, G.; MORELLO, L. **The Automotive Chassis: Volume 2: System Design**. Dordrecht: Springer, 2009.

GILLESPIE, T. D. **Fundamental of Vehicles Dynamics**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992, 470 p.

HEIBING, B; ERSOY, M. **Chassis Handbook**. Berlin: Springer, 2011. 590 p.

ISO 2631 - 1//1997; **ISO 2631 - 1 – Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole - Body Vibration – Part 1: General requirements**. 2 ed. International Organization for Standardization. Geneva, Swiss, 1997.

KNOWLES, D. **Classroom manual for automotive suspension & steering systems**. 5. ed. Clifton Park, NY: Delmar, 2011.

MCEVOY, Erica. **Using Matlab to integrate Ordinary Differential Equations (ODEs)**. MIT. 17 jun. 2009.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race car vehicle dynamics**. Warrendale, Pa: Society of Automotive Engineers, 1995. 890 p.

OLIVEIRA, Allisson Lopes de. **Modelo híbrido de aprendizagem utilizando a plataforma Arduino aplicado ao ensino tecnológico de informática**. 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

RUTHES, João Pedro. **Análise de Sensibilidade de Suspensão Veicular**. 2016. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

SILVA, A. *et al.* **Projeto e implementação de um sistema automático de controle da inclinação**. Instituto Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

SPARKFUN, **SparkFun Eletronics Inc**. Disponível em <<https://www.sparkfun.com/products/9836>>. Acesso em julho de 2017.

STONE, R.; BALL, J. K. **Automotive Engineering Fundamentals**. Warrendale, Pa: Society of Automotive Engineers, 2004.

WALKER, G. H.; STANTON, N. A.; SALMON, P. M. **Humam Factors in Automotive Engineering and Technology**. Farnham, Surrey: Ashgate, 2015.

WONG, J. Y. **Theory of Ground Vehicles**. 3 ed. Canada. 2001.

APÊNDICES

Apêndice 1 – Algoritmo Arduino.

```

#include <Wire.h>
#define DEVICE_A (0x1D) //first ADXL345 device address
#define DEVICE_B (0x53) //second ADXL345 device address
#define TO_READ (6) //num of bytes we are going to read each time (two bytes for each axis)

byte buff[TO_READ]; //6 bytes buffer for saving data read from the device
char str[512]; //string buffer to transform data before sending it to the serial port
unsigned long time;

void writeTo(int device, byte address, byte val) {
  Wire.beginTransmission(device); //start transmission to device
  Wire.write(address); // send register address
  Wire.write(val); // send value to write
  Wire.endTransmission(); //end transmission
}

void readFrom(int device, byte address, int num, byte buff[]) {
  Wire.beginTransmission(device); //start transmission to device
  Wire.write(address); //sends address to read from
  Wire.endTransmission(); //end transmission

  Wire.beginTransmission(device); //start transmission to device
  Wire.requestFrom(device, num); // request 6 bytes from device

  int i = 0;
  while(Wire.available()) //device may send less than requested (abnormal)
  {
    buff[i] = Wire.read(); // receive a byte
    i++;
  }
  Wire.endTransmission(); //end transmission
}

void setup()
{
  Wire.begin(); // join i2c bus (address optional for master)
  Serial.begin(250000); // start serial for output

  // Change range to +/-16g (0x0B)
  writeTo(DEVICE_A, 0x31, 0x0B);
  writeTo(DEVICE_B, 0x31, 0x0B);

  // Change the sample rate (3200Hz)
  // writeTo(DEVICE_A, 0x2C, 0x0F);
  // writeTo(DEVICE_B, 0x2C, 0x0F);

