

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MÉTODO PARA A DEFINIÇÃO DOS LIMITES DE
TOLERÂNCIA DE PESO DE VEÍCULOS COM FOCO NO USO
DE SISTEMAS DE PESAGEM EM ALTA VELOCIDADE**

NAYARA DONELLI PELLIZZON

**ORIENTADOR: ALAN RICARDO DA SILVA
COORIENTADOR: GUSTAVO GARCIA OTTO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES

**PUBLICAÇÃO: T.DM-007/2020
BRASÍLIA / DF: OUTUBRO/2020**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MÉTODO PARA A DEFINIÇÃO DOS LIMITES DE TOLERÂNCIA DE
PESO DE VEÍCULOS COM FOCO NO USO DE SISTEMAS DE
PESAGEM EM ALTA VELOCIDADE**

NAYARA DONELLI PELLIZZON

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TRANSPORTES.**

APROVADA POR:

**ALAN RICARDO DA SILVA, Dr. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**GUSTAVO GARCIA OTTO, Dr. (LABTRANS/UFSC)
(COORIENTADOR)**

**SÉRGIO RONALDO GRANEMANN, Dr. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**LETO MOMM, Dr. (UFSC)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 28 de OUTUBRO de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

PELLIZZON, NAYARA DONELLI

Método para Definição dos Limites de Tolerância de Peso de Veículos com Foco no Uso de Sistemas de Pesagem em Alta Velocidade. [Distrito Federal], 2020.

xii, 173 p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes, 2020).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1 – WIM

2 – HS-WIM

3 – Limites de tolerância de peso

4 – Método estatístico de experimentação

I – ENC/FT/UnB

II – Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA (Exemplo)

PELLIZZON, N. D. (2020). Método para Definição dos Limites de Tolerância de Peso com Foco no Uso de Sistemas de Pesagem em Alta Velocidade. Publicação T.DM-007/2020. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 173 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: NAYARA DONELLI PELLIZZON

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Método para a definição dos limites de tolerância de peso de veículos com foco no uso de sistemas de pesagem em alta velocidade

GRAU: Mestre

ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Nayara Donelli Pellizzon

SAN, Qd. 3, Bl. A, Ed. Núcleo dos Transportes – CEP: 70040-902 – Brasília/DF
(nayara_donelli@hotmail.com / nayara.pellizzon@dnit.gov.br)

DEDICATÓRIA

A Deus, pelo dom da vida, e por me conduzir no sentido do amor.

Aos meus pais, Maria Amélia e Norberto, por serem exemplos de amor, resiliência e retidão.

Aos meus avós, Indalécio, Antônio, Francisca (Chiquinha) e Adélia – *in memoriam* – pela caminhada de luta e simplicidade que trilharam.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente.

Aos meus pais, Maria Amélia e Norberto, as pessoas mais importantes para mim, e que, com muito esforço e simplicidade, dedicaram-se e contribuíram de forma incondicional para que eu pudesse chegar até aqui, sempre incentivando e priorizando meu aperfeiçoamento pessoal e educacional.

Ao meu irmão, Julio César, por quem tenho profunda admiração, e que sempre se faz presente, amigo e disposto a me auxiliar e incentivar.

Ao Carlos Augusto, pelo companheirismo de sempre, pelo apoio, incentivo e compreensão ao longo do desenvolvimento deste trabalho, os quais foram essenciais.

Ao professor e orientador, Alan Ricardo, por ter acreditado no desenvolvimento deste trabalho. Com dedicação e competência na transmissão do conhecimento, desde o ministério das aulas, sempre incentivou e contribuiu enormemente para meu aprendizado e para o progresso deste trabalho. Registro aqui, também, minha admiração à pessoa que é, ao seu conhecimento, ao esforço dedicado à coordenação do PPGT, ao seu profissionalismo e à forma como conduz os alunos ao aperfeiçoamento, não só acadêmico, mas também pessoal.

Ao coorientador, Gustavo, por também ter acreditado no desenvolvimento deste trabalho e por ter contribuído à busca do conhecimento, sempre incentivando e se mostrando disposto a auxiliar. Com sua dedicação e competência, vem contribuindo para o desenvolvimento das pesquisas relacionadas à paisagem. Registro também minha admiração à pessoa que é, ao seu conhecimento e ao seu esforço na coordenação de estudos de paisagem através do LabTrans.

Ao Eng.º Davi e à Eng.ª Cássia, que, nas funções de coordenação da CGPERT do DNIT, concordaram com meu afastamento parcial para cursar o mestrado ofertado pelo PPGT/UnB.

Ao DNIT, cujas competências regimentais várias nos desafiam enquanto profissionais e enquanto servidores, por ter concedido, por meio de seus diretores, o meu afastamento parcial para cursar o mestrado ofertado pelo PPGT/UnB. Do mesmo modo, aos cidadãos brasileiros, por terem financiado indiretamente o desenvolvimento desta pesquisa.

E, por fim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram com este trabalho e que me mantêm no propósito de sempre aliar prática e ciência.

RESUMO

MÉTODO PARA DEFINIÇÃO DOS LIMITES DE TOLERÂNCIA DE PESO DE VEÍCULOS COM FOCO NO USO DE SISTEMAS DE PESAGEM EM ALTA VELOCIDADE

Veículos com sobrecarga representam ameaças às operações do transporte rodoviário, acarretando riscos crescentes aos cidadãos e à economia de um país. A fiscalização de veículos comerciais pesados é reconhecida como um mecanismo capaz de coibir os atos infracionais relacionadas aos excessos de carga transportados. Dentre as diversas tecnologias existentes, voltadas à pesagem de veículos, os sistemas de pesagem em alta velocidade (HS-WIM) apresentam vantagens capazes de ampliar os níveis de eficiência, eficácia e efetividade requeridos por órgãos e entidades competentes, quando do desenvolvimento de atos de fiscalização. Entretanto, questões relativas à certificação de tais sistemas, pelas entidades metrológicas, configuram-se como um dos principais entraves à sua implementação. Nesse sentido, diante das hipóteses estabelecidas, o objetivo deste trabalho consistiu em propor um método para definir os limites de tolerância de peso de veículos comerciais pesados a partir do uso de métodos estatísticos de experimentação. A partir da aplicação do método, para o qual foram considerados três veículos, com até três grupos de eixos, identificaram-se os limites de tolerância máximos, mínimos e máximos absolutos relativos às medidas de PBT (Peso Bruto Total) e peso por grupos de eixos. Os limites máximos absolutos identificados foram: 13% (PBT), 20% (grupo de eixos 1), 20% (grupo de eixos 2) e 17% (grupo de eixos 3). Os testes *t* de *Student* e de *Wilcoxon* foram aplicados para se avaliar a situação de precisão dos três sistemas empregados quanto à estimativa das medidas de peso, a fim de verificar a adequabilidade dos limites de tolerância obtidos. Identificou-se que nenhum deles se encontrava absolutamente preciso, apontando por possíveis disfunções relacionadas aos erros intrínsecos e/ou devido a fatores externos. Os testes ANOVA e *Kruskal-Wallis* foram aplicados para avaliar a influência de diferentes parâmetros na estimativa das medidas de peso pelos sistemas HS-WIM. Identificou-se que devem ser observadas as configurações veiculares, em associação às variações de velocidade, bem como a adequabilidade geométrica e de desempenho das estruturas de pavimentos. Identificou-se, por fim, que as variações de temperatura devem ser observadas, a depender do tipo de estrutura de pavimento a ser utilizada para a composição do sistema HS-WIM.

ABSTRACT

METHOD FOR DEFINING THE WEIGHT ACCURACY LIMITS OF VEHICLES WITH FOCUS ON THE USE OF HIGH-SPEED WEIGHING SYSTEMS

Overloaded vehicles pose threats to road transportation operations, increasing risks to citizens and to the country's economy. Heavy goods vehicles enforcement is recognized as a mechanism capable to restrain infringement acts related to overload. Among the various existing technologies, aimed at weighing vehicles, high-speed weighing systems (HS-WIM) have advantages capable of increasing the efficiency, efficacy and effectiveness levels required by competent entities, when developing enforcement acts. However, issues related to the certification of such systems, by metrological entities, are configured as one of the main obstacles to their implementation. In this sense, in view of the established hypotheses, the objective of this work was to propose a method to define weight accuracy limits of heavy goods vehicles, based on the use of statistical experimental methods. From the application of the method, where three vehicles were considered, with up to three axes groups, the maximum, minimum and absolute maximum weight accuracy limits related to GVW (Gross Vehicle Weight) and weight measurements by axle groups were identified. The absolute maximum limits were: 13% (GVW), 20% (axis group 1), 20% (axis group 2) and 17% (axis group 3). Student's t and Wilcoxon tests were applied to assess the accuracy of the three systems used in estimating weight measurements and to verify the adequacy of the accuracy limits obtained. It was identified that none of them were absolutely accurate, showing possible miscalibration related to intrinsic errors and/or due to external factors. ANOVA and Kruskal-Wallis tests were applied to assess the influence of different parameters on the estimation of weight measurements by HS-WIM systems. It was identified that the vehicles configurations must be observed, in association with the speed variations, as well as the geometric suitability and performance of the pavement's structures, because it was found significant differences between them. Finally, it was identified that temperature variations should also be considered, depending on the type of pavement structure to be used for the composition of the HS-WIM systems.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA	20
1.2	HIPÓTESE	21
1.3	OBJETIVOS	22
1.4	JUSTIFICATIVA	22
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2	CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO E SUA INTERAÇÃO COM PAVIMENTOS	25
2.1	PAVIMENTOS	26
2.1.1	Serventia e Desempenho de Pavimentos	26
2.1.2	Estrutura e Comportamento Estrutural de um Pavimento	27
2.1.3	O Fenômeno da Fadiga e a Deterioração de um Pavimento	29
2.2	TRÁFEGO E SUAS CARACTERÍSTICAS	32
2.2.1	Veículos e seus Limites Legais de Pesos e Dimensões	33
2.2.2	Eixos	37
2.2.3	Rodados e Pressão de Enchimento dos Pneus	39
2.2.4	Suspensões dos Veículos	42
2.2.5	Velocidade e Cargas Dinâmicas	43
3	FISCALIZAÇÃO DE VEÍCULOS COMERCIAIS PESADOS	44
3.1	IMPACTOS DA SOBRECARGA	46
3.1.1	Deterioração Precoce de Pavimentos	46
3.1.2	Comprometimento da Segurança Viária	49
3.1.3	Competitividade Desleal no Transporte Rodoviário de Cargas	52
3.2	FISCALIZAÇÃO E A ORGANIZAÇÃO PARA UM TRÂNSITO SEGURO	56
3.2.1	Legislação Brasileira e o Uso de Instrumentos e Tecnologias para Pesagem	58
3.2.2	Modelos de Fiscalização	64
4	PESAGEM EM MOVIMENTO	69
4.1	PESAGEM DINÂMICA EM PAVIMENTOS	71
4.1.1	Balanças	73
4.1.2	Sensores em Linhas e em Barras	75
4.1.3	Sistemas HS-WIM	80
4.2	ESTIMATIVA DO PESO	81
4.2.1	Erro Intrínseco	83

4.2.2	Erro Devido a Fatores Externos	84
4.2.3	Desafios da Pesagem Dinâmica	86
4.3	REQUERIMENTOS DE DESEMPENHO, PROCEDIMENTOS DE TESTE E AVALIAÇÃO DE SISTEMAS WIM	87
4.3.1	Especificação Europeia COST 323 (2002)	89
4.3.2	Recomendação Internacional OIML R134-1 (2006)	93
4.3.3	Especificação Padrão Norte Americana (ASTM E1318-09) (2009).....	97
4.3.4	Regulamento Técnico Metrológico (RTM) – INMETRO	100
4.3.5	NMi Padrão Internacional WIM	102
4.3.6	Tópico Complementar.....	105
5	MÉTODO.....	107
5.1	FASE 1: DEFINIÇÃO DO LOCAL PARA TESTE.....	107
5.2	FASE 2: TESTE EM CAMPO E AQUISIÇÃO DOS DADOS	109
5.2.1	Etapa 1: Definição dos Veículos Conhecidos e Carregamentos	109
5.2.2	Etapa 2: Definição do Equipamento de Precisão e Obtenção das Medidas de Referência.....	109
5.2.3	Etapa 3: Definição e Realização do Protocolo de Teste e Obtenção das Medidas de Peso.....	110
5.3	FASE 3: ANÁLISE DOS DADOS.....	111
5.3.1	Etapa 1: Cálculo das Diferenças Relativas e Definição de Tolerâncias.....	111
5.3.2	Etapa 2: Inferências Estatísticas	112
6	APLICAÇÃO DO MÉTODO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	115
6.1	FASE 1: DEFINIÇÃO DO LOCAL PARA TESTE.....	115
6.1.1	Clima	115
6.1.2	Infraestruturas do PPV 16.08 (Sítio de Pesagem WIM)	116
6.1.3	Sensores e Balança de Precisão.....	118
6.2	FASE 2: TESTE EM CAMPO E AQUISIÇÃO DOS DADOS	119
6.2.1	Etapa 1: Definição dos Veículos Conhecidos e Carregamentos	119
6.2.2	Etapa 2: Definição do Equipamento de Precisão e Obtenção das Medidas de Referência.....	120
6.2.3	Etapa 3: Definição e Realização do Protocolo de Teste e Obtenção das Medidas de Peso.....	121
6.3	FASE 3: ANÁLISE DOS DADOS.....	122
6.3.1	Etapa 1: Cálculo das Diferenças Relativas e Definição de Tolerâncias.....	122
6.3.2	Etapa 2: Inferências Estatísticas	132
7	CONCLUSÃO	147

7.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	150
7.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	151
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152
	ANEXO I.....	165
	ANEXO II	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1: Frequências absolutas – Sistema 01	123
Tabela 6.2: Frequências absolutas – Sistema 02	126
Tabela 6.3: Frequências absolutas – Sistema 03	129
Tabela 6.4: Sistema 01 (p-valores).....	134
Tabela 6.5: Sistema 02 (p-valores).....	135
Tabela 6.6: Sistema 03 (p-valores).....	136
Tabela 6.7: Sistema 01 (p-valores) e comparações múltiplas	140
Tabela 6.8: Sistema 02 (p-valores) e comparações múltiplas	142
Tabela 6.9: Sistema 03 (p-valores) e comparações múltiplas	144

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Composição do SNT – Art. 7º do CTB	57
Quadro 3.2: Modelos de fiscalização	64
Quadro 4.1: Classificação dos locais de instalação de sistemas WIM – COST 323.....	90
Quadro 4.2: Classes de precisão em relação às classes de sítios de pesagem – COST 323.....	90
Quadro 4.3: Dependência do nível de confiança – especificações de ensaio – COST 323	91
Quadro 4.4: Tolerância das classes de precisão – Especificação Europeia COST 323	91
Quadro 4.5: Procedimentos para definição da classe de precisão de um sistema WIM – COST 323	92
Quadro 4.6: Classes de precisão – OIML R134-1	94
Quadro 4.7: Limites de erro para massa total de um veículo carregado ou não - OIML.....	94
Quadro 4.8: Erro Máximo Admissível para um veículo de referência rígido de dois eixos - OIML.....	95
Quadro 4.9: Desvio Máximo Admissível para todos os tipos de veículos de referência com exceção do veículo rígido de dois eixos - OIML	95
Quadro 4.10: Procedimentos gerais para avaliação metrológica de um instrumento WIM - OIML.....	95
Quadro 4.11: Tipos de sistemas WIM e os dados de aquisição do sistema - ASTM.....	97
Quadro 4.12: Requerimentos de desempenho (tolerâncias) – sistemas WIM - ASTM.....	98
Quadro 4.13: Requerimentos dos pavimentos dos sítios de instalação dos sistemas WIM - ASTM.....	98
Quadro 4.14: Procedimentos para avaliação e aceitação do sistema WIM – ASTM.....	99
Quadro 4.15: Erros Máximos Admissíveis (EMAs) – INMETRO	101
Quadro 4.16: Procedimentos para ensaio e avaliação de sistemas WIM com relação às massas e cargas - INMETRO	101
Quadro 4.17: Requerimentos geométricos do sítio de instalação de sistemas WIM - NMi ..	103
Quadro 4.18: Erros Máximos Admissíveis (EMAs) - NMi	104

Quadro 4.19: Procedimentos para avaliação de sistemas WIM quanto às medidas de carga - NMI	104
Quadro 6.1: Síntese dos principais resultados obtidos	1046
Quadro I.1: Metodologia para cálculo do frete rodoviário de carga	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Matriz de transporte de cargas brasileira	18
Figura 1.2: Frota de veículos rodoviários.....	19
Figura 2.1: Representação genérica da estrutura (multicamadas) de pavimento	27
Figura 2.2: Esforços no pavimento devido à passagem de uma carga em movimento.....	28
Figura 2.3: Sinal de deformação longitudinal e transversal de extensômetro localizado na fibra inferior da camada de concreto asfáltico, com a passagem de veículo em movimento.....	29
Figura 2.4: Perfil longitudinal e transversal de um pavimento e a trajetória de um pneu.....	31
Figura 2.5: Esquema de definições dos veículos rodoviários de carga.....	35
Figura 2.6: Principais configurações de eixos.....	38
Figura 2.7: Parte de um pneu e sua construção radial e diagonal	39
Figura 2.8: Pressão de contato de pneus em função da variação da pressão de enchimento e da carga aplicada.....	41
Figura 2.9: Representação do sistema de suspensão de um veículo	42
Figura 3.1: Espectro de carga – BR-101/SC (Araranguá) – novembro/2011	47
Figura 3.2: Vida útil do pavimento versus sobrecarga.....	48
Figura 3.3: Leis e regulamentações referentes à fiscalização de veículos comerciais pesados quanto à sobrecarga transportada, mediante uso de instrumentos de pesagem.....	60
Figura 3.4: Leis e regulamentações referentes à metrologia de instrumentos de pesagem automáticos e não automáticos.....	62
Figura 3.5: PPV (km 108 ao 109, BR-163/MT, Município de Rondonópolis	66
Figura 3.6: PPV (BR-101/SC, Município de Araranguá)	67
Figura 3.7: UMO – Operação no km 12, da rodovia BR-316/PI	67
Figura 4.1: Tecnologias para pesagem estática.....	69
Figura 4.2: Tipos de pesagem em movimento, locais de emprego e suas tecnologias	72
Figura 4.3: Sensor do tipo balança baseada no uso de células de carga	73
Figura 4.4: <i>Bending plates</i>	74

Figura 4.5: Sensor capacitivo	76
Figura 4.6: Representação – Sensor piezo-polímero <i>Measurement Specialties</i>	77
Figura 4.7: Representação – Sensor piezo-cerâmico - <i>Thermocoax</i>	77
Figura 4.8: Representação – Sensor piezo-quartzo - <i>kistler</i>	78
Figura 4.9: Representação – Sensor com base em extensômetro.....	79
Figura 4.10: Representação – Sensor óptico - <i>Measurement Specialties</i>	80
Figura 4.11: Representação genérica de um sistema WIM/HS-WIM.....	81
Figura 4.12: Sinal de um sensor WIM em linha expresso em força (N).....	82
Figura 4.13: Estimativa do peso a partir da força de impacto.....	87
Figura 5.1: Sequenciamento metodológico	107
Figura 6.1: PPV - Município de Araranguá/SC – Variações de temperatura (maio de 2019)	116
Figura 6.2: Sítio de pesagem WIM – PPV Município de Araranguá/SC.....	117
Figura 6.3: Camadas das estruturas dos pavimentos dos trechos A01, A02 e A03 – PPV 16.08	117
Figura 6.4: Sensores – Trecho A01 – Estação de Integração.....	118
Figura 6.5: Sensores – Trecho A02 – Pista Experimental.....	118
Figura 6.6: Sensores – Trecho A03 – Pista Experimental.....	119
Figura 6.7: Veículos conhecidos	120
Figura 6.8: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 01 – Caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C) – Temperatura média do pavimento igual a 37,2° C	124
Figura 6.9: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 01 - Caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3) – Temperatura média do pavimento igual a 37,2° C.....	124
Figura 6.10: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 01 - Caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3) – Temperatura média do pavimento igual a 37,2° C.....	125

Figura 6.11: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 02 – Caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C) – Temperatura média do pavimento igual a 37° C.....	127
Figura 6.12: Diagrama de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e peso por grupos de eixos – Sistema 02 - Caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3) – Temperatura média do pavimento igual a 37° C.....	127
Figura 6.13: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 02 - Caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3) – Temperatura média do pavimento igual a 37° C.....	128
Figura 6.14: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 03 - Caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C) – Temperatura média do pavimento igual a 37,1° C.....	130
Figura 6.15: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 03 - Caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3) – Temperatura média do pavimento igual a 37,1° C.....	130
Figura 6.16: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 03 - Caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3) – Temperatura média do pavimento igual a 37,1° C.....	131

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
CTC	Cooperativa de Transporte de Cargas
CVC	Combinação de Veículo de Carga
DENATRAN	Departamento Nacional De Trânsito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ETC	Empresa de Transporte Rodoviário de Cargas
HS-WIM	<i>High Speed Weigh in Motion</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IRI	<i>International Roughness Index</i>
LS-WIM	<i>Low Speed Weigh in Motion</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
OICA	<i>Organisation Internationale Constructeurs des Automobiles</i>
OIML	<i>Organisation Internationale Métrologie Légale</i>
PBT	Peso Bruto Total
PBTC	Peso Bruto Total Combinado
SNT	Sistema Nacional de Trânsito
TAC	Transportador Autônomo de Cargas
TCP	Transportador Rodoviário de Carga Própria
TRRC	Transportador Rodoviário Remunerado de Cargas
WIM	<i>Weigh in Motion</i>

1 INTRODUÇÃO

O sistema de transporte desempenha importante papel no processo de desenvolvimento econômico, com efeitos diretos sobre a produção e o consumo de um país, sendo o aumento da demanda por bens e serviços, em um mercado, um impulsionador da atividade produtiva. Nesse sentido, uma infraestrutura extensa, densa e de boa qualidade se configura como condição necessária à realização dos serviços de transporte e ao desenvolvimento econômico de uma região ou país (CNT, 2017). De acordo com Horta & Giambiagi (2018), uma infraestrutura deficitária contribui para aumentar o custo do transporte, reduzindo a competitividade das empresas e a produtividade da economia de maneira geral.