```

```

//Turning on the both ADXL345s
writeTo(DEVICE_A, 0x2D, 24);
writeTo(DEVICE_B, 0x2D, 24);
}

int regAddress = 0x32; //first axis-acceleration-data register on the ADXL345
int xa = 0, ya = 0, za = 0;
int xb = 0, yb = 0, zb = 0;

void loop()
{
  readFrom(DEVICE_A, regAddress, TO_READ, buff); //read the acceleration data from the ADXL345
  //each axis reading comes in 10 bit resolution, ie 2 bytes. Least Significat Byte first!!
  //thus we are converting both bytes in to one int
  xa = (((int)buff[1]) << 8) | buff[0];
  ya = (((int)buff[3])<< 8) | buff[2];
  za = (((int)buff[5]) << 8) | buff[4];

  readFrom(DEVICE_B, regAddress, TO_READ, buff); //read the acceleration data from the second ADXL345
  xb = (((int)buff[1]) << 8) | buff[0];
  yb = (((int)buff[3])<< 8) | buff[2];
  zb = (((int)buff[5]) << 8) | buff[4];

  //time = millis();
  // Vetor de tempo em microsegundos.
  time = micros();

  //we send the x y z values as a string to the serial port
  sprintf(str, "%4ld %d %d %d %d %d %d",time, xa, ya, za, xb, yb, zb);
  Serial.print(str);
  // Serial.print(time);
  Serial.write(10);

  //It appears that delay is needed in order not to clog the port
  delay(15);
}

```

Apêndice 2 – IRI detalhado das vias de Joinville/SC.

Tabela 12 – IRI detalhado da rua Albano Schmitd.

Início (m)	Final (m)	IRI
0	200,02	7,94
200,02	400,09	3,58
400,09	600,04	7,41
600,04	800,12	5,5
800,12	1.000,04	7,39
1.000,04	1.200,02	4,56
1.200,02	1.400,16	4,86
1.400,16	1.600,11	6,94
1.600,11	1.800,02	8,54
1.800,02	2.000,13	8,49
2.000,13	2.200,04	8,28
2.200,04	2.400,15	7,6
Média		6,76
Desvio Padrão		1,6941

Fonte: Autor (2017).

Tabela 13 – IRI detalhado da avenida Getúlio Vargas.

Início (m)	Final (m)	IRI
0	200,09	3,62
200,09	400,10	2,02
400,10	600,15	2,64
600,15	800,09	3,2
800,09	1.000,04	2,89
Média		2,87
Desvio Padrão		0,6015

Fonte: Autor (2017).

Tabela 14 – IRI detalhado da rua Helmut Falgatter.

Início (m)	Final (m)	IRI
0	200,02	6,72
200,02	400,04	7,81
400,04	600,04	10,83
600,04	800,09	10,38
800,09	1.000,11	10,64
1.000,11	1.200,1	10,19
1.200,10	1.400,01	8,96
1.400,01	1.600,09	11,48
1.600,09	1.800,00	9,24
1.800,00	2.000,09	11,12
2.000,09	2.200,03	10,16
2.200,03	2.400,09	8,99
2.400,09	2.600,01	10,71
2.600,01	2.800,17	12,7
Média		9,995
Desvio Padrão		1,5387

Fonte: Autor (2017).

Tabela 15 – IRI detalhado da rua Marcílio Dias.

Início (m)	Final (m)	IRI
0	200,05	3,07
200,05	400,05	7,11
400,05	600,03	8,24
Média		6,14
Desvio Padrão		2,7181

Fonte: Autor (2017).