No Brasil, o transporte rodoviário é caracterizado como a modalidade que ocupa maior participação na matriz de transporte de cargas, representando cerca de 61% do total (Figura 1.1) e movimentando cerca de 485 milhões de Toneladas por Quilômetro Útil (TKU) (CNT, 2019a). Também se caracteriza como o principal modo de deslocamento de pessoas, sendo que, de acordo com Medina & Motta (2015a), historicamente, 96% delas são transportadas por meio de rodovias. Os serviços de transporte rodoviários de passageiros interestadual, internacional e de fretamento, por sua vez, somente no ano de 2018, acomodaram cerca de 95,1 milhões de pessoas, o que representou um aumento de 7,3% em comparação com o ano de 2017, em que foram transportadas cerca de 88,7 milhões de pessoas (BRASIL, 2018; CNT, 2019a).

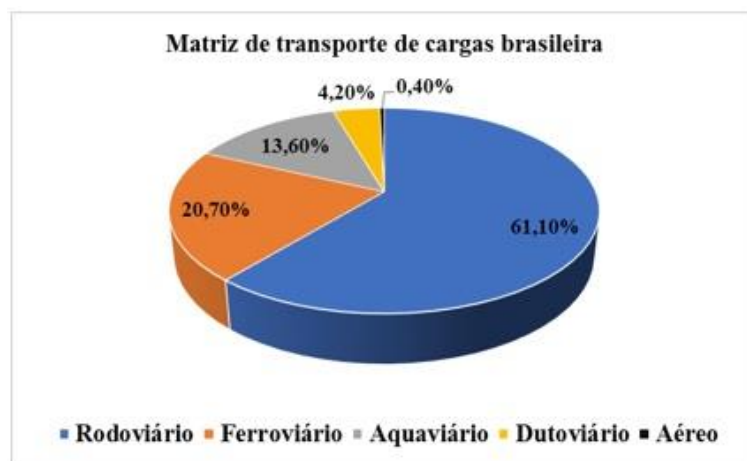


Figura 1.1: Matriz de transporte de cargas brasileira

Dada a expressiva participação do transporte rodoviário na movimentação de cargas e pessoas, apresenta-se, também, um panorama geral a respeito da frota de veículos comerciais pesados no Brasil, que cresce a cada ano. Até o final do ano de 2018, a frota brasileira correspondeu ao

montante de 100.746.553 veículos rodoviários, dos quais, como ilustrado na Figura 1.2, cerca de 7% corresponderam a veículos comerciais pesados, tendo sido aproximadamente 6% do tipo caminhão, em seu sentido genérico, e 1% referente a ônibus. Tais percentuais, se comparados ao ano de 2017, sofreram um crescimento, respectivamente, de cerca de 3,9% e 2,3% (DENATRAN, 2018; BRASIL, 2018).

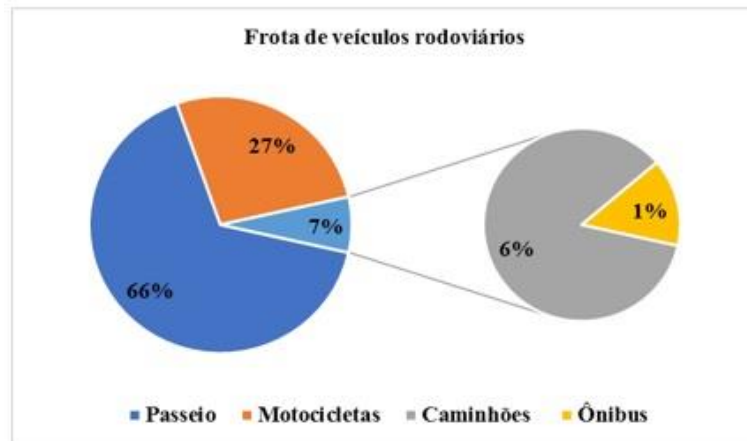


Figura 1.2: Frota de veículos rodoviários

Segundo Neto *et al.* (2011), para um setor cuja importância assume a dimensão verificada no setor rodoviário, torna-se evidente o dever de a iniciativa pública de interferir por meio da provisão de políticas que estimulem e fortaleçam sua dinâmica. Uma das formas pelas quais o governo pode atuar consiste na realização de investimentos diretos na construção, manutenção e adequação, estimulando a economia nacional através de uma infraestrutura competitiva.

Entretanto, veículos com sobrecarga representam sérias ameaças às operações do transporte rodoviário, com riscos crescentes sobretudo aos cidadãos. Tais riscos decorrem da promoção de impactos severos à durabilidade das infraestruturas rodoviárias (pavimentos e pontes), do comprometimento da segurança viária, além do incentivo à concorrência desleal entre modos de transporte e operadores (JACOB & BEAUMELLE, 2010; JACOB & COTTINEAU, 2016).

A degradação prematura das infraestruturas rodoviárias influencia, também, significativamente, o preço dos fretes e, por conseguinte, os custos operacionais, pois não apenas amplia o tempo de transporte, mas também contribui para o acelerado desgaste dos veículos, elevando os custos com manutenção e com o consumo de combustível e pneus. Ainda, infraestruturas rodoviárias danificadas geram aumento na emissão de poluentes e propiciam a ocorrência de acidentes, na medida em que contribuem para a instabilidade do veículo, implicando elevação de despesas

hospitalares (FERNANDES JÚNIOR, 1994; NETO *et al.*, 2011; KARIM *et al.*, 2014; CNT, 2018).

Nesse sentido, Fernandes Júnior (1994) aponta ser inadmissível que políticas de investimento no setor de transporte rodoviário deixem, em segundo plano, o controle de sobrecargas transportadas por meio de veículos comerciais pesados, existindo, portanto, a necessidade de implantação de um programa eficaz e efetivo de fiscalização de pesos e dimensões de veículos de carga e de passageiros. Ainda segundo o autor, balanças fixas e móveis e sistemas para pesagem em movimento são ferramentas que resultam em benefícios para a sociedade muitas vezes superiores aos custos de sua instalação, manutenção e operação.

Em complementação, para Fontenele (2011) e Fontenele *et al.* (2011), as imposições de penalidade de multa, devido às infrações decorrentes da prática de sobrecarregar os veículos, somente podem ser provenientes das ações de fiscalização. Entretanto, segundo os autores, o Brasil ainda apresenta um cenário desfavorável em relação ao excesso de carga, sendo essa prática continuamente adotada, devido às vantagens econômicas da relação frete/multa, à inexistência de controle de peso na maioria absoluta das rodovias brasileiras e ao baixo risco de detecção da infração.

Diante do exposto, de acordo com Han *et al.* (2012), estações de pesagem são os primeiros pontos de verificação de conformidade de veículos, sendo que, para tanto, nas últimas décadas, têm sido desenvolvidas tecnologias de pesagem em movimento, denominadas em inglês, como *Weigh in Motion* (WIM), ou Pesagem em Movimento, como forma de reduzir atrasos das viagens e aumentar a fiscalização quanto às violações por excesso de peso. Tais tecnologias WIM possibilitam a pesagem em movimento em baixa velocidade (ou do inglês *Low Speed Weigh in Motion* – LS-WIM), e a pesagem em movimento em alta velocidade (ou do inglês *High Speed Weigh in Motion* – HS-WIM) (JACOB & BEUAMELLE, 2010). Entretanto, devido às limitações quanto à precisão e implementação, propriamente ditas, das tecnologias relativas aos sistemas HS-WIM, o completo potencial de tais tecnologias não têm sido atingido.

1.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

De acordo com Otto (2018), o desenvolvimento e avanço de tecnologias relativas à pesagem em alta velocidade, aliados ao avanço de tecnologias e sistemas de comunicação e integração

de dados, permitem a transmissão de informações em tempo quase real e, portanto, permitem o desenvolvimento de tecnologias voltadas à fiscalização direta de veículos que trafegam com sobrecarga. Entretanto, as questões relativas à certificação de tais sistemas ainda se configuram como um dos principais entraves à sua implementação.

No Brasil, ainda não existem sistemas de pesagem em alta velocidade certificados para a fiscalização direta do excesso de carga, e os sistemas comerciais disponíveis não são capazes de atender às especificações metrológicas, com foco na fiscalização em alta velocidade, no próprio fluxo de tráfego das rodovias. A certificação de sistemas de pesagem em baixa velocidade, por sua vez, existentes no Brasil, é resultado de uma série de procedimentos, mediante os quais os sistemas devem ser capazes de apresentar resultados, quanto às medidas de peso, com precisão suficiente para atendimento das regulamentações técnico metrológicas estabelecidas pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), as quais se baseiam nas recomendações apresentadas pela Organização Internacional de Metrologia Legal, ou do francês, *Organisation Internationale de Métrologie Légale* (OIML) (OTTO, 2018).

Do exposto, considerando as potencialidades de desenvolvimento e uso de tecnologias e sistemas de pesagem em alta velocidade, principalmente para fins de fiscalização e controle do peso de veículos comerciais pesados, bem como considerando as discussões acerca das certificações de tais sistemas, o presente trabalho pretende responder a seguinte pergunta: como definir os limites de tolerâncias de peso de veículos comerciais pesados, para fins de certificação, quando submetidos à pesagem em alta velocidade?

1.2 HIPÓTESE

Os valores e/ou admissões dos limites de tolerâncias de peso de veículos comerciais pesados podem ser definidos com base no uso de métodos estatísticos de experimentação.

Tem-se como hipóteses secundárias:

- As tolerâncias dependem do tipo de veículo;
- As condições climáticas interferem na medição de peso de veículos;

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em propor um método para a definição dos limites de tolerâncias de peso de veículos comerciais pesados, a partir do uso de métodos estatísticos de experimentação, visando contribuir para a certificação e uso de sistemas de pesagem em alta velocidade e, por conseguinte, para a implementação da fiscalização direta dos excessos de carga transportados.

Tem-se como objetivos específicos:

- Apresentar as características do tráfego e sua interação com pavimentos;
- Identificar e apresentar as principais regulamentações brasileiras que tratam da fiscalização dos excessos de carga praticados por meio do uso de tecnologias para pesagem;
- Identificar e apresentar as principais tecnologias existentes para pesagem de veículos;
- Identificar as variáveis que podem interferir como fontes de erros quando da pesagem de veículos em movimento;
- Identificar e apresentar os principais documentos internacionais que tratam da avaliação de sistemas de pesagem em movimento;

1.4 JUSTIFICATIVA

Os sistemas de pesagem em alta velocidade podem ser utilizados, em um primeiro momento, visando possibilitar o desenvolvimento de projetos de códigos e modelos de calibração de cargas, bem como o monitoramento e avaliação das infraestruturas, além também da inspeção e elaboração de estratégias de manutenção e reforço. Outras viabilidades de uso residem como forma de coleta de dados estatísticos de tráfego, ou de fretes de transporte, bem como pesquisas de cunho econômico, além também de servirem como ferramenta de pré-seleção de veículos comerciais pesados, anteriormente à realização de pesagem estática ou em baixa velocidade (JACOB & BEAUMELLE, 2010).

Ainda segundo Jacob & Beaumelle (2010), os sistemas de pesagem em alta velocidade, a despeito dos sistemas de pesagem em baixa velocidade, têm como uma de suas principais vantagens o fato de poderem ser totalmente automatizados, por meio dos quais se torna possível o registro de todos os veículos que passam pela rodovia. Tais sistemas dispensam, ainda, o uso de infraestruturas adicionais, como prédios administrativos e pátios de estacionamento,

podendo ser instalados na própria infraestrutura (pavimentos e pontes) e em qualquer seção dela, desde que atendam às especificações relativas a sistemas de pesagem em movimento.

Em complementação, além da redução dos custos operacionais e de implantação de infraestrutura de estações ou postos de pesagem, principalmente em se considerando uma operação de pesagem de vinte e quatro horas, e sete dias por semana, o aumento de locais de fiscalização, possibilitado pelo uso de sistemas de pesagem em alta velocidade, permitiria aos órgãos e entidades responsáveis pelo gerenciamento da infraestrutura rodoviária uma maior abrangência quanto à fiscalização do excesso de carga e quanto às informações relativas ao tráfego passante. Ainda, como consequência do aumento da fiscalização, a redução de veículos com excesso de carga possibilitaria a melhora dos níveis de serviço das rodovias, seja com relação à redução de acidentes, seja no tocante à preservação da vida útil das infraestruturas rodoviárias, além também do freamento da competitividade desleal correspondente ao valor do frete (OTTO, 2018).

Dolcemascolo *et al.* (2016), por sua vez, consideram que, uma vez que o tráfego de veículos comerciais vem aumentando a cada ano, mais veículos devem ser controlados e/ou fiscalizados. Nesse sentido, a fiscalização direta do excesso de carga, a partir do uso de sistemas de pesagem em alta velocidade, é entendida como uma solução mais dissuasiva, no que se refere à coibição da prática de sobrecarregar os veículos, quando comparada com as pesagens estáticas ou em baixa velocidade. Entretanto, segundo Jacob & Loo (2011), ainda existem barreiras que impedem seu uso para fins de fiscalização, a saber pela falta de certificação apropriada, fazendo-se necessário, portanto, o desenvolvimento de uma estrutura de procedimentos que possibilitem a aceitação de tais sistemas, para o fim que se espera, ou seja, o de fiscalizar diretamente os veículos que trafegam com sobrecarga.

Diante do exposto, o desenvolvimento do presente trabalho se justifica por apresentar um método, com enfoque estatístico, voltado à definição de limites de tolerância de peso de veículos comerciais pesados, e visando contribuir para a certificação de tais sistemas, bem como possibilitar a implementação da fiscalização direta do excesso de peso e, por conseguinte, o aumento da verificação de veículos comerciais pesados quanto aos carregamentos praticados e quanto às violações por excesso de carga, não acarretando prejuízos àqueles que trafegam em conformidade com a legislação.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado em 7 capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre o assunto relacionado ao uso de sistemas de pesagem em alta velocidade, com foco na implementação da fiscalização direta da sobrecarga transportada, como medida voltada à manutenção e preservação das infraestruturas rodoviárias, garantindo condições seguras, confortáveis e econômicas aos cidadãos, ao saneamento de questões relacionadas ao setor rodoviário e ao impulsionamento econômico do país. Contempla também a delimitação do problema, a hipótese a ser estudada, os objetivos pretendidos e a justificativa da pesquisa.

No Capítulo 2, é apresentada revisão bibliográfica sobre as características do tráfego e sua interação com os pavimentos, devido à influência de tais fatores externos com relação à forma de imposição das cargas nas tecnologias de pesagem e quanto às incertezas das medidas de peso. No Capítulo 3, são apresentadas informações sobre a fiscalização de veículos comerciais pesados, sendo abordado a respeito dos impactos econômicos que a mesma visa coibir, bem como sobre o ato de fiscalização propriamente dito, sobre as diferenças entre os modelos de fiscalização existentes, e sobre a legislação brasileira que trata do uso de instrumentos de pesagem em movimento.

Já no Capítulo 4, constam informações sobre os sistemas de pesagem e as respectivas tecnologias, sobre documentos internacionais voltadas à avaliação de tais sistemas, sobre o Regulamento Técnico Metrológico existente no Brasil e, também, a respeito de procedimentos e ensaios voltados à avaliação de sistemas de pesagem em movimento. No Capítulo 5, é apresentado o método proposto. No Capítulo 6, constam a aplicação do método e os resultados obtidos, tendo em vista a hipótese e os objetivos elencados. Por fim, as conclusões, limitações e recomendações para trabalhos futuros estão contidas no Capítulo 7 desta dissertação.

2 CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO E SUA INTERAÇÃO COM PAVIMENTOS

As características do tráfego, especificamente com relação aos veículos de carga e de passageiros, e sua influência nas respostas e desempenho de pavimentos, são apontadas como tema relevante de ser abordado no âmbito desta dissertação. Existe a compreensão de que o conhecimento de tais características, e de sua interação com estruturas de pavimentos, pode proporcionar um melhor entendimento quanto aos impactos da sobrecarga, bem como uma melhor observação ou experimentação quanto aos resultados possíveis de serem obtidos quando da utilização de diferentes tecnologias voltadas à pesagem de veículos comerciais pesados e, também, no tocante à identificação e entendimento de requisitos necessários à sua implementação, para as mais diversas aplicabilidades, inclusive, àquela relacionada ao cumprimento de atos de fiscalização, pelos órgãos e entidades competentes e responsáveis pela preservação das rodovias.

Com o trabalho de Gillespie *et al.* (1993) se estudou os efeitos das características dos veículos pesados nas respostas e desempenho de pavimentos, tendo sido constatado que os veículos vinham aumentando em diversidade de projeto e uso. Nesse sentido, novas configurações de veículos, suspensões, pneus e pressão de enchimento, por sua vez, vinham mudando a imposição de cargas na superfície de pavimentos. No que se refere ao uso de tecnologias para pesagem, Scheuter (1998) aponta que as incertezas das medidas de peso obtidas por meio de sistemas de pesagem estão relacionadas a erros intrínsecos e a erros devidos a fatores externos (inclinação do veículo, suspensão, fricção da suspensão, reação à frenagem, movimento oscilatório dos veículos – chassi e eixos, frisos dos pneus, forças aerodinâmicas, instalação dos sensores – nivelamento, e irregularidade e planicidade do pavimento), os quais são diretamente abordados no Capítulo 4 desta dissertação, e os quais apresentam relação, em termos de comportamento, com as estruturas de pavimentos.

Ainda com relação às tecnologias para a pesagem, Burnos & Rys (2017) afirmam que, quando instaladas no pavimento, este desempenha papel importante no processo de obtenção das medidas de peso, haja vista a estrutura do pavimento se tornar parte do sistema de pesagem. Logo, segundo os autores, as propriedades de um pavimento afetam as propriedades de todo o sistema de pesagem em movimento. Complementarmente, Otto *et al.* (2017) e Otto (2018) afirmam que as respostas elétrico-mecânicas de sensores utilizados para a pesagem em movimento podem ser representadas a partir da combinação entre a carga em movimento e as

reações do pavimento.

Nesse sentido, no presente Capítulo, serão apresentados tópicos relacionados aos conceitos de serventia e desempenho de pavimentos, à sua estrutura, e sobre sua deterioração. Em sequência, serão apresentados tópicos relacionados às características do tráfego, sendo realizada abordagem sobre os veículos e seus limites legais de peso e dimensões, no contexto brasileiro, sobre os tipos de eixos e seus limites legais, também para a realidade brasileira, sobre os tipos de rodados e pressões de enchimento dos pneus, sobre as suspensões e, por fim, a respeito da velocidade e de cargas dinâmicas.

2.1 PAVIMENTOS

Em função da importância do transporte rodoviário para as atividades socioeconômicas de um país, um pavimento deve apresentar, numa visão de longo prazo, desempenho satisfatório permanente. Nesse sentido, os conceitos de serventia e desempenho de pavimentos serão apresentados nas seções seguintes. Ainda, menciona-se que um pavimento é projetado para durar determinado período de vida sob a influência do tráfego, servindo também como estrutura componente de sistemas de pesagem em movimento e, portanto, exercendo um importante papel frente à interação com tecnologias voltadas à pesagem de veículos com sobrecarga, principalmente no que se refere à obtenção e à confiabilidade das respectivas medidas de peso.

2.1.1 Serventia e Desempenho de Pavimentos

Os termos relacionados à serventia e desempenho de pavimentos foram primeiramente definidos por Hudson, em 1971, tendo como base os estudos e relatórios obtidos a partir do teste rodoviário desenvolvido pela antiga Associação Americana de Funcionários das Rodovias Estaduais, ou do inglês *American Association of State Highway Officials* (AASHO), na década de 1950, e que ficou conhecido como o Teste Rodoviário da AASHO, ou do inglês *AASHO Road Test* (FERNANDES JÚNIOR, 1994; BALBO, 2007).

De acordo com Haas *et al.* (1994), a serventia de um pavimento é definida pela sua habilidade em servir ao tráfego com conforto, segurança e economia, sendo expressa em termos da satisfação do usuário ou da qualidade da superfície de rolamento de uma seção do pavimento. Já o desempenho de um pavimento, ao longo de sua vida útil, é definido como a medida de sua serventia, no tempo, ou após determinado número de aplicação de carga, ou ainda, como a

evolução da deterioração do pavimento devido à ação do tráfego, conjuntamente aos agentes climáticos.

De modo simplificado, o desempenho de um pavimento pode ser classificado de três formas: funcional, estrutural e relativa à segurança. O desempenho funcional diz respeito à capacidade do pavimento de satisfazer sua função principal, que é a de fornecer uma superfície com serventia adequada quanto à qualidade ao rolamento, estando, portanto, diretamente relacionada à irregularidade longitudinal de um pavimento. O estrutural se refere à capacidade de o pavimento manter sua integridade estrutural, não apresentando falhas significativas e/ou atingindo a ruptura, que possam acarretar, por consequência, a perda do desempenho funcional. Já o desempenho relativo à segurança se relaciona com as características de resistência à derrapagem e ao potencial de hidroplanagem (DNIT, 2006).

2.1.2 Estrutura e Comportamento Estrutural de um Pavimento

O pavimento consiste em uma estrutura formada por camadas sobrepostas de diferentes materiais, como revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito, sendo este último a fundação e, também, parte integrante da estrutura (BALBO, 2007). As funções específicas de cada uma das camadas que compõem um pavimento não são matéria de estudo na presente dissertação e, portanto, não são abordadas nesta seção. Na Figura 2.1, é apresentada representação genérica da estrutura de um pavimento.

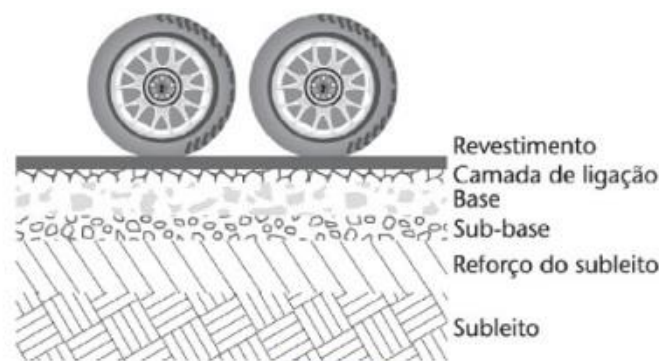


Figura 2.1: Representação genérica da estrutura (multicamadas) de pavimento
Fonte: BALBO (2007)

Do ponto de vista estrutural, simplificado, um pavimento é concebido para receber cargas e transmitir esforços, aliviando as pressões ao longo das camadas até a fundação da estrutura, ou seja, ao longo da profundidade, e funcionando adequadamente quando todos os elementos da estrutura apresentam deformações compatíveis com a natureza e a resistência dos materiais

que compõem as camadas, não ocorrendo processos de danificação ou ruptura prematura. As cargas aplicadas sobre um pavimento, associadas às condições climáticas, principalmente tendo em vista as variações de temperatura, geram esforços, determinando um estado de tensões na estrutura de um pavimento, o qual depende do comportamento mecânico de cada uma das camadas, então representado pelo denominado módulo equivalente elástico “E” e pelo coeficiente de *Poisson* “ μ ”, e do conjunto formado por elas (BALBO, 2007).

Com a passagem de uma carga sobre uma estrutura multicamadas de um pavimento, bem como considerando os esforços de flexão gerados, o estado de tensões apresenta uma linha neutra, separando a estrutura em zonas de contração e distensão. Sob a área de contato da carga e próximo à superfície, podem ser verificados esforços de contração do material. Já em região localizada abaixo da linha neutra, sob a carga, são observados esforços de distensão do material (OTTO *et al.* 2012; OTTO, 2018). Na Figura 2.2, é apresentada representação dos esforços gerados em um pavimento devido à passagem de uma carga em movimento.

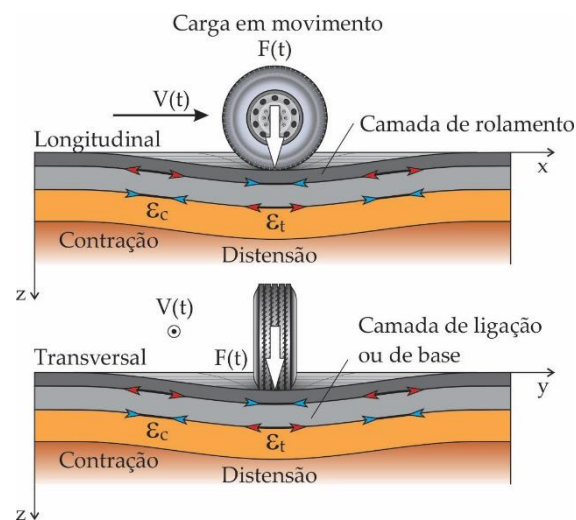


Figura 2.2: Esforços no pavimento devido à passagem de uma carga em movimento
 Fonte: Homsí (2011) *apud* Otto (2018)

De modo a exemplificar, Otto *et al.* (2012) desenvolveram estudo em pista experimental localizada na rodovia BR-101/SC, no Município de Araranguá, no Estado de Santa Catarina, a partir de extensômetro instalado em uma estrutura de pavimento, composta de uma camada de revestimento em concreto asfáltico com espessura de 17 cm, base de 18 cm de brita graduada e sub-base de 20 cm de macadame seco. Nesse sentido, os autores obtiveram os sinais de deformação longitudinal e transversal, conforme se verifica na Figura 2.3.

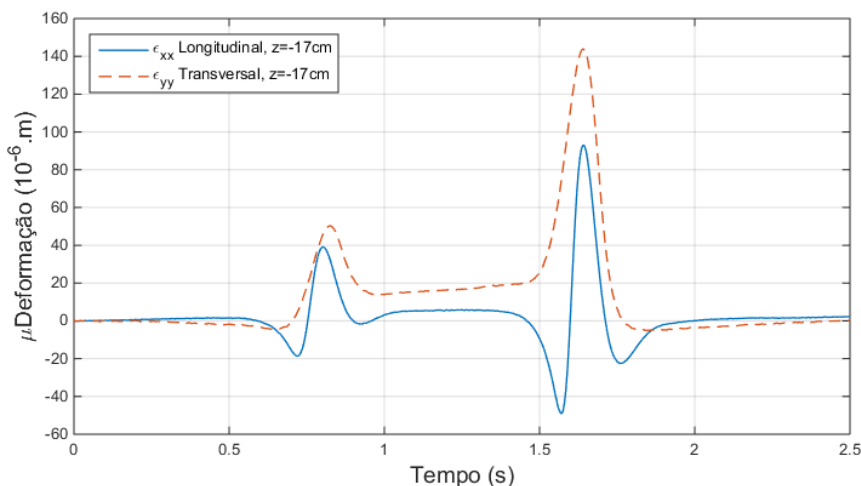


Figura 2.3: Sinal de deformação longitudinal e transversal de extensômetro localizado na fibra inferior da camada de concreto asfáltico, com a passagem de veículo em movimento
 Fonte: Otto *et al.* (2012)

Otto *et al.* (2012) observaram, na direção longitudinal, a sequência de esforços de contração (valores negativos), distensão (valores positivos) e contração novamente, e na direção transversal, a ocorrência de tração com valores levemente acima daqueles ocorridos na direção longitudinal. Os sinais obtidos, segundo os autores, representam a resposta do pavimento com relação ao extensômetro, que foi colocado na fibra inferior da camada de concreto asfáltico (profundidade de 17 cm), gerada pela passagem de um veículo de 2 eixos (eixo 1 = 4.586 kg, eixo 2 = 10.016 kg), em uma velocidade de 30 km/h, com temperatura (Θ) igual a 27° C.

2.1.3 O Fenômeno da Fadiga e a Deterioração de um Pavimento

A explicação relativa à ruptura por fadiga de diferentes estruturas de pavimentos, quando solicitadas dinamicamente por cargas repetidas, tem fundamento na mecânica da fratura, a qual torna possível o desenvolvimento de modelos de deterioração de pavimentos por trincamento, através de uma análise mecanística. No que se refere à fadiga, menciona-se que Miner, em 1945, realizou um estudo do efeito acumulado de fadiga de estruturas metálicas utilizadas em aviões, tendo-se admitido que todo o trabalho aplicado contribui para a fadiga e que o início de uma trinca corresponde à ruptura, e tendo estabelecido que a ruptura de uma estrutura solicitada dinamicamente ocorre a partir da relação entre o número de ciclos aplicados de tensão máxima (n_i) e o número que provoca ruptura (N_i), para uma determinada carga (P_i), conforme a relação (MEDINA & MOTTA, 2015b):

$$\sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = 1 \quad (1.1)$$

Nesse sentido, a realização do ensaio de fadiga permite determinar o número de ciclos de uma deformação ou tensão que conduz à ruptura de um material. A duração de vida de um material, por sua vez, é função da amplitude de solicitações aplicadas, sendo habitualmente caracterizada pela relação do tipo (CORTÉ & BENEDETTO, 2005):

$$S = a N^{-b} \quad (1.2)$$

Onde, (N) é o número de aplicação da solicitação, (S) é a solicitação (podendo ser tensão ou deformação), (a) e (b) são constante de proporcionalidade e expoente, respectivamente. Na representação logarítmica, a curva é uma reta representada pela Equação (1.3). No caso de uma solicitação repetitiva suave (senoidal), cada ensaio permite definir o conjunto (S, N), com (S) sendo a amplitude do nível da solicitação aplicada e (N) a duração da vida do corpo de prova a essa solicitação, sendo que (S) pode ser uma amplitude de força (respectivamente a tensão) ou deslocamento (respectivamente a deformação).

$$S = a - b \log(N) \quad (1.3)$$

Diante do exposto a respeito do fenômeno da fadiga, as tensões, deformações e deslocamentos, quando levados ao limite, tendo em vista a magnitude e/ou número de repetições das cargas do tráfego, podem levar à fadiga dos materiais e, conseqüentemente, à ocorrência de deteriorações em um pavimento. Entretanto, as deteriorações, e o seu acúmulo, podem estar relacionados não somente às cargas do tráfego, mas também à sua composição (carga por eixo, tipos de suspensão, tipos de rodados e pressão de enchimento dos pneus *etc.*), às condições ambientais, ao dimensionamento das estruturas de pavimentos e, portanto, aos materiais empregados para a estruturação das camadas e à espessura adotada para cada uma delas, a falhas decorrentes do processo construtivo e ao uso das estruturas ao longo do tempo (FERNANDES JÚNIOR, 1994; FONTENELE, 2011).

Desse modo, as deteriorações, ou acúmulo de deteriorações, podem ser expressos em termos de defeitos no pavimento, a partir da formulação de modelos matemáticos e da utilização de *softwares* voltados ao dimensionamento e/ou à análise e previsão de desempenho de pavimentos. Como defeitos, citam-se, por exemplo, as trincas por fadiga, os afundamentos nas trilhas de rodas e a irregularidade longitudinal (FERNANDES JÚNIOR, 1994).

Com relação à irregularidade longitudinal, esta se caracteriza como um fator que representa o efeito decorrente de uma série de deteriorações e defeitos. De maneira simplificada, a irregularidade longitudinal pode ser definida como o somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano referencial ideal. Ou seja, a partir de um valor inicial de irregularidade longitudinal, que pode ser decorrente de imperfeições ocasionadas no processo construtivo, pode-se atingir valores crescentes, ao longo do tempo, em função das deteriorações ocasionadas em um pavimento. Entretanto, a irregularidade longitudinal apresenta algumas particularidades, as quais estão relacionadas com sua capacidade de afetar a dinâmica dos veículos e, portanto, as cargas dinâmicas que atuam sobre um pavimento (DNIT, 2006).

Nesse sentido, o aumento da irregularidade longitudinal leva ao aumento das ações provocadas pelas cargas dinâmicas, acelerando o processo de deterioração de um pavimento, ao comprometimento da segurança dos cidadãos e ao aumento dos custos operacionais dos veículos (combustível, reparos e manutenções gerais) (DNER, 2000; NCHRP, 2004; DNIT, 2006; LCPC, 2009 *apud* OTTO, 2018; ISLAM & BUTTLAR, 2012). Na Figura 2.4, é apresentada ilustração do perfil longitudinal e transversal de um pavimento e a trajetória de um pneu.

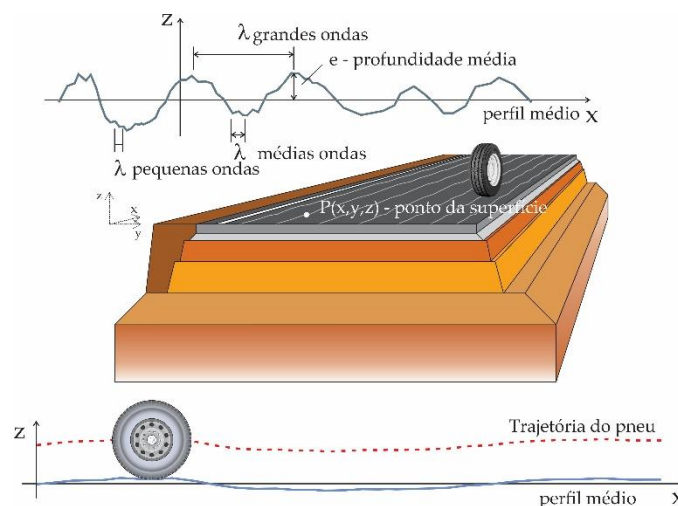


Figura 2.4: Perfil longitudinal e transversal de um pavimento e a trajetória de um pneu
Fonte: Otto (2018)

Ressalta-se que, na ISO 13473-2:2002, é proposta a distinção da textura de pavimentos em quatro domínios (microtextura, macrotextura, megatextura e perfil longitudinal) definidos por comprimentos de ondas, bem como é apresentado, para cada intervalo de comprimento de onda, ou por tipo de textura, os respectivos efeitos aos usuários. Ainda, destaca-se existir duas formas

de avaliação do perfil longitudinal de um pavimento, a saber pelo Índice de Irregularidade Internacional, ou do inglês, *International Roughness Index* (IRI), ou a partir de Notas de Banda de Ondas (NBO) (OTTO, 2018). As definições de textura, bem como as medidas para avaliação do perfil longitudinal, fazem-se relevantes para fins, principalmente, de avaliação e previsão de desempenho de pavimentos, inclusive considerando a inter-relação destes com as tecnologias utilizadas para a pesagem de veículos. Contudo, apesar da sua relação com o trabalho, não são foco principal de estudo desta pesquisa e, portanto, não são abordadas com mais detalhes.

2.2 TRÁFEGO E SUAS CARACTERÍSTICAS

O tráfego de veículos comerciais pesados é formado por veículos de carga e de passageiros que apresentam diferentes configurações, possibilitando o transporte e deslocamentos com diferentes magnitudes de carga. Nesse sentido, o adequado conhecimento de suas características se torna importante, não só no que diz respeito ao comportamento de pavimentos, mas também, por consequência, às respostas e valores de peso possíveis de serem obtidos a partir do uso de tecnologias para pesagem, em sendo estas integradas às estruturas de pavimentos, devido à interação entre tais diferentes estruturas (pavimentos/tecnologias), em associação às características do tráfego.

Nos trabalhos desenvolvidos por Gillespie *et al.* (1993) e Fernandes Júnior (1994), verifica-se que, na interação veículo-via, existem diversos fatores de tráfego que podem influenciar no desempenho de pavimentos. Tais fatores são divididos em dois grupos, sendo o primeiro deles relacionado exclusivamente aos veículos, a saber pelo Peso Bruto Total (PBT) ou Peso Bruto Total Combinado (PBTC), pelas cargas por eixo, pelos tipos de eixos, suas respectivas distribuições de carga e espaçamento entre eixos, pelo tipo de pneu, tipo de rodagem, pressão de enchimento dos pneus e sua distribuição em contato com o pavimento, pela variação lateral da trajetória das rodas e pelas manobras. Os fatores que compõem o segundo grupo, por sua vez, são relacionados aos pavimentos, sendo eles a velocidade, o tipo de suspensão e a carga dinâmica.

Nesse sentido, considerando o exposto por Gillespie *et al.* (1993) e Fernandes Júnior (1994), em cujos trabalhos se abordou a respeito da interação veículo-via, e por Scheuter (1998), que apresentou os fatores externos relacionados aos erros de tecnologias de pesagem, na presente seção, serão realizadas breves abordagens sobre os veículos e seus limites legais de peso e dimensões, no contexto brasileiro, sobre os tipos de eixos e seus limites legais, também para a

realidade brasileira, sobre os tipos de rodados e pressões de enchimento dos pneus, sobre os modelos de suspensões e, por fim, a respeito da velocidade e das cargas dinâmicas.

2.2.1 Veículos e seus Limites Legais de Pesos e Dimensões

Como comentado no Capítulo 1, a presente pesquisa está relacionada à pesagem de veículos rodoviários de carga e de passageiros, mediante o uso de sistemas de pesagem em alta velocidade, com foco na fiscalização da sobrecarga transportada. Assim, nesta seção, dada a necessidade de se conhecer sobre os veículos passíveis de serem pesados, apresentam-se as definições atribuídas aos mesmos e suas distinções, bem como se discorre a respeito do surgimento e estabelecimento das configurações e composições permitidas de trafegarem nas rodovias brasileiras.

Segundo a Organização Internacional de Construtores de Automóveis, ou do francês *Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles* (OICA, 2020), organização esta fundada em Paris, no ano de 1919, e a qual possui como missão defender o interesse de fabricantes, montadores e importadores de veículos, em suas respectivas nações federativas, a separação entre veículos comerciais leves (caminhões leves e furgões) e pesados (caminhões pesados e ônibus) se concentra na capacidade de transporte de cada um dos dois segmentos. Para os veículos comerciais pesados, a depender das definições específicas de cada país, a capacidade de transporte é superior ao limite máximo de 3,5 a 7 toneladas, então definido para os veículos comerciais leves.

No Brasil, a indústria automobilística passou a se consolidar a partir de meados da década de 1950, tendo sido impulsionada por diversas ações relacionadas à política de modernização e transformação da economia do país, que previa investimentos em setores estratégicos, como o de transportes. No que se refere a tal setor, previa-se, principalmente, a expansão da infraestrutura rodoviária e o aumento da produção de veículos, dentre eles, de caminhões (BRASIL, 1958; PEREIRA & LESSA, 2011).

Nesse contexto, observa-se que as primeiras definições quanto aos veículos rodoviários de carga e de passageiros, bem como a distinção entre eles, passaram a ser especificadas com a promulgação da Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, a qual instituiu o Código de Trânsito Brasileiro (CTB). Conforme o CTB (1997), veículos automotores são aqueles com motor de propulsão, que circulam por seus próprios meios, servindo para o transporte viário de pessoas

e coisas, ou para tração viária de veículos utilizados para o transporte de pessoas e coisas, compreendendo, também, veículos que não circulem sobre trilhos, como os ônibus elétricos. Nesses termos, no CTB (1997), os veículos de carga são definidos como aqueles destinados ao transporte de carga, podendo transportar dois passageiros, exclusive o condutor, enquanto os veículos de passageiros são apontados como aqueles destinados ao transporte de pessoas e de suas bagagens. Complementarmente, os veículos automotores englobam, dentre outros, o caminhão-trator e os ônibus.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2007), através da NBR 6067:2007, intitulada “Veículos rodoviários automotores, seus rebocados e combinados – Classificação, terminologia e definições”, define veículos rodoviários automotores como aqueles que transportam sua própria energia e motor(es) ao transporte de pessoas e/ou carga, tração de outros veículos e prestação de serviços. Ainda, em consonância com o CTB (1997), a ABNT (2007) define veículos de carga como aqueles destinados ao transporte de carga, e veículos de passageiros como aqueles voltados ao transporte de pessoas e suas bagagens. No tocante ao transporte de passageiros, os micro-ônibus e os ônibus são definidos, respectivamente, como veículos automotores de transporte coletivo de até 20 pessoas, e para mais de 20 pessoas. Já com relação ao transporte de cargas, os caminhões são definidos como veículos automotores que possuem PBT acima de 3,5 toneladas.

Especificamente com relação aos veículos rodoviários de carga, a ABNT (2012), através da NBR 9762:2012, intitulada “Veículo rodoviário de carga – Terminologia”, define os mesmos como aqueles utilizados para o trânsito nas vias de rolamento, com destino ao transporte geral de cargas, como gases, líquidos ou sólidos, contemplando veículos automotores, implementos rodoviários e veículos articulados, conforme discriminações apresentadas na Figura 2.5. Ressalta-se que, no Anexo A da NBR:9762:2012, são apresentados os desenhos referentes às definições discriminadas na Figura 2.5.

Apesar de as terminologias contidas na NBR 9762:2012 não possuírem ampla adesão de todos os órgãos e entidades responsáveis pelo controle e fiscalização dos veículos de carga, a partir de tal norma é possível observar a variedade dos tipos e configurações de veículos e a variedade dos tipos de cargas que podem ser transportadas e por cada um dos tipos e configurações de veículos. A partir de tal norma, também é possível observar existir tipos de veículos adequados para cada tipo de carregamento.

Veículo rodoviário de carga	veículo automotor	caminhão-tractor, caminhão, caminhonete e camioneta		
	implemento rodoviário	rebocado incompleto/completo		
		equipamento veicular	fixo com compartimento aberto	bobineira
				canavieira
				carga seca
				carrega tudo
				graneleira
				para animais
				para bebidas
				para botijões
				para granito
				para toras
				para transporte militar
				para veículos
				porta-contêiner
sistema intercambiável				
fixo com compartimento fechado	baú carga geral			
	baú frigorífico			
	baú isotérmico			
	baú lonado			
	baú para transporte de bebidas			
	<i>in loader</i>			
	para presos			
	silo			
	silo de armazenamento de massa asfáltica			
	tanque			
tanque para armazenamento de cimento asfáltico				
fixo com compartimento funcional	tanque para produtos perigosos			
	basculante			
	betoneira			
	coletor compactador			
	silo dosador de asfalto			
removível	espargidor de asfalto			
	usina de asfalto			
	usina de pré-mistura a frio			
mecanismo operacional	contêiner			
	contentor			
	para detritos sólidos			
	para fins múltiplos			
	combate a incêndio			
	entretenimento			
	guincho-socorro			
	guindaste articulado hidráulico			
	guindaste hidráulico autopropelido			
	guindaste telescópico hidráulico			
	inspeção e serviços aéreos			
plataformas elevatórias				
poliguindaste				
<i>roll-on roll-off</i>				
salvamento e resgate				
distribuidor de peso	<i>dolly</i> com rala			
	eixo autodirecional			
	eixo direcional			
	eixo veicular auxiliar			
veículo articulado	veículo articulado pesado	reboque/semireboque		
	veículo articulado leve			

Figura 2.5: Esquema de definições dos veículos rodoviários de carga

Fonte: Adaptado de ABNT (2012)

Entretanto, o CTB (1997), em seu artigo 99, determina que somente poderão transitar pelas vias terrestres veículos cujas dimensões atendam ao estabelecido pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Nesse sentido, o CONTRAN (1998a) publicou a Resolução CONTRAN nº 12, de 06 de fevereiro de 1998, a partir da qual, primeiramente, foi regulamentado o artigo 99 do CTB, bem como se estabeleceram os limites de peso e dimensões para a circulação de veículos rodoviários de carga e de passageiros. A referida Resolução passou por alterações posteriores, as quais foram revogadas com a publicação, por CONTRAN (2006a), da Resolução CONTRAN nº 210, de 13 de novembro de 2006, que se encontra em vigor, apesar de as diversas alterações sofridas desde a sua publicação.