Apêndice 3 – Algoritmo Matlab para analisar as medições na lombada.

```

clear all
close all
clc

g=-9.81;

%fator de correção massa suspensa
fators_x=244.3902;
fators_y=229.8012;
fators_z=241.4292;

%fator de correção massa não suspensa
fatoru_x=249.0573;
fatoru_y=234.6665;
fatoru_z=248.2895;

%média carro parado
xu=87.7637;
yu=61.6763;
zu=-224.9146;

xs=-2.6832;
ys=29.6614;
zs=-249.7150;

%correção carro parado
xu_c=xu*g/fatoru_x;
yu_c=yu*g/fatoru_y;
zu_c=zu*g/fatoru_z;

xs_c=xs*g/fators_x;
ys_c=ys*g/fators_y;
zs_c=zs*g/fators_z;

%cálculo matriz de rotação
vetoru=[xu_c yu_c zu_c]';
vetors=[xs_c ys_c zs_c]';
vetor_final=[0 0 g]';

ru=vrrotvec(vetoru,vetor_final);
rs=vrrotvec(vetors,vetor_final);

mu=vrrotvec2mat(ru);
ms=vrrotvec2mat(rs);

%importando dados
data = xlsread('medicoes.xlsx','Plan2');

VarName1 = data(:,1);
VarName2 = data(:,2);
VarName3 = data(:,3);
VarName4 = data(:,4);
VarName5 = data(:,5);
VarName6 = data(:,6);
VarName7 = data(:,7);

clearvars data raw;

%retirando o shift
A=mean(VarName2)*g/fatoru_x;
B=mean(VarName3)*g/fatoru_y;
C=mean(VarName4)*g/fatoru_z;

D=mean(VarName5)*g/fators_x;
E=mean(VarName6)*g/fators_y;
F=mean(VarName7)*g/fators_z;

%corrigindo dados
medicao_xu=VarName2*g/fatoru_x - A;
medicao_yu=VarName3*g/fatoru_y - B;
medicao_zu=VarName4*g/fatoru_z - C;

medicao_xs=VarName5*g/fators_x - D;

```

```

medicao_ys=VarName6*g/fators_y - E;
medicao_zs=VarName7*g/fators_z - F;

for i =1:length(VarName2)
    u=[medicao_xu(i) medicao_yu(i) medicao_zu(i)];
    resposta_u(i,:)=(mu*u)';
    s=[medicao_xs(i) medicao_ys(i) medicao_zs(i)];
    resposta_s(i,:)=(ms*s)';
end

figure
subplot(212)
plot(VarName1/1e6,resposta_u(:,3)*-1)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',12);
ylabel('Aceleração massa não suspensa (m/s^2)','FontSize',12);
title('Resposta do veículo obtida pelas medições')
axis([0 20 -20 20])

subplot(211)
plot(VarName1/1e6,resposta_s(:,3)*-1)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',12);
ylabel('Aceleração massa suspensa (m/s^2)','FontSize',12);
title('Resposta do veículo obtida pelas medições')
axis([0 20 -20 20])

```

Apêndice 4 – Algoritmo Matlab para a simulação na lombada.

Algoritmo Principal.

```

clc
clear all
close all

%parâmetros veículo
Ks=55000;
Kt=Ks*10;
C=800;
m1=350*0.84;
m2=350*0.16;

%simulação
tspan=[0:0.001:20];
y0=[0,0,0,0];
[t,yc]=ode45(@(t,y) quarter_model(t,y,Ks,Kt,C,m1,m2),tspan,y0,[]);

acel_u=diff(yc(:,4))/0.001;
acel_s=diff(yc(:,2))/0.001;

suspensa= [0;acel_s];
nao_suspensa=[0;acel_u];

figure
subplot(211)
plot(t+9.6,nao_suspensa);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Aceleração massa não suspensa (m/s^2)');
subplot(212)
plot(t+9.6,suspensa);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Aceleração massa suspensa (m/s^2)');

```

Algoritmo da função do modelo de ¼ de veículo.

```

function z=quarter_model(t,y,Ks,Kt,C,m1,m2)
z=zeros(4,1);

% Bump excitation
if -3.7143*(t*9/3.6)^2+0.9229*(t*9/3.6)+0.0014 > 0
    d=-3.7143*(t*9/3.6)^2+0.9229*(t*9/3.6)+0.0014;
else
    d=0;
end

% Equações 1/4 veículo
z(1)=y(2);
z(2)=(-C*(y(2)-y(4))-Ks*(y(1)-y(3)))/m1;
z(3)=y(4);
z(4)=(-C*(y(4)-y(2))-Ks*(y(3)-y(1))-Kt*(y(3)-d))/m2;

```

Apêndice 5 – Algoritmo Matlab para cálculo do IRI.

Algoritmo Principal.

```

clear all
close all
% clc

g=-9.81;

%fator de correção massa suspensa
fators_x=244.3902;
fators_y=229.8012;
fators_z=241.4292;

%fator de correção massa não suspensa
fatoru_x=249.0573;
fatoru_y=234.6665;
fatoru_z=248.2895;

%média carro parado
xu=-26.8407;
yu=36.0295;
zu=-253.768;

xs=-20.1198;
ys=231.4515;
zs=-16.9005;

%correção carro parado
xu_c=xu*g/fatoru_x;
yu_c=yu*g/fatoru_y;
zu_c=zu*g/fatoru_z;

xs_c=xs*g/fators_x;
ys_c=ys*g/fators_y;
zs_c=zs*g/fators_z;

%cálculo matriz de rotação
vetoru=[xu_c yu_c zu_c]';
vetors=[xs_c ys_c zs_c]';
vetor_final=[0 0 g]';

ru=vrrotvec(vetoru,vetor_final);
rs=vrrotvec(vetors,vetor_final);

mu=vrrotvec2mat(ru);
ms=vrrotvec2mat(rs);

%importando dados
%data = xlsread('testes.xlsx','helmut_falgatte');
data = xlsread('testes.xlsx','getulio');
%data = xlsread('testes.xlsx','albano_schmidt');

VarName1 = data(:,1);
VarName2 = data(:,2);
VarName3 = data(:,3);
VarName4 = data(:,4);
VarName5 = data(:,5);
VarName6 = data(:,6);
VarName7 = data(:,7);

clearvars data raw;

%retirando o shift
A=mean(VarName2)*g/fatoru_x;
B=mean(VarName3)*g/fatoru_y;
C=mean(VarName4)*g/fatoru_z;

D=mean(VarName5)*g/fators_x;
E=mean(VarName6)*g/fators_y;
F=mean(VarName7)*g/fators_z;

```

```

%corrigindo dados
medicao_xu=VarName2*g/fatoru_x - A;
medicao_yu=VarName3*g/fatoru_y - B;
medicao_zu=VarName4*g/fatoru_z - C;

medicao_xs=VarName5*g/fators_x - D;
medicao_ys=VarName6*g/fators_y - E;
medicao_zs=VarName7*g/fators_z - F;

for i =1:length(VarName2)
    u=[medicao_xu(i) medicao_yu(i) medicao_zu(i)];
    resposta_u(i,:)=(mu*u);
    s=[medicao_xs(i) medicao_ys(i) medicao_zs(i)];
    resposta_s(i,:)=(ms*s);
end

figure
subplot(212)
plot((VarName1-VarName1(1))/1e6,resposta_u(:,3)*-1)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',12);
ylabel('Aceleração massa não suspensa (m/s^2)','FontSize',12);
title('Resposta do veículo obtida pelas medições')
axis([0 20 -20 20])

subplot(211)
plot((VarName1-VarName1(1))/1e6,resposta_s(:,3)*-1)
xlabel('Tempo (s)','FontSize',12);
ylabel('Aceleração massa suspensa (m/s^2)','FontSize',12);
title('Resposta do veículo obtida pelas medições')
axis([0 20 -20 20])

%Integrando para achar perfil da pista
tf=(VarName1(1:end)-VarName1(1))/1e6;           % Vetor de tempo [s]
dtf=18005/1e6;
acel_u=resposta_u(1:end,3);           % Aceleração da massa não suspensa
acel_s=resposta_s(1:end,3);           % Aceleração da massa suspensa

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Filtragem do sinal para eliminar componente DC
% Filtro digital Butterworth passa-alto, segunda ordem, taxa de amostragem 55.5401Hz, frequência de corte de 1Hz
B=[1 -2 1];
A=[1 -1.8403149054 0.8521543237];

acel_uf=filter(B,A,acel_u);           % Aceleração da massa não suspensa filtrada
acel_sf=filter(B,A,acel_s);           % Aceleração da massa suspensa filtrada

veloc_u_temp=cumtrapz(acel_uf)*(18005/1e6);
veloc_s_temp=cumtrapz(acel_sf)*(18005/1e6);
veloc_uf=filter(B,A,veloc_u_temp);    % Velocidade da massa não suspensa filtrada
veloc_sf=filter(B,A,veloc_s_temp);    % Velocidade da massa suspensa filtrada

desloc_u_temp=cumtrapz(veloc_uf)*(18005/1e6);
desloc_s_temp=cumtrapz(veloc_sf)*(18005/1e6);
desloc_uf=filter(B,A,desloc_u_temp);  % Deslocamento da massa não suspensa filtrada
desloc_sf=filter(B,A,desloc_s_temp);  % Deslocamento da massa suspensa filtrada

%%%----- IRI
v=40;           % Velocidade do veículo
vref=80;        % Velocidade de referência para o IRI

% Conversão de H x tempo para H x deslocamento
xf=tf*v/3.6;
tf2=xf/(vref/3.6);
dtf2=tf2(2)-tf2(1);

Ks=55000;
Kt=Ks*10;
C=800;
m1=350*0.84;
m2=350*0.16;

H=(m2*acel_uf+C*(veloc_uf-veloc_sf)+Ks*(desloc_uf-desloc_sf)+Kt*(desloc_uf))/Kt;

figure
plot(tf,H)