Paralelamente, o CONTRAN (1998b) publicou a Resolução CONTRAN nº 68, de 23 de setembro de 1998, a partir da qual se regulamentou o artigo 100 do CTB, estabelecendo os requisitos para a circulação de Combinações de Veículos de Carga (CVCs), com mais de duas unidades, inclusa a unidade tratora, e com PBT acima de 57 toneladas ou com comprimento total acima de 19,80 metros. Tal Resolução, da mesma forma, passou por diversas alterações, que foram revogadas com a publicação, por CONTRAN (2006b), da Resolução CONTRAN nº 211, de 13 de novembro de 2006. Esta última, por sua vez, se encontra em vigor, tendo sofrido diversas alterações desde sua publicação.

Diante das Resoluções CONTRAN nº 210/2006 e nº 211/2006, o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) (2009) publicou a Portaria DENATRAN nº 63, de 31 de março de 2009, a partir da qual foram homologados e compilados os veículos rodoviários de carga e de passageiros, bem como as CVCs, com seus respectivos limites de comprimento, PBT e PBTC. As configurações de veículos rodoviários homologados, portanto, se caracterizam como aquelas permitidas de circular em nas vias, dentro das respectivas especificações de peso e dimensões.

Ressalta-se que o PBT, segundo o CTB (1997), é definido como o peso máximo que o veículo transmite ao pavimento, sendo constituído da soma da tara do veículo (peso próprio acrescido da carroceria e dos demais equipamentos e acessórios) e sua lotação (carga útil máxima, incluindo condutor e passageiros). Já o PBTC, semelhantemente, é caracterizado como o peso máximo transmitido pela combinação de um caminhão-trator mais seu semi-reboque, ou do caminhão mais o seu reboque ou reboques.

Nesse contexto, a Portaria DENATRAN nº 63/2009, tendo em vista as Portarias que a alteraram, a saber pela Portaria DENATRAN nº 249, de 29 de dezembro de 2016, e pela Portaria DENATRAN nº 86, de 31 de maio de 2017, é composta por quatro anexos, sendo o Anexo I referente às composições de veículos homologadas para o transporte de carga, o Anexo II correspondente às composições de carga que necessitam de Autorização Especial de Trânsito (AET), o Anexo III relativo às composições de veículos homologadas para o transporte de passageiros, e o Anexo IV referente à composição de veículo, com configuração “caminhão trator + semi-reboque + *dolly* + semi-reboque”, que necessita de AET.

Nos citados Anexos, são apresentadas as configurações dos veículos rodoviários de carga e passageiros, com as discriminações de eixos, peso máximo por eixo ou conjunto (grupo) de eixos, PBT/PBTC, para cada uma das dimensões das composições de veículos homologadas, e o comprimento máximo admitido para os grupos de veículos. Ainda em relação aos Anexos, observa-se que, para todos os veículos homologados, são admitidos PBT/PBTC superiores ao limite máximo de 7 toneladas de capacidade de transporte, indo ao encontro das definições previamente estabelecidas pela OICA.

Nesse sentido, considerando a correspondência das definições, bem como por facilidade de denominação, o presente trabalho adotará, nos devidos casos, o termo “veículos comerciais pesados” como representação aos veículos rodoviários de carga e de passageiros. Do exposto, salienta-se que todas as citadas Resoluções e Portarias podem ser facilmente consultadas mediante acesso ao endereço eletrônico do atual Ministério da Infraestrutura, na seção relativa ao DENATRAN, conforme referências bibliográficas desta dissertação.

2.2.2 Eixos

Diante da diversidade de configurações de veículos homologados no Brasil, é possível realizar uma abordagem mais detalhada quanto aos eixos, os quais, por sua vez, podem-se fazer como parâmetro para a obtenção dos valores de PBT e PBTC, quando da pesagem de veículos. Nesse sentido, de acordo com Fernandes Júnior (1994) e CONTRAN (2006a), os principais tipos de eixos são do tipo isolado, denominados como eixo simples, ou em conjunto (grupo), então denominados como eixos em tandem. Os eixos isolados ou em grupo podem ser dotados com apenas uma roda em cada extremidade (rodado simples) ou duas rodas (rodado duplo). Especificamente para os ônibus, existem combinações de eixos simples de rodado simples, com eixos simples de rodado duplo, não configurando, entretanto, um eixo do tipo tandem duplo.

Na Figura 2.6, são apresentados os principais tipos de eixos que circulam nas rodovias brasileiras, sendo que, para cada eixo, são especificados o tipo e o limite legal de peso, expresso em toneladas, e as distâncias entre eixos, conforme diferenciações constantes na Resolução CONTRAN nº 210/2006.

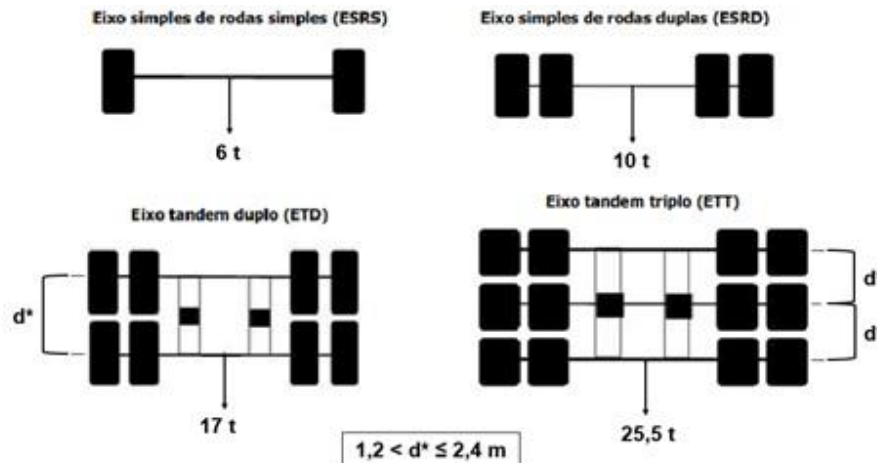


Figura 2.6: Principais configurações de eixos
 Fonte: Adaptado de DNIT (2012)

Para Fernandes Júnior (1994) e Fontenele (2011), a carga por eixo, independentemente dos fatores ambientais, do comportamento estrutural dos pavimentos e da ação combinada com outros fatores de tráfego, é a que mais afeta a deterioração dos pavimentos, podendo não ser o único fator significativo, mas devendo ser sempre considerada em se tratando de estudos relativos aos efeitos das solicitações decorrentes do tráfego. Nesse sentido, a exposição quanto à distribuição de carga entre eixos de um mesmo grupo e quanto ao espaçamento entre eixos de um mesmo grupo se torna relevante, tendo em vista ser crescente, no Brasil, o aumento do uso dos eixos em tandem, especialmente o tandem triplo.

Segundo Wang & Anderson (1981) e Fernandes Júnior (1994), os eixos tandem duplo e triplo são dotados com suspensões projetadas para distribuir a carga estática total equitativamente entre os eixos do grupo. Entretanto, na prática, com um veículo em movimento, os eixos de um tandem não recebem parcelas iguais de carregamento, situação essa agravada para os eixos tandem triplo, os quais têm dois eixos fixos e um passível de ser levantado, diferentemente dos eixos tandem duplo, que possuem configuração fixa. Geralmente, os eixos tandem triplo são tandem duplos modificados, com um eixo retrátil à frente ou atrás do tandem duplo.

No que se refere ao espaçamento entre os eixos de um tandem, seja ele duplo ou triplo, Fernandes Júnior (1994) menciona que o mesmo apresenta influência com relação à deterioração ou dano de um pavimento, o que faz com que o tratamento das configurações em tandem, de modo igualitário, possa acarretar erros significativos. Para Gillespie *et al.* (1993), a interação entre a irregularidade do perfil de um pavimento, a velocidade praticada e o espaçamento entre eixos causam vibrações nos veículos e variação dinâmica nas cargas das rodas com relação aos respectivos valores estáticos.

2.2.3 Rodados e Pressão de Enchimento dos Pneus

Os pneus são os responsáveis pelo suporte, impulsão e controle dos veículos rodoviários, por intermédio das forças que se desenvolvem na interface pneu-pavimento. Nesse sentido, têm como função suportar as cargas que atuam nos eixos, distribuir as cargas verticais dos veículos sobre a superfície de contato, que se apresenta como sendo relativamente pequena e, ainda, compor o sistema de suspensão dos veículos, transmitindo ao pavimento as forças horizontais que se desenvolvem quando da tração, frenagem e mudança de trajetória dos veículos. Comumente, tem-se utilizado dois tipos de pneus, os diagonais e os radiais. Os diagonais, utilizados desde o início da indústria automotiva, têm sido substituídos, desde a década de 70, pelos pneus radiais, os quais são capazes de suportar maiores cargas e pressões de enchimento (FERNANDES JÚNIOR, 1994). A estrutura que compõe um pneu, bem como esquemas relativos à construção dos pneus radial e diagonal são apresentados na Figura 2.7.

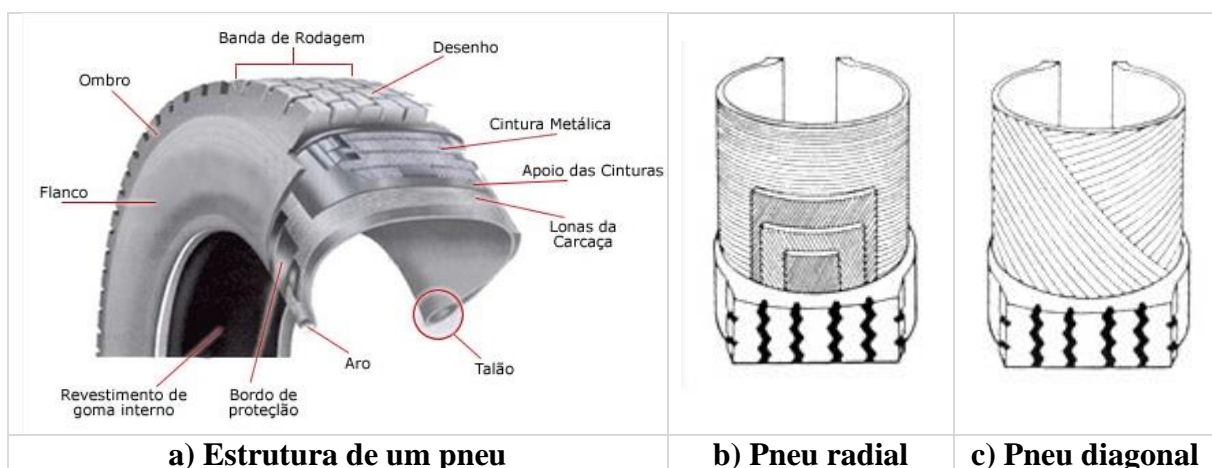


Figura 2.7: Parte de um pneu e sua construção radial e diagonal

Fonte: Ost & Vipal (2020)

A fim de melhorar a eficiência do setor de transporte rodoviário e, também, visando substituir os eixos com rodados duplos, obtendo maior capacidade de carga, maior facilidade de manutenção, menor custo (em relação aos dois pneus convencionais), economia de combustível

(menor resistência de rolamento) e menor desgaste; fabricantes têm produzido, desde a década de 80, aliados às leis e regulamentações vigentes em cada país, outro tipo de pneu, então denominado como extralargo, ou do inglês, *supersingle* ou *wide-single*. Tal pneu, em síntese, possui maior capacidade de carga e maior pressão de enchimento (FERNANDES JÚNIOR, 1994; AL-QADI *et al.*, 2004; PETERLINI, 2006; FONTENELE, 2011).

Entretanto, apesar de os benefícios, estudos obtiveram resultados de que pneus extralargos resultaram em deterioração acelerada dos pavimentos, se comparados aos rodados duplos, considerando a mesma carga por eixo em ambas situações. A deterioração identificada foi da ordem de 4 a 7 vezes maior, em termos de trinca por fadiga no revestimento asfáltico, e da ordem de 1,5 a 2 vezes maior, em se tratando de deformação permanente nas trilhas de rodas (GILLESPIE *et al.*, 1993; FERNANDES JÚNIOR, 1994).

Devido à preocupação com o dano ao pavimento, uma nova geração de pneus extralargos passou a ser produzido, de modo que eles fossem similares, em termos de danos, aos pneus com rodado duplo. A nova geração de extralargos, portanto, passou a apresentar maior banda de pneu, maior capacidade de carga e menor pressão de enchimento que os extralargos convencionais (TRB, 1990; FERNANDES JÚNIOR *et al.* 2002; FERNANDES JÚNIOR *et al.*, 2006; FERNANDES JÚNIOR *et al.*, 2007; XUE & WEAVER, 2011). Em estudo comparativo entre os dois tipos de pneus extralargos (convencional e da nova geração) e, também, os de rodado duplo, Dessouky *et al.* (2007) obtiveram os resultados de que o pneu extralargo convencional foi o mais prejudicial ao pavimento dentre os pneus testados. Já os pneus extralargos da nova geração, de maior banda, apresentaram comportamento similar, quanto aos afundamentos na trilha de roda e trincas por fadiga, aos pneus de rodado duplo.

De acordo com Fernandes Júnior (1994), a importância dos pneus, no que se refere ao desempenho de um pavimento, também está associada à pressão de enchimento que ele é capaz de suportar e à distribuição da pressão na superfície de contato pneu-pavimento. Esta última, por sua vez, distribui-se irregularmente sobre uma superfície aproximadamente elíptica. Fernandes Júnior *et al.* (2006) e Fernandes Júnior *et al.* (2007), que estudaram os efeitos do tráfego sobre o desempenho de pavimentos flexíveis brasileiros e portugueses, concluíram, a partir do cálculo dos fatores de equivalência de carga empírico-mecanísticos, que, em termos percentuais, a elevação da pressão de enchimento de 80 psi (572 kPa), para a de 120 psi (844 kPa), a qual foi apontada como normalmente encontrada nos pneus radiais existentes no tráfego,

pode corresponder a uma variação de 50% nos fatores de equivalência de carga, contribuindo para a deterioração precoce dos pavimentos.

Beer (2008) *apud* Momm *et al.* (2011) desenvolveu um equipamento para a pesagem dos veículos comerciais pesados em movimento, que determina a repartição tridimensional da pressão, em movimento livre, e à baixa velocidade. Apesar de o equipamento não admitir situações de frenagem, mudança de trajetória, ou trajetória em curva, ele revela a variação da pressão de contato com diferentes pressões de enchimento, diferentes tipos de pneus e especificidades da área de contato. Das medições realizadas pelo autor, a pressão de contato não foi uniforme. Para uma mesma pressão de enchimento, mas valores de carga crescentes, foram verificados maiores valores de pressão nos flancos dos pneus, para cargas maiores. Já para altas pressões de enchimento, e cargas menores, se observou concentração de tensões na região central da área de contato.

Nesse sentido, Beer (2008) *apud* Momm *et al.* (2011) constatou que, para uma situação de uniformidade da pressão de contato, é necessário que esta seja conjugada com a carga. As variações ocasionadas pela associação da pressão de enchimento dos pneus com as cargas revelam, portanto, diferenças de deformação, não somente no pavimento, mas também nos equipamentos de pesagem nele contidos. Na Figura 2.8, são apresentadas as medidas obtidas por Beer (2008) *apud* Momm *et al.* (2011), a partir da variação da pressão de contato e da carga por eixo aplicada.

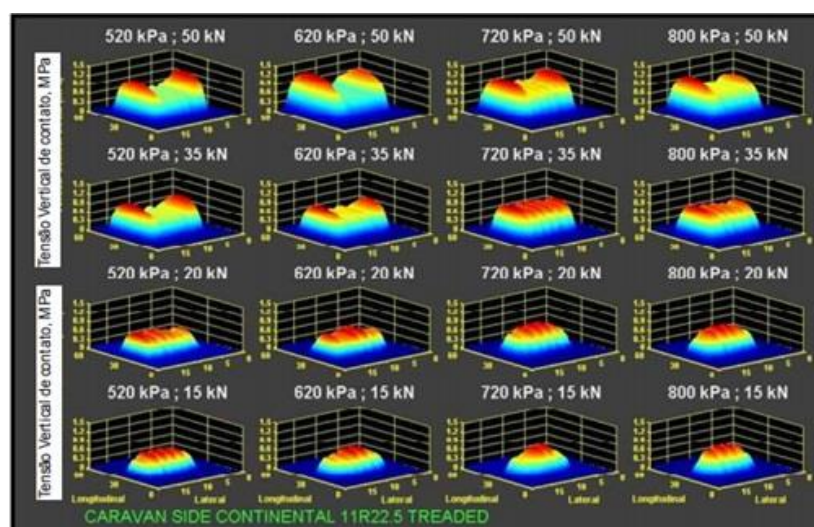


Figura 2.8: Pressão de contato de pneus em função da variação da pressão de enchimento e da carga aplicada

Fonte: Beer (2008) *apud* Momm *et al.* (2011)

Fontenele (2011), por fim, cujo objetivo da pesquisa foi analisar os efeitos sobre o desempenho de pavimentos quanto ao uso de modelos estatísticos de espectro de cargas por eixo de veículos rodoviários, concluiu que o aumento da pressão de enchimento para 120 psi (844 kPa) fez com que as deteriorações do pavimento atingissem os valores limites de projeto em menos tempo, tendo havido uma redução da vida do pavimento da ordem de 50 a 60%, com relação às deformações permanentes nas trilhas de roda, e de cerca de 24% com relação às trincas por fadiga.

2.2.4 Suspensões dos Veículos

As suspensões consistem em um sistema mecânico que conecta os eixos ao chassi (estrutura) de um veículo, sendo voltadas a melhorar o conforto e a segurança dos passageiros, na medida em que proporciona uma melhor condição de aderência no contato pneu-pavimento, bem como sendo voltadas a maximizar a capacidade em suportar cargas, a durabilidade, a estabilidade e o controle dos veículos, mediante ao amortecimento e redução dos movimentos verticais, melhorando a dirigibilidade, principalmente durante as manobras de frenagem. Uma suspensão pode ser representada por uma combinação paralela de mola e amortecedor, conforme representação constante na Figura 2.9. Nesse sentido, as molas absorvem a energia do balanço dos veículos, quando estes passam por irregularidades superficiais de um pavimento, e os amortecedores dissipam as vibrações dos veículos e das molas, estabilizando-os (FERNANDES JÚNIOR, 1994; OTTO, 2018).

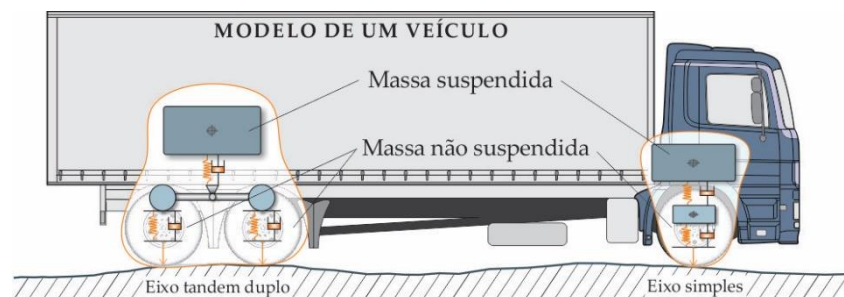


Figura 2.9: Representação do sistema de suspensão de um veículo
Fonte: Otto (2018)

De acordo com Fernandes Júnior (1994), os tipos de suspensões mais utilizados são as suspensões de feixe de molas, também conhecidas como semi-elípticas, as quais apresentam baixo custo e atividade dinâmica moderada, sendo as mais comuns principalmente nos eixos dianteiros dos veículos, e as suspensões pneumáticas, que consistem em ar comprimido contido por bolsas de borracha, sendo mais caras, porém fornecendo maior conforto e proteção às cargas, em virtude da menor atividade dinâmica que apresenta. Segundo Otto (2018), uma

suspensão veicular pode ser classificada como passiva, ativa ou semi-ativa, sendo o princípio da suspensão ativa o de inserir um atuador, entre a massa suspensa e a não suspensa, além da mola e do amortecedor, ou em substituição aos dois.

2.2.5 Velocidade e Cargas Dinâmicas

A velocidade praticada tem influência no desempenho de pavimentos pelo fato de alterar as cargas dinâmicas, afetando, também, as respostas estruturais dos pavimentos, uma vez que altera o tempo de aplicação das cargas e, conseqüentemente, no caso de pavimentos compostos por camadas em Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP), as propriedades viscoelásticas do material. Simplificadamente, os efeitos dinâmicos decorrentes da velocidade prevalecem a partir de um determinado nível de irregularidade superficial. Menciona-se, ainda, que as cargas dinâmicas aumentam com aumento da velocidade, enquanto a redução da deterioração do pavimento, mesmo com o aumento da velocidade, em função do menor tempo de aplicação das cargas, prevalece em rodovias com pequena irregularidade de superfície e que sejam compostas por revestimento em CAP. Nesse sentido, os efeitos dinâmicos têm como fatores inseparáveis a velocidade e a irregularidade da superfície de pavimentos, a depender de cada estrutura de pavimento, uma vez que a velocidade determina como a irregularidade será percebida pelos veículos e pelos usuários (GILLESPIE *et al.* 1993).

No que se refere especificamente às cargas dinâmicas, menciona-se que a força vertical imposta nos pavimentos por cada pneu pode ser dividida em carga estática, devido à distribuição do peso do veículo nos eixos, e em uma componente variável, denominada como carga dinâmica. As cargas dinâmicas, por sua vez, são decorrentes das vibrações/oscilações dos veículos, quando da sua interação com a irregularidade da superfície de um pavimento, gerando tensões e deformações adicionais, que aceleram seu processo de deterioração (FERNANDES JÚNIOR, 1994). De acordo com Souza *et al.* (1988), extraído de Fernandes Júnior (1994), as respostas dinâmicas de veículos são influenciadas pelo sistema de suspensão, incluindo os efeitos dos pneus (tipo, pressão e condição), pelos tipos de veículos, pelas cargas aplicadas (magnitude e centro de gravidade), pela velocidade e pela irregularidade superficial de um pavimento.

3 FISCALIZAÇÃO DE VEÍCULOS COMERCIAIS PESADOS

Veículos com sobrecarga se configuram como um problema mundial, afetando o sistema de transporte rodoviário e, de modo amplo, a economia dos países. Considerando as características do tráfego de veículos comerciais pesados e sua interação com as estruturas de pavimentos, conforme brevemente apresentado no Capítulo 2, ressalta-se que veículos que trafegam com sobrecarga acarretam ameaças, não somente à manutenção justa e adequada da competitividade econômica do setor rodoviário, mas também devido aos impactos gerados às infraestruturas, em decorrência de sua deterioração precoce e, sobretudo, devido ao aumento dos riscos impostos aos cidadãos, em função do comprometimento da segurança viária. O tráfego com sobrecarga também pode traduzir comportamentos que apontem para o desenvolvimento de atos ilegais de fraude (sonegação) fiscal, quando o carregamento declarado não corresponde ao efetivamente transportado, acarretando implicações para as estruturas estatais e, por conseguinte, para a população como um todo.

Especificamente com relação à fraude fiscal, como forma de se obter vantagens fiscais e econômicas, menciona-se que, no Brasil, sobre o transporte rodoviário de cargas e de passageiros, de modo geral, incidem impostos federais, estaduais e municipais. São eles o Instituto Nacional de Seguridade Social (INSS), Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), Programa de Integridade Social (PIS), Imposto de Renda de Pessoa Jurídica (IRPJ), Contribuição Social sobre Lucro Líquido (CSLL), Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) e Imposto sobre Serviços (ISS) (SIMPLESCTE, 2019; CONTÁBILARABESCOS, 2019).

Conforme exposto na Lei nº 4.729, de 14 de julho de 1965, a sonegação fiscal ocorre, dentre outros aspectos, quando da alteração de faturas ou quaisquer documentos relativos a operações mercantis com o propósito de fraudar a Fazenda Pública (BRASIL, 1965). Entretanto, no Brasil, o faturamento não declarado, por ano, se faz correspondente a R\$ 2,17 trilhões, sendo que os tributos sonegados por empresas somam, anualmente, R\$ 390 bilhões (IBPT, 2018). O tributo mais sonegado corresponde ao ICMS, seguido pelo IRPJ e pelo CSLL. Índícios de sonegação estão presentes em 49% das empresas de pequeno porte, 33% das empresas de médio porte e 18% em grandes empresas. Em valores, a sonegação de tributos federais é maior no setor industrial, seguido das empresas do comércio e das prestadoras de serviços (IBPT, 2018). Do exposto, apesar de o grande impacto econômico decorrente da fraude fiscal, a relação direta

entre tal prática e aquela relacionada à sobrecarga desenvolvida por meio de veículos comerciais pesados, quando das operações de transporte rodoviário de carga e de passageiros, não será tema de estudo nesta dissertação.

Nesse sentido, levando em consideração o cenário brasileiro, dada a reduzida ocorrência de atos de fiscalização da sobrecarga transportada e, também, da eficiência, eficácia e efetividade percebidas quando do desenvolvimento dos mesmos, menciona-se que a potencialidade de aumento do controle relativo à sobrecarga, a partir da implementação de sistemas de pesagem em alta velocidade e, por conseguinte, de modelo de fiscalização configurado pela automatização e por seu caráter direto, aponta, em um primeiro momento, para a necessidade de entendimento quanto à realização dos atos de fiscalização propriamente ditos e quanto aos impactos que eles visam coibir, além também do cenário e estrutura para o desenvolvimento da fiscalização no Brasil. Tais temas, portanto, são relevantes de serem destacados no âmbito desta dissertação.

Tendo como base as referências bibliográficas, o modelo de fiscalização automatizado ou direto, analogamente ao que já se faz regulamentado com relação à fiscalização contra o excesso de velocidade, reservadas as devidas proporções e condições de aplicabilidade, consiste na verificação de veículos de carga e de passageiros, quanto à sobrecarga transportada, na velocidade de fluxo livre ou regulamentar de fiscalização de uma rodovia. Ainda, nesse modelo de fiscalização, os responsáveis pelas infrações ou irregularidades cometidas por excesso de carga transportada passam a ser notificados de modo automatizado, sendo as notificações de autuação, de advertência e/ou de penalidade de multa direcionadas, pelos órgãos ou entidades autuadores, através de sistemas eletrônicos de notificação, ou serviços de envio de correspondências físicas e, também, através de instrumentos oficiais de ampla publicização, como os Diários Oficiais.

Dessa forma, no presente Capítulo, realiza-se uma abordagem sobre os possíveis impactos da sobrecarga, cujos reflexos sejam decorrentes da deterioração precoce de estruturas de pavimentos, do comprometimento da segurança viária, com foco nos prejuízos gerados pela ocorrência de acidentes de trânsito, e da concorrência desleal motivada no sistema de transporte rodoviário, principalmente no que se refere à movimentação de cargas. Em sequência, aborda-se a respeito do ato de fiscalização propriamente dito, fazendo-se menção ao sistema de trânsito instituído no Brasil, como forma de estruturação e definição das competências e

responsabilidades dos órgãos e entidades autuadores. Posteriormente, apresenta-se sobre a legislação de trânsito brasileira, com foco na utilização de instrumentos/tecnologias de pesagem e, por fim, aborda-se a respeito dos modelos de fiscalização e sua eficiência.

3.1 IMPACTOS DA SOBRECARGA

De acordo com Wermeskerken (2005), as razões por trás do transporte de sobrecarga podem variar. A primeira delas se configura pelo seu caráter intencional, visando à obtenção, principalmente, de vantagens econômicas em detrimento ao cumprimento das leis. Em segundo plano, o referido transporte pode ocorrer de maneira não necessariamente intencional, quando, por exemplo, uma empresa que atua no sistema de transporte rodoviário não se encontra ciente da sobrecarga, ou ainda, quando determinado ator do sistema de transporte não se encontra em posição de conseguir influenciar a real carga a ser transportada por meio dos veículos.

Entretanto, é reconhecido existir uma série de problemas que podem ser ocasionados em função do transporte de sobrecarga, os quais acarretam prejuízos para as infraestruturas (pavimentos e pontes), para a segurança viária dos cidadãos e, portanto, para a economia de um país, em seu alcance mais amplo (WERMESKERKEN, 2005; JACOB & BEAUMELLE, 2010; BURNOS *et al.*, 2016). Nesse sentido, nas seções seguintes, realiza-se abordagem a respeito dos possíveis impactos da sobrecarga, com reflexos decorrentes da deterioração precoce de pavimentos, do comprometimento da segurança viária, com foco nos prejuízos provenientes da ocorrência de acidentes de trânsito, e da competitividade desleal motivada no sistema de transporte rodoviário, tendo como enfoque o transporte rodoviário de cargas.

3.1.1 Deterioração Precoce de Pavimentos

No que se refere especificamente aos pavimentos, diversas literaturas apontam, genericamente, que o aumento da carga por eixo, em veículos comerciais pesados, aliado às demais características do tráfego, às condições ambientais e às condições da estrutura e superfície dos pavimentos, acarreta ao aumento exponencial da deterioração com um fator minimamente igual a 4. Tal deterioração, conforme exposto no Capítulo 2, leva à redução precoce de sua vida útil, ou seja, antes do período previsto em projeto e, por conseguinte, ao comprometimento dos seus desempenhos estrutural, funcional e relativo à segurança (FERNANDES JÚNIOR, 1994; WERMESKERKEN, 2005; FONTENELE, 2011).

Otto (2018) e Otto *et al.* (2019) realizaram pesquisas com base em dados coletados durante 30

dias consecutivos (novembro de 2011), a partir da utilização de um conjunto de equipamentos e periféricos (câmeras, *scanner a laser*, detectores de roda dupla/simples, medidor de temperatura e extensômetros) de sistemas de pesagem (alta e baixa velocidade), então instalados na rodovia BR-101/SC, no Município de Araranguá, no Estado de Santa Catarina. Os resultados práticos obtidos possibilitaram verificar, em linhas gerais, a ocorrência da redução prematura da vida útil da estrutura de pavimento empregada para a pesquisa, levando-se em consideração o aumento da carga por eixo ou grupo de eixos.

Otto (2018) e Otto *et al.* (2019) desenvolveram modelo de análise do dano acumulado causado pelas cargas reais do tráfego, para o período de coleta de dados, as quais foram representadas na forma de espectro de carga por eixo ou grupo de eixos, como é possível observar na Figura 3.1, tendo sido as cargas comparadas com os limites legais previstos para cada eixo, conforme o conteúdo da Resolução CONTRAN nº 210/2006. Os espectros, por sua vez, segundo Haider & Harichandran (2007) consistem em informações de carga e de suas repetições (frequências) para várias configurações de eixos (eixos simples, tandem duplos e triplos), sendo usados para criar distribuições que representem as cargas dos eixos e as variações a elas associadas, visando esboçar os dados de tráfego de maneira mais fiel ao existente em campo.

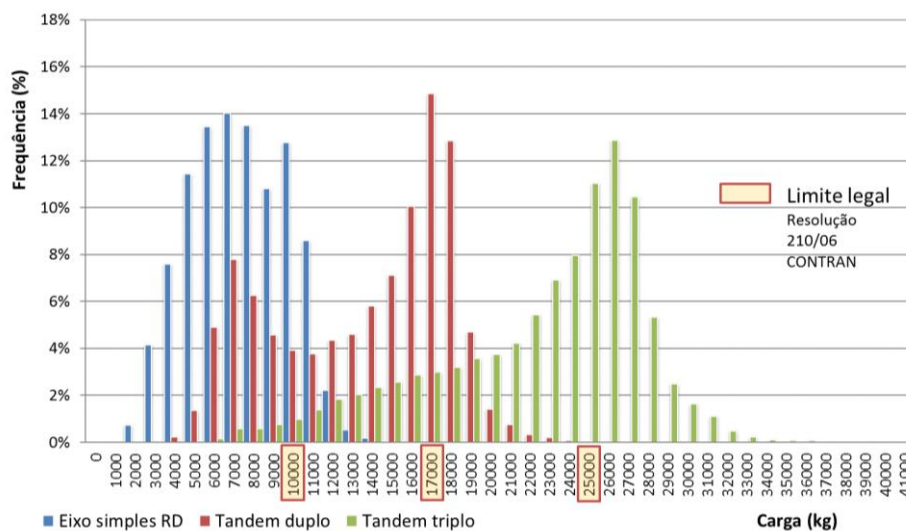


Figura 3.1: Espectro de carga – BR-101/SC (Araranguá) – novembro/2011
Fonte: Otto (2018)

Após tomar conhecimento quanto ao comportamento à fadiga dos materiais e à temperatura, e aplicando cálculo numérico entre a carga e a deformação de tração, a partir do uso de ferramenta computacional, Otto (2018) e Otto *et al.* (2019) correlacionaram a deformação de tração com o valor da carga sobre o pavimento. Tendo em vista a Figura 3.2, os autores concluíram que a

sobrecarga tem efeito significativo na redução da vida útil do pavimento, podendo atingir uma redução de 57%, com o aumento de 20% de carga por eixo.

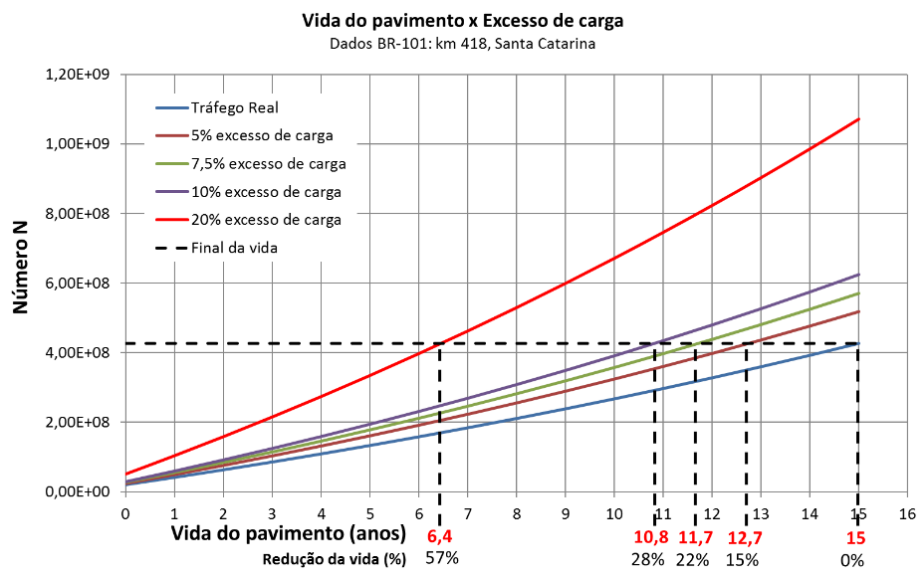


Figura 3.2: Vida útil do pavimento versus sobrecarga
Fonte: Otto (2018)

De acordo com Martins & Serravalle (2007), a deterioração prematura então produzida culmina na necessidade de ações de manutenção e restauração muito antes dos prazos previstos em projeto. De modo geral, os autores ainda listam como impactos do excesso de carga a deterioração de toda a estrutura de pavimento, com danos irreparáveis, mesmo com a realização de manutenção, e o aumento do número de acidentes. Segundo Fekpe *et al.* (1995), as empresas que trafegam com excesso de carga, além de estarem competindo de forma injusta com aqueles que cumprem as leis, não reembolsam o público, em geral, quanto aos prejuízos decorrentes da redução da vida útil de um pavimento.

De acordo com o CSIR (1997), cerca de 60% dos danos na rede rodoviária da África do Sul foram causados por veículos com sobrecarga, o que representou aos contribuintes, à época, um custo de 96 milhões de reais por ano, não tendo sido inclusos, nos custos totais do país, os acidentes causados, direta ou indiretamente, por veículos com sobrecarga. Wermeskerken (2005), tendo como base as pesquisas conduzidas nos Países Baixos, em 1997 e em 2001, verificou que, anualmente, à época, eram tidos como custos totais cerca de 41 a 97 milhões de reais, em decorrência da atuação de veículos com sobrecarga. Os custos totais dos Países Baixos englobaram reparos e manutenções em rodovias nacionais e secundárias e reparos relacionados a custos sociais derivados de congestionamentos. Com relação ao Brasil, conforme apontado

por Otto (2018b), os custos de manutenção atingem R\$ 72.620,44, por quilômetro de rodovia, por ano, em condições normais. Entretanto, com o acréscimo de 34% e 53% de sobrecarga, os referidos custos de manutenção são elevados, respectivamente, em cerca de 19% e 38%.

Verifica-se que a sobrecarga leva à deterioração precoce das estruturas de pavimentos, impactando diretamente na redução de seu desempenho estrutural e, por consequência, na redução dos desempenhos funcional e relativo à segurança. Nesse sentido, os cidadãos, além de serem onerados pelos custos operacionais dos veículos, em decorrência das despesas adicionais com combustíveis e com a realização de manutenções e reparos em geral, conforme apontado por Islam & Buttlar (2012), também acabam absorvendo, através do pagamento de taxas e impostos, os custos adicionais necessários à manutenção e restauração das estruturas de pavimentos, a fim de que sejam restabelecidos desempenhos adequados e satisfatórios. Dessa forma, tomando como ponto de partida a relação direta entre o desempenho funcional de pavimentos e a segurança dos indivíduos, apresenta-se, na seção seguinte, abordagem relativa aos impactos econômicos decorrentes do comprometimento da segurança viária, com foco na ocorrência de acidentes de trânsito.

3.1.2 Comprometimento da Segurança Viária

As mortes por acidentes de trânsito, em 2016, se figuraram entre as dez principais causas globais, atingindo a oitava posição no *ranking* e mudando o cenário mundial, de maneira negativa, desde o último levantamento, então realizado no ano 2000. Nas Américas, as mortes no trânsito se caracterizam como a segunda principal causa (20%) entre jovens, ficando atrás apenas das mortes por homicídios (24%). Das 56,9 milhões de mortes que ocorreram em todo o mundo, no ano de 2016, mais da metade, ou seja, 54% delas estava relacionada às dez principais causas. As mortes por acidentes de trânsito, por sua vez, corresponderam a um total de cerca de 1,4 milhões de pessoas, do qual aproximadamente três quartos (74%) foram homens e meninos. Ainda, entre 20 e 50 milhões de pessoas sofreram lesões não fatais, muitas delas resultando em incapacidades (WHO, 2018; OPAS, 2018; OPAS 2019).

De acordo com OPAS (2019), 93% dos acidentes de trânsito ocorreram em países de baixa e média renda, custando à maioria deles 3% de seu Produto Interno Bruto (PIB). Os acidentes de trânsito provocam, portanto, perdas econômicas consideráveis não somente aos indivíduos e suas famílias, mas também aos países como um todo, sendo tais perdas decorrentes dos custos com tratamento, incluindo reabilitação e investigação do acidente, bem como da redução ou

perda de produtividade (OPAS, 2019).

A fim de ilustrar o exposto, aponta-se que, no período correspondente ao início de 1998 até o final do ano de 2017 (20 anos de CTB), os acidentes de trânsito custaram ao Brasil, por ano, 36 bilhões de reais, ou seja, 720 bilhões acumulados, representando 12% do PIB de 2015 de todo o Brasil. Tal montante poderia ter sido revertido na construção de pelo menos 22 mil novos hospitais, com 250 leitos, UTIs e unidades de traumatismos graves, 570 mil novas escolas, 185 mil quilômetros de novas rodovias e 60 mil quilômetros de novas ferrovias, assim como no dobro de investimentos em segurança pública e na cobertura de cinco anos da previdência social (ONSV, 2017).

Ainda tomando como base o cenário brasileiro, apesar de os dados estatísticos não demonstrarem com confiabilidade o número de pessoas que apresentam sequelas permanentes decorrentes de acidentes de trânsito, estimativas apontam que elas correspondam de oito a dez para cada vítima fatal registrada. Nesse sentido, sequelas permanentes, além do drama pessoal e da completa mudança da rotina das famílias, acabam acarretando gastos à previdência e ao sistema público de saúde e sendo, também, uma das principais causas de afastamentos dos empregos (ONSV, 2017).

Diante desse panorama, Wermeskerken (2005) menciona que veículos com sobrecarga, ou quando carregados erroneamente, reduzem a capacidade de seu manuseio e, associados aos defeitos nos pavimentos, podem impactar em condições perigosas de dirigibilidade e de manobrabilidade. De modo geral, veículos com sobrecarga levam a situações de menor controle, em decorrência dos danos gerados às suspensões e a demais partes dos veículos, principalmente quando estes não são submetidos a manutenções/revisões periódicas, reduzindo as chances de se evitar uma colisão e, portanto, de ocorrer um acidente.

A CNT (2019b), em relatório relativo a acidentes rodoviários, que teve como referência dados extraídos da Polícia Rodoviária Federal (PRF) e da Pesquisa CNT de Rodovias de 2018, apresentou estatísticas envolvendo veículos de carga. Segundo a Confederação, várias são as causas apontadas como as responsáveis pelos acidentes com tais veículos, a saber pela distância percorrida, cumprimento de prazos, dificuldades de planejamento, falta de descanso, excesso de confiança, excesso de carga, manutenção do veículo, imprudência, deficiências na formação, falta de atenção, mal súbito, sono, problemas de saúde do condutor e infraestrutura precária.

No que se refere ao excesso de carga, a CNT (2019b) aponta que esta pode elevar o risco de envolvimento em um acidente, uma vez que dificulta a frenagem e a mudança de direção, além também de elevar a possibilidade de tombamento. Com relação à infraestrutura, a CNT (2019b) aponta que o aumento do risco de se envolver em um acidente pode estar associado à precariedade dos pavimentos, além de problemas relacionados à geometria e à sinalização das vias, obrigando os motoristas a trafegarem, muitas das vezes, em constante alteração de sua trajetória (zigue-zague), na tentativa de desviar de defeitos, e realizando frenagens bruscas, o que possibilita o aumento de ocorrência de colisões frontais e traseiras.

Tendo como base as rodovias federais brasileiras, no período de 2007 a 2018, foram registrados um total de 1.721.609 acidentes. Relativamente a este total, 756.732 se referiram a acidentes com vítimas, 88.749 corresponderam ao número de mortes e 1.116.612 ao número de feridos. Ainda, ressalta-se que 570.029 acidentes tiveram envolvimento de pelo menos um veículo de carga, o que representa 33,1% de todos os acidentes ocorridos no período de referência (1.721.609). Destaca-se terem sido registrados, também, 187.489 acidentes com vítimas, envolvendo pelo menos um veículo de carga, o que representa, portanto, 24,8% de todos os acidentes com vítimas registrados (756.732) (CNT, 2019b).

O transporte de sobrecarga, tendo como base o exposto, aliado às condições de trafegabilidade, seja com relação às questões operacionais dos próprios veículos, seja no tocante à adequabilidade das infraestruturas, geram impactos enormes aos indivíduos de uma sociedade, sendo as perdas, muitas das vezes, imensuráveis. Entretanto, além da própria sobrecarga e da condição da infraestrutura, muitos são os fatores que podem ser atribuídos como responsáveis pela ocorrência de acidentes de trânsito envolvendo veículos comerciais pesados. Tais demais fatores, os quais foram discriminados nesta seção, não são abordados em detalhes nesta dissertação, uma vez englobarem diversos aspectos, envolvendo, inclusive, questões legais, educacionais e comportamentais, que, apesar de merecerem ser analisados e tratados de maneira específica e profunda, fogem do escopo da presente pesquisa. Nesse contexto, na seção seguinte, é realizada abordagem a respeito do impacto da sobrecarga, como resultado da concorrência desleal motivada no transporte rodoviário de cargas.