```

```

xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', 12);
ylabel('Rugosidade (m)', 'FontSize', 12);
title('Blumenau, Joinville/SC', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');

tspan_max=max(xf)/(vref/3.6);
tspan=[0:0.01:tspan_max];
y0=[0,0,0,0];
[t,yc]=ode45(@(t,y) irii(t,y,H,tf2),tspan,y0,[]);

L=(vref/3.6)*tf2;
int_deslocamento=trapz(abs(yc(:,4)-yc(:,2)));
iri=(1/L(end))*int_deslocamento*(dtf2)*1000;

format bank
disp('      Início (m)  Final (m)   IRI')
disp([0 L(end) iri'])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Visualização gráfica
figure
h1=.7;
h2=.3;
cont1=1;
final=1000;
for aux1=1:1:final,
    L_for=xf(1:aux1);
    pos_simulacao=max(find(xf(aux1)>=t*vref/3.6));
    int_deslocamento_for=trapz(abs(yc(1:pos_simulacao,4)-yc(1:pos_simulacao,2)));
    iri_for(cont1)=(1/L_for(end))*int_deslocamento_for*(dtf2)*1000;

    linhax=[xf(aux1) xf(aux1)];
    linha1y=[desloc_sf(aux1)+h1 desloc_uf(aux1)+h2];
    linha2y=[H(aux1) desloc_uf(aux1)+h2];
    plot(xf(aux1),desloc_uf(aux1)+h2,'sb',xf(aux1),desloc_sf(aux1)+h1,'sb',linhax,linha2y,'-r',linhax,linha1y,'-r',xf,H,'k','LineWidth',1.5)
    title('Rua Presidente Prudente de Moraes, Joinville/SC', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'Bold')
    axis([0 xf(final) -0.1 1])
    axis off
    text(xf(final)*.5,.95,['IRI: ' num2str(iri_for(cont1))], 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'Bold')
    text(xf(final)*.5,.85,['Distância percorrida: ' num2str(round(100*xf(aux1))/100) 'm'], 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'Bold')
    M(cont1)=getframe(gcf);
    cont1=cont1+1;
end
movie2avi(M,'video_01','COMPRESSION','None','FPS',15);
% movie(M,5)

```

Algoritmo da função do cálculo do IRI.

```

function z=irii(t,y,H,tf2)
z=zeros(4,1);

m1=350*0.84;

% Parâmetros golden car
Ks=63.3*m1;
Kt=653*m1;
m2=0.15*m1;
C=6.147*m1;

if isempty(H(max(find(tf2<=t))))
    P=H(1);
else
    P=H(max(find(tf2<=t)));
end

% Equações 1/4 veículo
z(1)=y(2);
z(2)=-C*(y(2)-y(4))-Ks*(y(1)-y(3))/m1;
z(3)=y(4);
z(4)=-C*(y(4)-y(2))-Ks*(y(3)-y(1))-Kt*(y(3)-P)/m2;

```