3.1.3 Competitividade Desleal no Transporte Rodoviário de Cargas

Antes de iniciar abordagem a respeito da prática do transporte de sobrecarga, como fator resultante e motivador à competitividade injusta e inadequada no transporte rodoviário de cargas, parte-se para um breve entendimento quanto à atuação de transportadores no mercado brasileiro, bem como quanto à formação e prática dos preços dos fretes. Fretes inferiores aos referenciais, os quais, por sua vez, possibilitam garantir a prestação de serviços de transporte em níveis adequados e satisfatórios, acabam acarretando práticas que visam compensar os preços não remunerados, além de auferir vantagens indevidas. Nesse sentido, o transporte de sobrecarga se configura como uma das práticas compensatórias, conforme se faz exposto na presente seção.

No mercado brasileiro atuam os denominados Transportadores Rodoviários de Carga Própria (TCPs), em que o transporte é não remunerado, sendo realizado por pessoa física ou jurídica, com veículos de sua propriedade ou posse, e que se aplica exclusivamente para cargas de consumo próprio ou para a distribuição dos produtos por ela produzidos ou comercializados. Atuam também os denominados Transportadores Rodoviários Remunerados de Cargas (TRRCs), os quais são pessoas físicas ou jurídicas, que têm como objetivo prestar serviço de transporte a terceiros, mediante remuneração, ou seja, sendo o transporte rodoviário realizado de maneira comercial e, portanto, caracterizado pelo pagamento de frete, e sendo o veículo categorizado como de aluguel. Relativamente aos TRRCs, atualmente, existe a participação de cerca de 156 mil Empresas de Transporte Rodoviário de Cargas (ETCs), 554 mil Transportadores Autônomos de Cargas (TACs) e 350 Cooperativas de Transporte de Cargas (CTCs) (ANTT, 2020a; ANTT, 2020b).

De acordo com Chahad & Cacciamali (2005) e Valente *et al.* (2008), as ETCs buscam reduzir investimentos com a terceirização, a partir de parcerias estabelecidas com TACs. Nesse sentido, como a propriedade do veículo (caminhão) deixa de ser de responsabilidade da empresa, a terceirização representa uma forma de capitalização mais flexível. Os investimentos em manutenção e, também, em demais custos de operação, que previamente eram de responsabilidade das empresas transportadoras, são transferidos, portanto, para os transportadores autônomos.

O modo de transporte rodoviário de carga se volta essencialmente para o transporte de produtos industrializados, de alto a médio valor agregado, com pequenos volumes e em rotas de pequenas

distâncias. No Brasil, contudo, devido ao baixo valor do frete, acaba sendo utilizado para o transporte de *commodities*, como soja, derivados do petróleo e cimento. Para Caixeta Filho & Martins (2001) e Hijjar (2008), uma série de variáveis influenciam no estabelecimento do preço do frete, a saber pela distância percorrida, especificidade da carga, veículo utilizado, prazo para a entrega, custos operacionais, sazonalidade da demanda, perdas e avarias, características e aspectos das vias, pedágios e a possibilidade de rotas de retorno. A pormenorização de tais variáveis, entretanto, não será realizada no âmbito desta dissertação.

De acordo com Souza & Rocha (2010), existem diferentes métodos para o cálculo do frete de transporte, os quais podem ser baseados na concorrência, na demanda ou nos custos. No método fundado na concorrência, as empresas estabelecem o valor do frete a partir de levantamento dos preços de mercado dos concorrentes. O método com foco na demanda, por sua vez, considera o valor que o consumidor (demandante) está disposto a pagar pelo serviço. Já no método dos custos, é estabelecida uma margem sobre os custos esperados, que são obtidos a partir de metodologias contábeis. Tendo como base o método dos custos (cálculo do custeio do frete), Araújo *et al.* (2014) analisaram diferentes metodologias para o cálculo do frete rodoviário de carga, tendo identificado que aquela desenvolvida pela Associação Nacional de Transporte de Carga (NTC) e pela Fundação Instituto de Pesquisa Econômica (FIPE), em 1990, é a que apresenta a maior quantidade de variáveis de análise, conforme pode ser observado em consulta ao Anexo I desta dissertação.

No Brasil, entretanto, um cenário caracterizado por poucas exigências para a operação e baixa fiscalização leva à redução da qualidade dos serviços prestados e, por consequência, do frete praticado no mercado de transporte rodoviário de cargas. Devido à ausência de um mecanismo de controle governamental, permite-se que os preços dos fretes sejam formados a partir da negociação direta entre o ofertante e o demandante do serviço. Nesse sentido, o excesso de oferta aliado à falta de regulação adequada implica na redução do preço do transporte rodoviário no país (SOARES & CAIXETA FILHO, 1997; HIJJAR, 2008).

Ao analisar os preços dos fretes praticados no Brasil, Hijjar (2008) constatou que, no caso do transporte de carga seca realizado por meio de veículo do tipo “*truck*” e por carreta graneleira, o preço médio pago pelo frete é mais baixo do que as tarifas referenciais teóricas calculadas, então baseadas em métodos de cálculo, que visam refletir a realidade. Tal situação traduz um perfil de transporte em que, geralmente, é apresentada uma forte presença de transportadores

autônomos, principalmente na movimentação de cargas em distâncias maiores. Ainda segundo Hijjar (2008), o preço do frete abaixo da tarifa referencial reflete que a margem do transportador está reduzida e/ou que nem todos os custos do transporte estão sendo remunerados de forma adequada, o que impacta na redução da qualidade do serviço de transporte.

Araújo *et al.* (2014), por sua vez, em cuja pesquisa foi proposto método de cálculo dos custos envolvidos na operação de transporte, tendo adotado o eixo São Paulo – Rio de Janeiro como objeto de estudo, determinaram o valor do frete que seria suficiente para remunerar os gastos percebidos pelo transportador autônomo e pelas empresas transportadoras, bem como realizaram comparações entre os fretes reais cobrados e os valores que deveriam ser adotados de fato. Nesse sentido, em consonância com o exposto por Hijjar (2008), os autores apontaram que os preços praticados não passam por nenhum controle governamental, o que, apesar de a abertura para a livre negociação e concorrência, acaba permitindo uma imposição de valores preestabelecidos pelos contratantes desse serviço. Esses valores praticados, os quais geralmente são obtidos em pesquisa junto aos concorrentes, nem sempre remuneram adequadamente os custos inerentes à operação.

Existe, portanto, uma distorção entre os valores de frete adotados por ETCs e os valores referenciais ideais, o que indica que o preço do frete cobrado se encontra defasado. Entretanto, a maior distorção observada foi com relação aos transportadores autônomos (TACs), tendo sido identificada significativa diferença entre os valores praticados e aqueles calculados como referenciais ideais, ou seja, na situação de o transportador autônomo tentar arcar com todos os custos operacionais e de gerenciamento de maneira correta. Nesse sentido, a partir da comparação realizada para o cenário comercial dos TACs, que se define pelas poucas barreiras de entrada no mercado, pelo excesso de oferta de tais prestadores de serviço e pela concorrência predatória, concluiu-se não ser possível aos transportadores autônomos arcar com todos os custos operacionais e de gerenciamento, o que faz com que tenham que se submeter às distorções relacionadas à profissão, a saber pela grande jornada de trabalho, dificuldade na renovação de veículos, negligenciamento das manutenções dos veículos, e pela prática do excesso de carga (ARAÚJO *et al.*, 2014).

Especificamente com relação ao excesso de carga, tal prática acaba criando uma vantagem ilegal e injusta para alguns operadores, permitindo que pratiquem preços menores para uma mesma jornada de trabalho, acarretando efeitos negativos nos níveis de preço e na qualidade

dos serviços. O fenômeno da competitividade desleal provoca não conformidade em outras áreas do mercado de transporte, uma vez que empresas de “boa fé” não conseguem competir com aquelas que operam ilegalmente com preços inferiores através do sobrecarregamento de veículos. A competitividade desleal, portanto, pode estar relacionada à sobrecarga com relação ao PBT e/ou no tocante à carga por eixo ou grupos de eixos (WERMESKERKEN, 2005).

No que se refere à sobrecarga relativa ao PBT, Wermeskerken (2005) aponta que ela estabelece a mais direta e significativa forma de competitividade desleal. Seu princípio básico está relacionado ao fato de que a empresa que permite que veículos sejam operados com excesso de PBT, para um mesmo tipo de veículo, necessita de menos viagens para transportar a mesma quantidade de carga, o que implica em menor custo com combustível, menor quantidade total de horas de trabalho de um motorista, dentre outros aspectos. Ainda com relação ao excesso de PBT, quando da utilização de veículos diferentes, para um mesmo carregamento, considerando ambos apresentarem excesso de PBT, e mesma quantidade de viagens, veículos menores acabam sendo mais baratos quanto ao valor de construção/aquisição e quanto ao pagamento de eventuais taxas de pedágio. Tais situações provocam competitividade desleal, uma vez que refletem diretamente no valor do frete e no poder de negociação entre operadores de transporte.

Por fim, a sobrecarga relativa aos eixos e/ou grupos de eixos, no geral, não é diretamente considerada uma questão de competitividade desleal. O problema geralmente se origina quando do transporte de cargas fracionadas, para diferentes destinos, mediante o uso de veículos articulados (reboque/ semirreboque). Mesmo dentro dos limites legais de peso, com o descarregamento parcial, devido a não reorganização das cargas remanescentes, é possível que sejam gerados excessos nos eixos e/ou grupos de eixos. Tal problema pode ser ajustado através da adoção de determinadas ações, como a readequação do carregamento que permanece, o que, algumas vezes, não se é permitido devido ao próprio veículo e/ou devido a questões relativas à segurança. Outra ação consiste em se fazer adaptações veiculares especiais ou aquisição de equipamentos que permitam a fácil e segura movimentação das cargas remanescentes, bem como a realização de adaptações logísticas das rotas. Entretanto, tais ações não são comuns, pois demandam tempo e investimentos, o que acaba gerando certa desproporcionalidade competitiva entre aquelas empresas que aceitam se adequar e aquelas que não aceitam (WERMESKERKEN, 2005).

3.2 FISCALIZAÇÃO E A ORGANIZAÇÃO PARA UM TRÂNSITO SEGURO

Tendo como base os impactos necessários de serem coibidos com o desenvolvimento da fiscalização de veículos comerciais pesados, parte-se para o entendimento quanto aos atos de fiscalização propriamente ditos. Segundo Lee (1982) e Rozestraten (1988), a atividade de fiscalização faz parte de um conjunto formado por três ações indispensáveis à obtenção de um trânsito seguro e organizado, a saber pelo denominado 3E, ou seja, Engenharia, Educação e Policiamento, ou do inglês, respectivamente, *Engineering*, *Education* e *Enforcement*. O “Policiamento”, ou *Enforcement*, é designado por Ferraz *et al.* (2012), como “Esforço Legal”. Este, por sua vez, de acordo com Lee (1982) e Ferraz *et al.* (2012), tem como finalidade a organização do sistema de trânsito, visando à segurança, fluidez e comodidade na movimentação de veículos e pedestres, à preservação do meio ambiente, e à convivência pacífica dos cidadãos, englobando a legislação e a gestão legal (administração, fiscalização e punição).

Nesses termos, considerando a abrangência das ações que englobam o esforço legal, dentre as quais ressaltam-se os atos de fiscalização e a conseqüente punição, conforme o exposto por Davey & Freeman (2011), as contramedidas adotadas com o objetivo de que os cidadãos se comportem de modo seguro, têm como subsídio a Teoria da Dissuasão. Tal Teoria, que tem sua origem em Thomas Hobbes (1588-1678), Cesare Beccaria (1738-1794), e Jeremy Bentham (1748-1832), propõe que as pessoas tendem a evitar comportamentos agressivos ou infratores ao temerem as conseqüências de seus atos. Tal Teoria, de acordo com Davey & Freeman (2011), possui três pilares, então definidos como a certeza, a severidade e a celeridade da punição. Para os autores, o cometimento de uma infração se relaciona, de modo inverso, com os mencionados pilares, ou seja, a probabilidade de cometimento de uma infração se reduz com a percepção da certeza, do grau de severidade e da rapidez da punição.

No presente contexto, que se relaciona com o aumento dos atos de fiscalização por meio do uso de sistemas de pesagem em alta velocidade e com a conseqüente implementação da fiscalização direta, a certeza da punição é caracterizada pelos autores como aquela que mais impacta no comportamento ofensivo, produzindo efeitos dissuasivos, e sendo ela referente à probabilidade percebida pelo infrator de ser punido por determinada transgressão. Ou seja, para que o “medo da punição” seja eficaz, os indivíduos devem acreditar que a probabilidade de punição por violar uma lei é relativamente alta, abstendo-se de transgredir as leis no futuro.

No Brasil, conforme CTB (1997), a competência para fiscalizar, autuar e aplicar as medidas administrativas cabíveis, então relativas ao excesso de carga transportado, recaem sobre os órgãos e entidades executivos rodoviários da União, dos Estados, dos Municípios e do Distrito Federal, no âmbito de suas esferas territoriais e administrativas, tendo em vista o exposto no Artigo 21 do CTB, bem como dos órgãos e entidades executivos de trânsito Municipais, nas mesmas condições, de acordo com o Artigo 24 do CTB. Tais órgãos e entidades, que têm como dever a manutenção do trânsito em condições seguras, compõem o denominado Sistema Nacional de Trânsito (SNT), cuja estrutura é apresentada no Quadro 3.1, em que se fazem explícitos os Artigos, do CTB, que definem as respectivas competências.

Quadro 3.1: Composição do SNT – Art. 7º do CTB

Nível	Órgãos normativos, consultivos e coordenadores e judicantes	Órgãos e entidades executivos		Órgãos e entidades fiscalizadores	Julgamento de Recursos	
		Trânsito	Rodoviário		1ª Instância	2ª Instância
Federal	CONTRAN (CTB, Art. 12)	DENATRAN (CTB, Art. 19)	DNIT e ANTT (CTB, Art. 21)	DNIT, ANTT e PRF	JARI (CTB, Art. 17)	Órgão especial da JARI CONTRAN
Estadual	CETTRAN/ CONTRANDIFE (CTB, Art. 14)	DETRANs (CTB, Art. 22)	DERs (CTB, Art. 21)	PM (Agentes de Trânsito) (CTB, Art. 23), DETRANs e DERs (mediante convênio)	JARI (CTB, Art. 17)	CETTRAN/ CONTRANDIFE
Municipal	-	Órgãos Municipais de Trânsito (CTB, Art. 24)	Órgãos Municipais Rodoviários (CTB, Art. 21)	PM (mediante convênio) e/ou Agente de Trânsito Municipal ou Guardas Municipais (desde que credenciadas)	JARI (CTB, Art. 17)	CETTRAN/ CONTRANDIFE

Fonte: Adaptado de Ferraz *et al.* (2012), Andrade Filho (2016) e Pellizzon (2017)

Do exposto, levando em consideração o cenário brasileiro, apresenta-se estudo, a fim de ilustrar a capacidade de influência da adoção da fiscalização no combate da prática de sobrecarregar veículos comerciais pesados. Tendo como base os dados de peso de veículos de carga e de passageiros coletados no âmbito do Programa Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT), de gestão do atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), no período de julho de 2014 ao final do ano de 2015, em que houve um cenário desfavorável, então marcado pela ausência de fiscalização dos excessos de cargas transportados no Brasil, foi observado que, em média, 34% dos veículos trafegavam com sobrecarga, implicando em um aumento de 19% dos custos de manutenção, por quilômetro, por ano. Tal média de veículos levou em consideração seis Estados (Bahia, Minas Gerais, Mato Grosso, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo), dos quais a Bahia, São Paulo e Minas Gerais foram os que apresentaram

maior percentagem de veículos com sobrecarga, a saber, respectivamente, por 53%, 49% e 37% (OTTO, 2018b).

Do exposto, diante da importância dos atos de fiscalização como forma de se manter o trânsito em condições seguras, bem como de se coibir não somente o sobrecarregamento de veículos, mas também, sobretudo, os efeitos decorrentes de tal prática; é possível que seja levantado questionamento a respeito da estrutura de leis e normativos que regem e regulamentam a atuação dos órgãos e entidades do SNT quanto ao combate do excesso de carga transportado. Nesse sentido, levando-se em consideração o cenário brasileiro, apresenta-se, na seção seguinte, os principais elementos da legislação e de regulamentações, sendo esses abordados com foco no uso de instrumentos e tecnologias destinadas à pesagem e à consequente fiscalização de veículos comerciais pesados.

3.2.1 Legislação Brasileira e o Uso de Instrumentos e Tecnologias para Pesagem

Tendo em vista a Constituição da República Federativa do Brasil, de 1988, ou simplesmente CF/1988, e suas normas infraconstitucionais, destaca-se dentre elas a Lei nº 9.503/1997, que instituiu o CTB. Assim, com base no CTB (1997), bem como na composição do SNT, as regulamentações de pontos específicos do Código de Trânsito ocorrem a partir das resoluções e deliberações publicadas pelo CONTRAN, e das portarias publicadas pelo DENATRAN e pelo INMETRO. Nesse sentido, nas Figuras 3.3 e 3.4, são apresentados esquemáticos contendo parte do principal histórico relacionado à pesagem e à fiscalização de veículos comerciais pesados. As referidas Figuras serão comentadas sucessivamente.

No que se refere à Figura 3.3, na qual são apresentadas as regulamentações que balizam o desenvolvimento das atividades de fiscalização, verifica-se que, anteriormente à promulgação da lei que instituiu o CTB, a partir da Lei nº 7.408/1985 (BRASIL, 1985) já se permitiu a adoção de tolerância, quando da pesagem de veículos de transporte de carga e de passageiros, tendo sido estabelecida a tolerância máxima de 5% sobre os limites de PBT e de peso bruto transmitido, por eixo, à superfície de vias públicas.

Entretanto, somente após instituição do CTB (1997), no qual a matéria relativa à fiscalização de veículos comerciais pesados é abordada nos Artigos 99, 100, 209, 210, 231, 248, 256, 257, 258, 259, 275, 278, 280 e 323, o CONTRAN (1999) apresentou resolução dispondo sobre a tolerância máxima sobre o limite de PBT, a partir da qual, posteriormente, após sucessivas

alterações quanto às tolerâncias máximas, passou a vigorar a Resolução nº 258/2007, em que o CONTRAN (2007) regulamentou os Artigos 231 e 323 do CTB, bem como fixou metodologia de aferição de peso de veículos e estabeleceu novos percentuais de tolerâncias.

Sequencialmente, tendo em vista a Lei nº 13.103/2015 (BRASIL, 2015), o CONTRAN (2015a) publicou a Resolução nº 526/2015, a partir da qual novamente alterou as tolerâncias máximas permitidas sobre os limites de PBT/PBTC e de peso por eixo, quando do uso de instrumentos de pesagem. Estabeleceu-se, por fim, a partir da referida resolução, a tolerância de 5% sobre os limites de PBT e PBTC, e de 10% sobre os limites de peso por eixo, as quais foram mantidas com a publicação da Resolução CONTRAN nº 803/2020, por CONTRAN (2020). Todas as alterações se fundamentaram, principalmente, na necessidade de se suprir as incertezas ou erros decorrentes dos próprios instrumentos de pesagem.

Complementarmente ao CONTRAN (2007), o CONTRAN (2013), a partir da Resolução nº 459/2013, passou a regulamentar o uso de sistemas automatizados integrados para aferição de pesos e dimensões de veículos, com dispensa da presença física de agentes de trânsito no local de desenvolvimento das operações de pesagem. Ainda, em aperfeiçoamento aos procedimentos de lavratura de Autos de Infrações de Trânsito (AITs) e de expedição das notificações de autuação, de penalidade de multa e de advertências, o CONTRAN (2015b) publicou a Resolução nº 547/2015, dispondo sobre a padronização dos procedimentos administrativos para identificação do infrator responsável pela infração por excesso de cargas e dimensões. Do exposto, um compilado das principais resoluções consta apresentado na Figura 3.3.

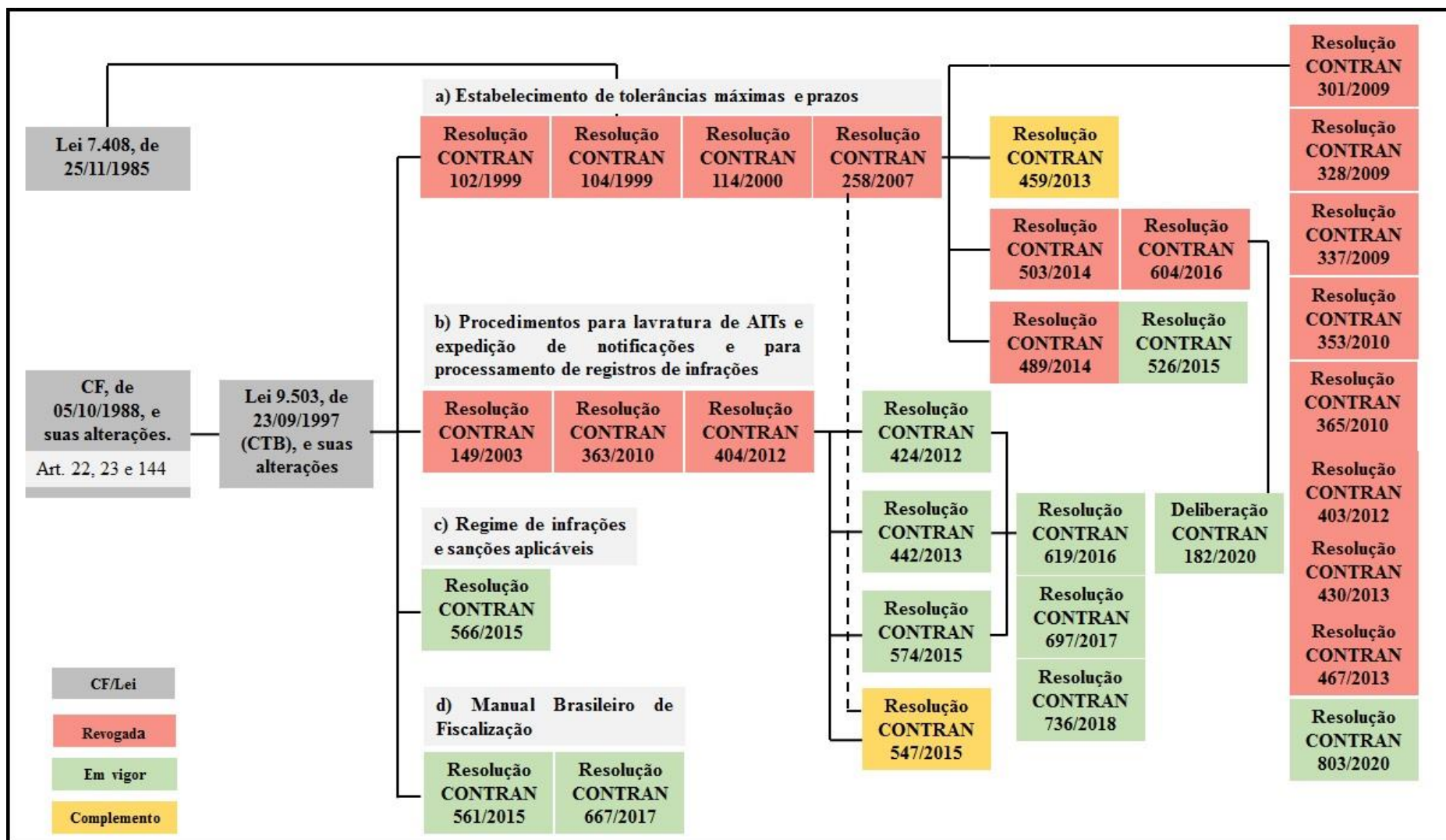


Figura 3.3: Leis e regulamentações referentes à fiscalização de veículos comerciais pesados quanto à sobrecarga transportada, mediante uso de instrumentos de pesagem

Na Figura 3.4, por sua vez, é apresentado a respeito da metrologia legal, então relacionada ao uso de instrumentos/tecnologias voltadas à pesagem de veículos comerciais pesados. Nesse sentido, menciona-se que a Lei nº 5.966/1973 (BRASIL, 1973), de 11 de dezembro de 1973, alterada pela Lei nº 9.933/1999 (BRASIL, 1999), de 20 de dezembro de 1999, e, posteriormente, pela Lei nº 12.545/2011 (BRASIL, 2011), de 14 de dezembro de 2011, instituiu o Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (SINMETRO), o qual se faz constituído, conjuntamente, pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO) e pelo INMETRO, tendo sido as competências deste último estabelecidas, por CONMETRO (1988), no âmbito da Resolução nº 11/1988.

A partir da criação do INMETRO, foi publicada por INMETRO (1994) a Portaria nº 236/1994, que primeiramente aprovou o Regulamento Técnico Metrológico (RTM), estabelecendo as condições que deveriam ser observadas quando da fabricação, instalação e utilização de instrumentos de pesagem não automáticos. Com a publicação da Recomendação Internacional OIML R-134-1, por OIML (2008), a qual se voltou à exposição de instrumentos automáticos para a pesagem de veículos comerciais pesados em movimento e aferição das cargas por eixo, o INMETRO (2013) publicou a Portaria nº 375/2013. Por meio desta Portaria foi aprovado o RTM estabelecendo, além de requisitos de *software*, requisitos construtivos, técnicos e metrológicos, bem como de controle metrológico legal aplicado aos instrumentos de pesagem automáticos em movimento, então utilizados para a determinação da massa dos veículos (PBT/PBTC) e das cargas por eixo ou grupos de eixos.

Posteriormente, INMETRO (2016) publicou a Portaria nº 47/2016, a partir da qual, dentre outras ações, passou a vigorar, principalmente, novos valores de Erros Máximos Admissíveis (EMAs) para as fases de aprovação de modelo e verificações inicial, subsequentes e de inspeções em serviço dos equipamentos de pesagem em movimento. Tais novos EMAs são considerados mais brandos, apesar de ainda muito rigorosos. Seu estabelecimento se fundou no pleito do setor produtivo, devido à alegação de impossibilidade de atendimento dos EMAs estabelecidos pela Portaria nº 375/2013, o que impediria a comercialização dos instrumentos de medição, bem como sob a justificativa de carência de instrumentos de pesagem automáticos de veículos no mercado consumerista, o que poderia prejudicar a fiscalização do excesso de carga. Na Figura 3.4, consta histórico relacionado à metrologia legal.

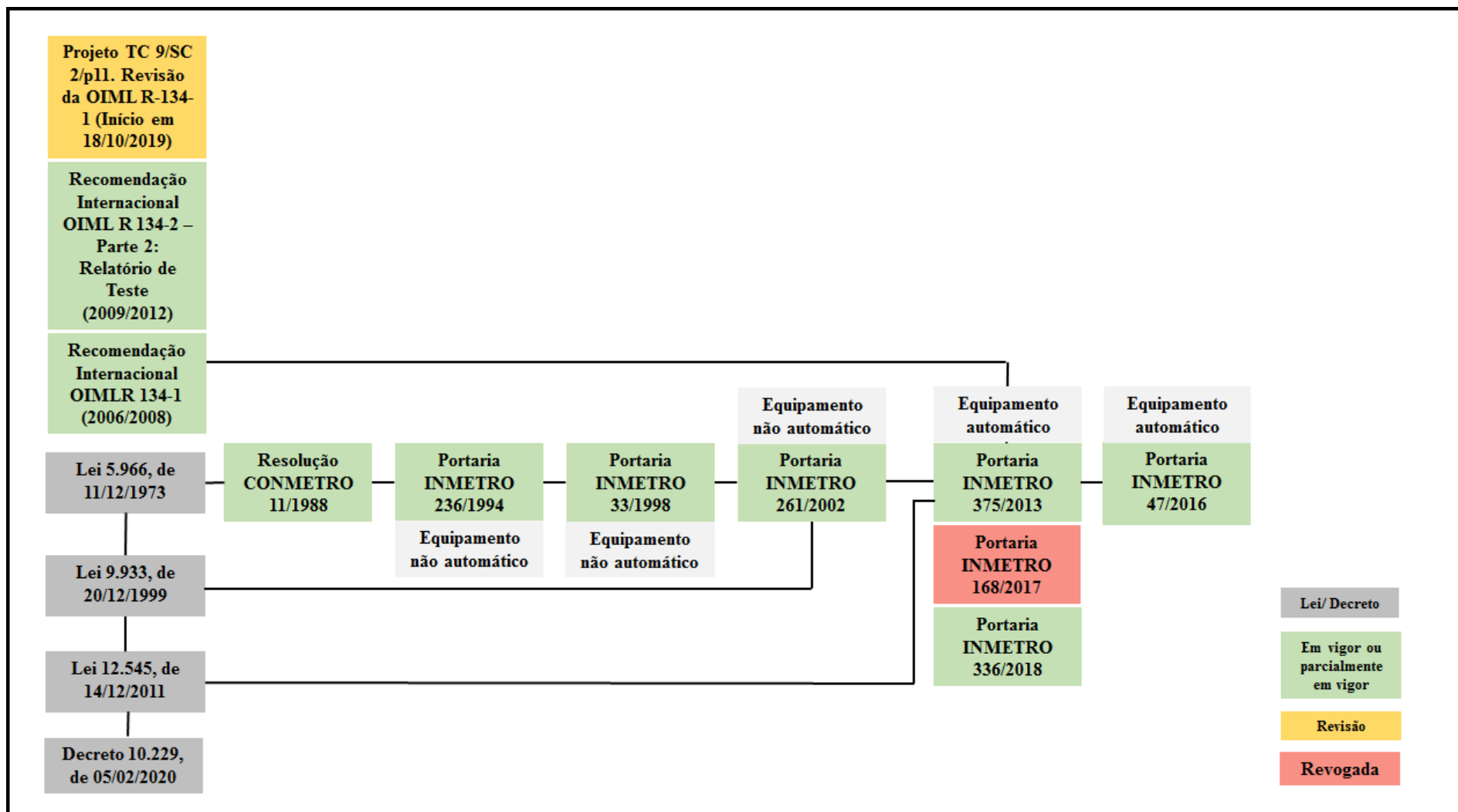


Figura 3.4: Leis e regulamentações referentes à metrologia de instrumentos de pesagem automáticos e não automáticos

Ainda com relação à Figura 3.4, menciona-se que os EMAs estabelecidos por meio da Portaria nº 47/2016, no que se refere ao percentual de massa do veículo (PBT/PBTC) correspondem a 2,5%, para aprovação de modelos de equipamentos e para verificações inicial e subsequentes, e a 3%, para inspeções em serviço. Já quanto ao valor verdadeiro da carga estática de referência por eixo isolado, os EMAs são iguais a 4%, quando da aprovação de modelo de equipamentos e verificações inicial e subsequentes, e iguais a 5%, quando da realização de inspeções em serviço.

Ressalta-se, também, que, em outubro de 2019, a OIML (2019), por meio do projeto denominado como TC 9/SC 2/p11, deu início à revisão da Recomendação Internacional OIML R-134-1. Nesse contexto, no âmbito da legislação brasileira, por meio do Decreto nº 10.229, de 05 de fevereiro de 2020, tendo como base o direito de liberdade econômica, Brasil (2020) regulamentou o direito de desenvolver, executar, operar ou comercializar produto ou serviço em desacordo com norma técnica desatualizada, tendo permitido que, quando identificada norma interna desatualizada frente à norma que tem sido utilizada internacionalmente, bem como, quando analisada a conveniência e oportunidade de adoção da norma internacional, em detrimento à norma interna, poderá ser empregada a norma internacional. As recomendações provenientes da OIML, portanto, são apontadas no referido Decreto como aceitas de serem utilizadas no Brasil, em detrimento aos próprios Regulamentos Técnicos publicados pelo INMETRO, respeitados os devidos procedimentos para adoção da norma internacional.

Do exposto, verifica-se existir no Brasil uma robusta estrutura de instituições, normativos e regulamentações relacionadas à fiscalização de veículos comerciais pesados, que visam, no âmbito do esforço legal, à manutenção de um trânsito seguro e organizado. Entretanto, especificamente com relação ao uso dos instrumentos de pesagem em movimento, observa-se existir um descompasso entre as tolerâncias máximas previstas pelo CONTRAN e os EMAs estabelecidos pelo INMETRO.

Os EMAs definidos pelo INMETRO, como extraído da própria construção das Portarias nº 375/2013 e nº 47/2016, são considerados muito pequenos, especialmente em se cogitando adotá-los para fins de avaliação de sistemas de pesagem em alta velocidade, impactando diretamente na capacidade de desenvolvimento do setor produtivo de instrumentos de pesagem em movimento e, por conseguinte, na capacidade de aumento e desenvolvimento das atividades de fiscalização contra os excessos de carga transportados. Nesse contexto, na seção seguinte,

considerando os normativos que regem e permitem o uso de instrumentos de pesagem, parte-se para exposição quanto aos modelos de fiscalização.

3.2.2 Modelos de Fiscalização

Tendo em vista os pilares indispensáveis à manutenção de um trânsito seguro e organizado, em que os atos de fiscalização apresentam caráter educativo e dissuasivo, na esfera do esforço legal, englobando as punições ou aplicações de penalidades de multa como uma das formas de se coibir o cometimento de infrações, apresentam-se nesta seção três cenários de fiscalização. São contemplados os modelos de fiscalização com seleção manual, de fiscalização com pré-seleção de veículos e de fiscalização direta, não sendo conferido destaque às tecnologias passíveis de serem utilizadas, uma vez que elas serão abordadas no Capítulo 4 desta dissertação. As descrições dos referidos modelos constam apresentadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2: Modelos de fiscalização

Modelo	Definição	Descrição
1	Fiscalização com seleção manual	Procedida por um agente credenciado, com base em sua experiência e habilidade, a partir da visualização das características externas de um veículo. O veículo selecionado é direcionado a uma área específica, destinada à pesagem estática ou em baixa velocidade, contando com equipe de campo para a realização dos procedimentos de pesagem e, podendo contar com infraestrutura robusta de suporte. Os agentes limitam o número de veículos a serem verificados.
2	Fiscalização com pré-seleção	Ocorre por meio sistemas de pesagem em movimento (alta ou baixa velocidade), em que a carga por eixo e as medidas de massa são utilizadas para determinar a potencialidade de um veículo estar com sobrecarga. Havendo indício de sobrecarga, o veículo é direcionado a uma área específica, destinada à pesagem estática ou em baixa velocidade, para confirmação quanto à potencial irregularidade, podendo a área contar com infraestrutura robusta de pista, pátio de estacionamento e edificações, além de equipe de apoio em campo.
3	Fiscalização direta	Caracteriza-se por estações dotadas com sistemas de pesagem em alta velocidade, automatizados e integrados, então instaladas na própria rodovia, a partir das quais o agente de trânsito ou policial atua de modo remoto, em centros de controle, podendo monitorar mais de uma estação por vez, durante 24 horas. Nesse modelo, todos os veículos são verificados e notificados, quando constatada infração por excesso de carga, dispensando o emprego de infraestruturas suplementares de pista, pátio e edificações, e de equipes de apoio em campo.

Fonte: Adaptado de Wermeskerken (2005) e Rooke (2006)

Em termos de eficiência, então baseada nos custos decorrentes de cada veículo selecionado e verificado, Wermeskerken (2005) e Rooke (2006), dentro das considerações do estudo, realizaram uma comparação entre os três modelos discriminados no Quadro 3.2, estando eles inseridos no mesmo contexto geográfico e contemplando os mesmos tipos de procedimentos de fiscalização. Nesse sentido, os autores verificaram que o “Modelo 1” é o que proporciona o menor número de veículos fiscalizados, por ano, e por número de agentes atuantes, demandando maior tempo para a realização dos procedimentos de pesagem. Ainda, apesar de se caracterizar pelo menor custo de fiscalização, por ano, é o que apresenta, em contrapartida, o maior custo de fiscalização por cada veículo com sobrecarga, por ano. O “Modelo 2” se categoriza em um patamar intermediário, na medida em que suporta uma capacidade de fiscalizar um número de veículos cerca de cinco vezes maior, por ano, que a fiscalização com seleção manual, e também por apresentar um custo de fiscalização por veículo com sobrecarga reduzido em cerca de duas vezes o da fiscalização com seleção manual, apesar de seu custo de fiscalização, por ano, ser maior em aproximadamente três vezes. Já o “Modelo 3”, em que todos os veículos passantes são verificados, consegue apresentar custos de fiscalização por veículo com sobrecarga, por ano, reduzidos em cerca de 97%, se comparados ao “Modelo 1”, e em cerca de 96% com relação ao “Modelo 2”.

Do ponto de vista da eficácia, de acordo com Wermeskerken (2005), sua estimativa, com base nos modelos discriminados, apresenta um ponto crítico com relação à avaliação dos benefícios passíveis de serem atingidos, principalmente devido à limitação de dados disponíveis. Entretanto, segundo o autor, a avaliação do efeito da atividade de fiscalização e, por conseguinte, a determinação do modelo mais adequado, leva em consideração quatro aspectos importantes. O primeiro deles se refere a fatores que vão além da própria fiscalização, mas que podem determinar a conformidade das empresas de transporte frente aos limites legais. Como exemplo, o autor cita situações de recessão econômica, em que a redução das margens de lucro, devido à pressão do setor, pode induzir à prática da sobrecarga de veículos. Outro aspecto está relacionado ao tipo do serviço de transporte, se permanente ou sazonal, sendo a automatização da fiscalização visto como mais eficaz em casos de serviços permanentes. O terceiro aspecto se refere à região geográfica de inserção da estação de fiscalização, cujos efeitos se fazem limitados pela possibilidade de se conseguir evitar a fiscalização ou “fugir” da verificação. O autor cita como exemplo as redes de rodovias densas, com muitas entradas e saídas. O último aspecto se relaciona à motivação que leva ao transporte de veículos com sobrecarga, a qual engloba os grupos de infratores intencionais e não intencionais.

No Brasil, é predominante o tipo de fiscalização definida pelo “Modelo 2”, contemplando sistemas de pesagem em baixa velocidade (de 6 a 12 km/h), como forma de confirmação dos indícios de irregularidades de peso identificadas por meio de uma pré-seleção, então operada a uma velocidade média de até 60 km/h e localizada adjacente às rodovias. Ainda, o modelo predominante no país contempla estruturas de pistas, pátios para estacionamento dos veículos e edificações, além também de equipe de apoio em campo. Tal modelo é traduzido pelos conhecidos e denominados Postos de Pesagem de Veículos (PPVs), que são mantidos e geridos pelo atual DNIT e pela ANTT, no âmbito, respectivamente, das rodovias federais e daquelas concedidas à iniciativa privada (BRASIL, 2013; BRASIL, 2014; ANTT, 2020c).

Com relação às rodovias federais brasileiras, o primeiro PPV a ter entrado em operação, em 1978, se encontra na rodovia BR-277/PR, no Município de Cascavel, no Estado do Paraná. Entretanto, após a formulação do denominado Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem (PDNP), e somente no ano de 2008, 73 PPVs entraram em operação, tendo esta se estendido até julho de 2014, período esse a partir do qual foram encerradas, de modo geral, as operações de pesagem através dos PPVs (BRASIL, 2014). Exemplificação quanto às estruturas de pista, pátio e edificações, pode ser verificada nas Figuras 3.5 e 3.6



Figura 3.5: PPV (km 108 ao 109, BR-163/MT, Município de Rondonópolis
Fonte: Mendes (2020)



Figura 3.6: PPV (BR-101/SC, Município de Araranguá)
Fonte: Otto (2018)

Atualmente, ainda no tocante às rodovias federais, sob a gestão do DNIT se encontra em execução o “Modelo 1” de fiscalização, por meio das denominadas Unidades Móveis Operações (UMOs), podendo essas serem dotadas com sistemas de pesagem estática e em movimento, por eixo. Foi prevista a operação, portanto, de um total de 61 UMOs, então distribuídas entre os todos os Estados brasileiros e o Distrito Federal (DNIT, 2017). Na Figura 3.7, é apresentada a operação de uma UMO dotada com sistema de pesagem estática por eixo, no Estado do Piauí. Já no âmbito das rodovias sob concessão, segundo a ANTT (2020c), existem 49 PPVs que compõem as estruturas dos postos de fiscalização sob competência da Agência Reguladora, sendo que 38 deles se encontram em efetiva operação.



Figura 3.7: UMO – Operação no km 12, da rodovia BR-316/PI
Fonte: DNIT (2019)

De acordo com Doupal & Fucik (2016) e Doupal *et al.* (2016), os procedimentos de medição na aplicação da fiscalização direta são completamente automatizados e similares àqueles relacionados à fiscalização automática de velocidade. Esse tipo de fiscalização pode ocorrer de modo ininterrupto, sendo especialmente adequada para rodovias com alto volume de tráfego. Apesar de os benefícios quanto aos efeitos passíveis de serem obtidos do ponto de vista, única e exclusivamente, da eficiência, o “Modelo 3” de fiscalização, por sua vez, não é adotado no Brasil e na maioria dos demais países. Tal modelo é previsto, entretanto, na legislação da República Tcheca, desde janeiro de 2011, como uma das alternativas à fiscalização de veículos comerciais pesados, não se excluindo o emprego dos tipos de fiscalização previstos conforme os “Modelos 01 e 02”. Nesse sentido, tendo como base as experiências da República Tcheca, o Brasil e diversos países do mundo vêm estudando implementar a fiscalização direta (DOUPAL *et al.*, 2011; DOUPAL *et al.*, 2012; BRASIL, 2014; DOUPAL *et al.*, 2016).

Do exposto, tendo em vista a estrutura de instituições, leis e regulamentações existentes no Brasil, por meio da qual são permitidos e definidos os requisitos de uso de instrumentos e tecnologias voltados à pesagem em movimento, inclusive no que se refere à especificação de tolerâncias legais e erros máximos admissíveis de equipamentos, bem como considerando os modelos de fiscalização mencionados por Wermeskerken (2005) e Rooke (2006), os quais, do ponto de vista da eficiência, podem influir na escolha do mais adequado entre eles; verifica-se que a pesagem em movimento no país, para fins de fiscalização de veículos comerciais pesados, encontra-se limitada aos “Modelos 01 e 02”. Tais modelos se caracterizam por apresentar, em síntese, baixa e mediana eficiências.

Entretanto, o aumento dos atos de fiscalização e da certeza de ocorrência de punições por atos infracionais cometidos, bem como um ganho de eficiência, poderiam ser alcançados com a implementação do “Modelo 03”, em locais estratégicos, de acordo com o que foi apontado por Doupal & Fucik (2016) e Doupal *et al.* (2016). Diante desse panorama, surgem, portanto, questionamentos a respeito dos tipos de pesagem e, por conseguinte, das tecnologias possíveis de serem empregadas para o desenvolvimento, principalmente, da pesagem em movimento em alta velocidade. Surgem questionamentos, também, a respeito dos procedimentos atuais voltados à avaliação de sistemas de pesagem em alta velocidade. Nesse sentido, tais assuntos, que visam sanear os questionamentos levantados, são abordados no Capítulo 4 desta dissertação.

4 PESAGEM EM MOVIMENTO

Existem duas maneiras de se realizar a pesagem de veículos comerciais pesados, a saber pelas denominadas pesagens estática e dinâmica ou em movimento. A pesagem estática, considerada como o método mais tradicional de verificação do peso, consiste na técnica de se pesar veículos, estando estes completamente parados. Podem ser utilizados instrumentos de pesagem conhecidos como: (i) balanças de plataforma (balançôes), para a obtenção do PBT; (ii) balanças de eixo ou de roda, para a obtenção do PBT, a partir da soma dos pesos dos eixos ou das rodas (JACOB & BEAUMELLE, 2010). As balanças de plataforma, por eixo e de roda se encontram ilustradas na Figuras 4.1.

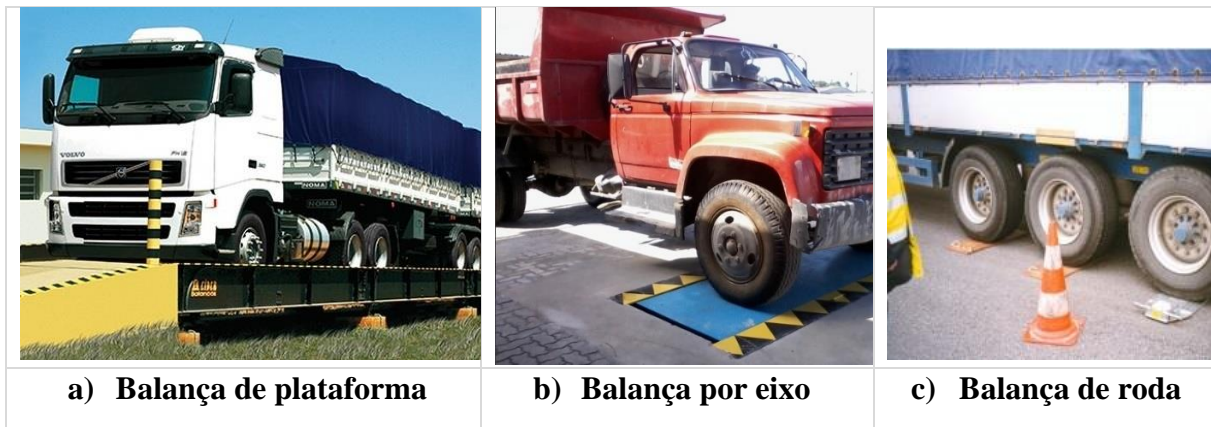


Figura 4.1: Tecnologias para pesagem estática.

Fonte: a) Equilíbrio Balanças e Serviços (2020); b) Bextra Sistemas de Pesagem (2020); c) Jacob & Beaumelle (2010)

A pesagem estática apresenta importante relação com a pesagem em movimento, já que, em muitos casos, as medidas estáticas são utilizadas como valores de referência, quando da realização dos testes e calibração de sistemas de pesagem em movimento. Entretanto, o processo de verificação de veículos por meio do uso de instrumentos de pesagem estática apresenta limitações (JACOB & BEAUMELLE, 2010; DOLCEMASCOLO *et al.*, 2016; LOO & ZNIDARIC, 2019). Nesse sentido, apesar de a importância destacada com relação à pesagem estática, diante de suas deficiências operacionais, em termos de eficiência, tendo em vista os modelos de fiscalização apresentados no Capítulo 3, principalmente em se considerando os cenários de rodovias que apresentam alto volume de tráfego de veículos comerciais pesados, a pesagem dinâmica ou em movimento, de acordo com Zhang *et al.* (2015), se tornou uma alternativa popular.

A pesagem em movimento apresenta dois segmentos, os quais se configuram pelas pesagens em baixa e em alta velocidade. Os instrumentos e sistemas empregados para o desenvolvimento da pesagem em baixa velocidade, com foco na fiscalização de veículos comerciais pesados, são amplamente aceitos, do ponto de vista metrológico, em diversos países, como no Reino Unido, Alemanha, França, Bélgica, Japão e no Brasil. Entretanto, requerem que sejam utilizados em áreas controladas, além de outros aspectos relacionados aos modelos de fiscalização, conforme apresentado no Capítulo 3.

Os instrumentos e sistemas passíveis de serem empregados para o desenvolvimento da pesagem em alta velocidade, contudo, apesar de a potencialidade de ganho que podem proporcionar, em termos de eficiência, ainda não são amplamente aceitos do ponto de vista da metrologia legal. Apesar de existir especificações e recomendações internacionais que contemplam a pesagem em movimento, não existe um consenso quanto à uniformidade de adoção desses documentos internacionais para a aceitação de sistema de pesagem em alta velocidade. Ainda, apesar de as especificações e recomendações internacionais existentes, cada país é apto a formular sua própria legislação, podendo adotar padrões específicos e distintos, inclusive quanto ao estabelecimento de limites de tolerância. Tal barreira metrológica e de certificação, portanto, acaba por dificultar e/ou limitar o emprego dos mencionados instrumentos e sistemas em sua plenitude, não contribuindo para a redução dos prejuízos que os atos de fiscalização visam coibir.

Nesse sentido, no presente Capítulo, é realizada abordagem a respeito da pesagem dinâmica em pavimentos e, principalmente, a respeito da pesagem em alta velocidade, uma vez esta se caracterizar como foco central deste trabalho. Aborda-se, também, sobre os tipos de sensores e tecnologias passíveis de serem utilizados em pavimentos, para fins de estimativa e obtenção das medidas de peso, bem como é feita breve abordagem a respeito da composição de sistemas de pesagem em alta velocidade, considerando o modelo de fiscalização direta. Em sequência, aborda-se a respeito da estimativa de peso e dos erros dos instrumentos/tecnologias de pesagem. Posteriormente, faz-se apresentação dos documentos internacionais existentes, sendo conferida atenção às definições de precisão e confiabilidade, bem como aos procedimentos de testes e critérios para aceitação de sistemas de pesagem.

4.1 PESAGEM DINÂMICA EM PAVIMENTOS

A pesagem dinâmica, mundialmente denominada como pesagem em movimento, ou do inglês *Weigh-in-Motion* (WIM), foi primeiramente utilizada, na década de 50, nos Estados Unidos, como ferramenta, principalmente, de coleta de amostras de carga por eixo e PBT, para fins de dimensionamento de pavimentos, quando do desenvolvimento do teste rodoviário da AASHO (AASHO, 1961 *apud* LOO & ZNIDARIC, 2019). A partir da década de 70, novas tecnologias WIM passaram a ser desenvolvidas na Europa. Entre as décadas de 70 e 80, os dados provenientes da pesagem WIM passaram ser utilizados, adicionalmente, para o monitoramento do tráfego e para a coleta estatística relativa ao transporte de carga. Na década de 90, na América do Norte e na Europa, surgiram as primeiras especificações internacionais contemplando testes relativos a sistemas WIM. A partir do ano 2000, a precisão e a adequabilidade de sistemas WIM foram melhoradas, o que possibilitou que eles fossem utilizados, mais frequentemente, para fins de pré-seleção quanto à potencialidade de sobrecarga. A partir do ano 2000, também, a OIML publicou recomendação internacional, que contemplou sistemas de pesagem em baixa velocidade, visando à pesagem em pedágios e à fiscalização do excesso de carga transportado (JACOB & BEUAMELLE, 2010; LOO & ZNIDARIC, 2019).

A pesagem dinâmica passou, portanto, a ser desenvolvida para a melhoria da eficiência do controle dos veículos que trafegam com sobrecarga, alternativamente à pesagem estática, tendo ganhado popularidade devido à possibilidade de se coletar os dados do tráfego, de modo automatizado e contínuo, sem a necessidade de intervenção humana (JACOB & LA BEAUMELLE, 2010; ZHANG *et al.*, 2015; BURNOS *et al.*, 2016). Tal pesagem se divide em dois tipos, a saber pela pesagem em movimento em baixa velocidade, também denominada no inglês como *Low Speed Weigh-in-Motion* (LS-WIM), e a pesagem em movimento em alta velocidade, então denominada no inglês como *High Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM) (JACOB & BEUAMELLE, 2010). Na Figura 4.2 é apresentada tal divisão, bem como os possíveis locais de instalação e, também, as tecnologias relacionadas a cada um dos tipos de pesagem em movimento.

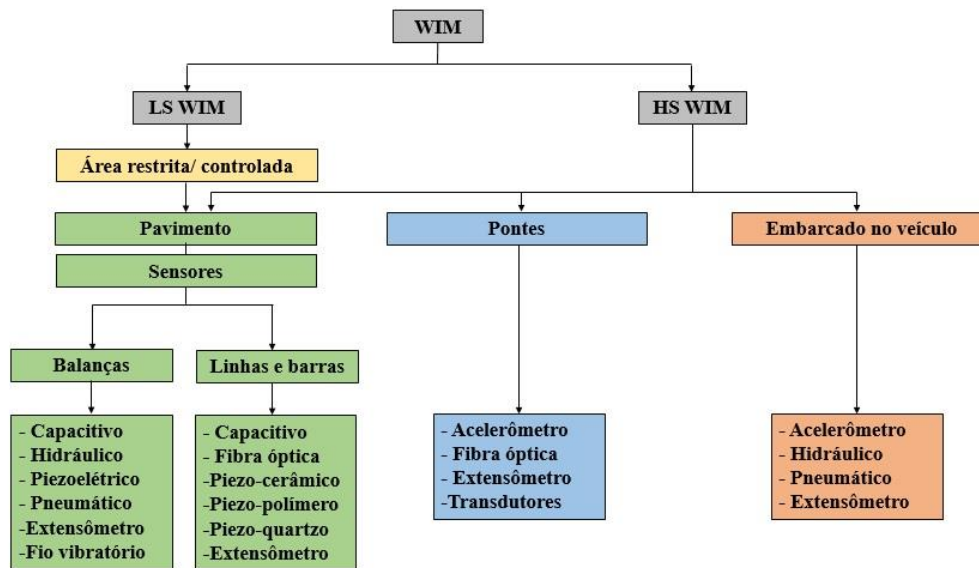


Figura 4.2: Tipos de pesagem em movimento, locais de emprego e suas tecnologias
 Fonte: Adaptado de ISWIM *apud* Loo & Znidaric (2019)

Tendo como base a Figura 4.2, menciona-se que a pesagem LS-WIM é desenvolvida em áreas restritas ou controladas, na maioria das vezes externamente às faixas de rolamento das rodovias, e em plataformas niveladas, geralmente em concreto, com comprimento não inferior a 30 metros. Na área de pesagem, a velocidade é limitada entre 5 e 15 km/h, a fim de se controlar o movimento transversal do veículo e, por consequência, eliminar seus efeitos dinâmicos, possibilitando garantir que as forças de impacto dos pneus sejam próximas ao peso estático das rodas (JACOB *et al.* 2002; JACOB & BEAUMELLE, 2010).

A pesagem em alta velocidade, por sua vez, ou simplesmente HS-WIM, quando empregada em estruturas de pavimentos, se refere, basicamente, à instalação de sensores em uma ou mais faixas de rolamento de uma rodovia, a partir dos quais são obtidas medidas das cargas por eixo, automaticamente, sob condições normais de tráfego, na velocidade de fluxo livre ou regulamentar, a qual pode ser desenvolvida a partir de 30 km/h. (CEBON, 1999 *apud* LOO & ZNIDARIC, 2019; JACOB *et al.*, 2002; JACOB & BEAUMELLE, 2010).

Nas seções seguintes, contempla-se a pesagem em alta velocidade, mais especificamente com foco no uso de estruturas de pavimento. Expõe-se a respeito dos sensores utilizados, única e exclusivamente, para a obtenção das medidas de peso e que podem compor os sistemas HS-WIM, sobre os quais se apresenta posteriormente. Tais sensores se dividem, portanto, naqueles estruturados na forma de balanças, em linhas e em barras, podendo ser compostos por diferentes tecnologias e por diferentes materiais, conforme exposto na Figura 4.2.

4.1.1 Balanças

As balanças WIM são instrumentadas em placas montadas em estruturas rígidas, que são fixadas na estrutura de pavimentos, a fim de se medir as forças de impacto dos pneus e das rodas dos veículos em movimento. A composição das balanças pode se dar mediante células de carga, placas de flexão e tapetes capacitivos. Seu comprimento, na direção do tráfego, é correspondente a mais que a impressão de uma roda/pneu, ou seja, aproximadamente 0,30 metros, porém menos que o espaçamento mínimo de um eixo (0,80 metros). A largura total de tais sensores, na faixa de rolamento, no geral, é abaixo de um metro, para o caso das balanças de roda, e acima de três metros, para as balanças de eixo (LOO & ZNIDARIC, 2019). Nas seções seguintes, são apresentadas, de modo breve, as principais tecnologias das balanças WIM, a saber pelas células de carga e pelas placas de flexão.

(i) Células de Carga

As células de carga consistem em transdutores que convertem as forças aplicadas externamente em sinais elétricos proporcionais, podendo ser compostas por dispositivos hidráulicos, com um arranjo de pistão e cilindro, ou compostas por materiais capacitivos, piezoelétricos, pneumáticos, por tecnologias de fio vibratório, ou ainda, se configurar com sensores de deformação ou extensômetros. Nesse sentido, em uma balança, uma ou mais células de carga podem ser montadas entre uma placa rígida de aço, a qual é colocada no topo do arranjo, e uma estrutura de suporte, que é colocada na parte inferior de todo o arranjo (AL-QADI *et al.*, 2016; LOO & ZNIDARIC, 2019). Na Figura 4.3, é apresenta um sensor do tipo balança, então baseada no uso de células de carga, que se faz instalado em uma estrutura de pavimento.



Figura 4.3: Sensor do tipo balança baseada no uso de células de carga
Fonte: Al-Qadi *et al.* (2016)

Em complementariedade, de acordo com Al-Qadi *et al.* (2016) e Loo & Znidaric (2019), as balanças que têm como arranjo as células de carga apresentam boa precisão, porém um custo acima da média, se comparadas a outros tipos de sensores. Na seção seguinte, dando continuidade à apresentação das tecnologias relativas aos sensores do tipo balança, apresenta-se a respeito das placas de flexão, as quais são comumente conhecidas, do inglês, como *bending plates*.

(ii) *Bending Plates*

As tecnologias *bending plates* fazem o uso de extensômetros dispostos na parte inferior de placas de aço retangulares, as quais são simplesmente apoiadas pela estrutura em sua borda. Tais extensômetros são conectados em circuito e, quando a roda de um veículo passa sobre a placa de pesagem, são responsáveis por medir a curvatura da placa. As tensões de flexão, portanto, são proporcionais às forças de impacto aplicadas. Ainda, pelo fato de os extensômetros serem combinados, a localização transversal da roda pode ser estimada e a força vertical medida se torna quase independente. Tais tecnologias apresentam boa precisão (ZHANG *et al.*, 2015; AL-QADI *et al.*, 2016; LOO & ZNIDARIC, 2019). Na Figura 4.4, é apresentado o sistema HS-WIM baseado no uso de *bending plates*, então dispostas de modo escalonado, bem como representação de tal tecnologia quando instalada na estrutura de um pavimento.



Figura 4.4: *Bending plates*

Fonte: a) Adaptado de Burnos e Rys (2017)/ b) Al-Qadi *et al.* (2016)

As tecnologias *bending plates* são disponíveis em diferentes tamanhos. Quando utilizadas em sistemas WIM, duas *bending plates* individuais são instaladas em cada faixa de rolamento,

podendo ser dispostas lado a lado ou de modo escalonado. O arranjo escalonado permite que a velocidade seja detectada a partir da medição das duas placas de pesagem. Já no arranjo em linha (lado a lado), para a detecção da velocidade, faz-se necessária a instalação de um sensor independente de detecção de eixo (AL-QADI *et al.*, 2016).

4.1.2 Sensores em Linhas e em Barras

Os sensores em linha e em barra foram primeiramente introduzidos na década de 70, de modo a propiciar soluções alternativas aos sensores do tipo balança, proporcionando menores custos de produção, instalação e manutenção, e menor intrusão nas estruturas de pavimentos. Tais sensores podem ser instalados a partir de pequenos cortes realizados no pavimento, sendo colocados em camadas inferiores à sua superfície, mas a pequenas profundidades, ou juntamente à própria superfície do pavimento. Um sensor em linha ou em barra se configura por ser plano, com altura abaixo de 2 centímetros, largura entre 1 e 5 centímetros, e comprimento de até cerca de 5,50 metros (LOO & ZNIDARIC, 2019). Comumente, segundo os autores, os sensores em barra são denominados como sensores em linha, sendo essa denominação também adotada no âmbito desta dissertação.

Ainda de acordo com Loo & Znidaric (2019), devido à possibilidade de combinação de diferentes sensores, seu comprimento pode ser adaptado para comportar metade de uma faixa de rolamento, permitindo a pesagem das rodas de um veículo, ou o comprimento total de uma faixa de rolamento, possibilitando que as cargas decorrentes de todo o eixo sejam medidas. Quanto às características geométricas, os sensores em linha, devido às dimensões reduzidas, são considerados mais estreitos que a impressão de área relativa aos pneus, sendo responsáveis por medir, contudo, os sinais de resposta enquanto são atravessados pelas rodas de um veículo. Para tanto, requerem que seja registrada a velocidade do veículo, de modo que seja possível integrar o sinal de resposta em função do tempo, a fim de se obter a força de impacto de uma roda ou eixo. Nesse sentido, tendo como base o exposto pelos autores, as principais tecnologias de sensores em linha são apresentadas nas seções seguintes.

(i) Capacitivo

Este tipo de sensor é composto por duas ou mais placas/barras separadas por camadas de material dielétrico, as quais criam um capacitor elétrico. A força de impacto aplicada pela roda de um veículo acaba comprimindo o material dielétrico, diminuindo, portanto, a distância existente entre as placas/barras e aumentando, por consequência, a capacitância, sendo a carga

elétrica resultante correspondente à força vertical aplicada pela roda do veículo carregado (LOO & ZNIDARIC, 2019). Na Figura 4.5 é apresentada ilustração de sensor que tem como base o uso de materiais capacitivos.

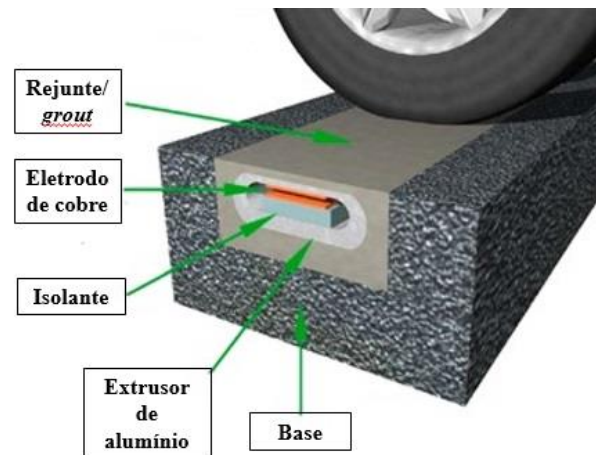


Figura 4.5: Sensor capacitivo

Fonte: Adaptado de Burnos e Rys (2017)

(ii) Piezo-polímero

O sensor piezoelétrico polímero, ou simplesmente piezo-polímero, é composto por um tubo em cobre flexível achatado, cujo interior é formado por extensômetros, chatos e trançados, em cobre banhados com prata. Todo esse conjunto é, ainda, envelopado por um filme de polímero piezoelétrico trançado, a saber pelo *PolyVinylidene Fluoride* (PVDF). Quando o veículo em movimento aplica uma força de impacto sobre o sensor, acaba exercendo uma ação de compressão no tubo (deformação), gerando carga elétrica como resposta, a qual é acumulada e transformada em tensão por meio de um amplificador de carga, para o sistema de aquisição de dados (OTTO, 2018; LOO & ZNIDARIC, 2019; TE CONNECTIVITY, 2020). De acordo com Loo & Znidaric (2019), esse tipo de sensor se caracteriza por proporcionar o menor custo dentre as demais tecnologias de sensores em linha, porém, também, por proporcionar menor precisão, sendo, ainda, mais sensível às variações de temperatura. Na Figura 4.6, é apresentada a geometria do sensor piezo-polímero *Measurement Specialties*, bem como representação da seção transversal de sua estrutura interna, quando ele se encontra instalado em um pavimento.

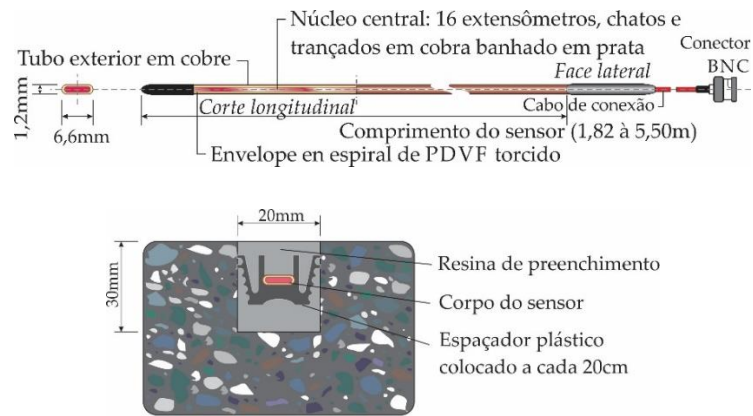


Figura 4.6: Representação – Sensor piezo-polímero *Measurement Specialties*
 Fonte: Otto (2018)

(iii) Piezo-cerâmico

O sensor piezoelétrico cerâmico, ou simplesmente piezo-cerâmico, funciona como um capacitor cilíndrico e consiste em um tubo de cobre coaxial externo, que contém, em seu interior, um pó cerâmico piezoelétrico polarizado e comprimido, e um núcleo de cobre no centro do referido pó, sendo todo o conjunto envolto em uma cápsula plástica. Quando da passagem de um veículo, as variações de pressão, flexão e vibração perturbam o material, gerando um potencial elétrico entre o tubo de cobre externo e o núcleo de cobre, sendo a carga elétrica produzida acumulada e transformada em tensão, a partir de um amplificador de carga, resultando, portanto, posteriormente, na correspondente medida de peso (AL-QADI *et al.*, 2016; OTTO, 2018; LOO & ZNIDARIC, 2019). O material que compõe o sensor piezo-cerâmico também tem propriedades piroelétricas, sendo sensível à variação de calor e, portanto, às variações de temperatura (OTTO, 2018). Na Figura 4.7, é apresentada a geometria do sensor piezo-cerâmico *Thermocoax*, bem como representação da seção transversal de sua estrutura interna, quando instalado em um pavimento.

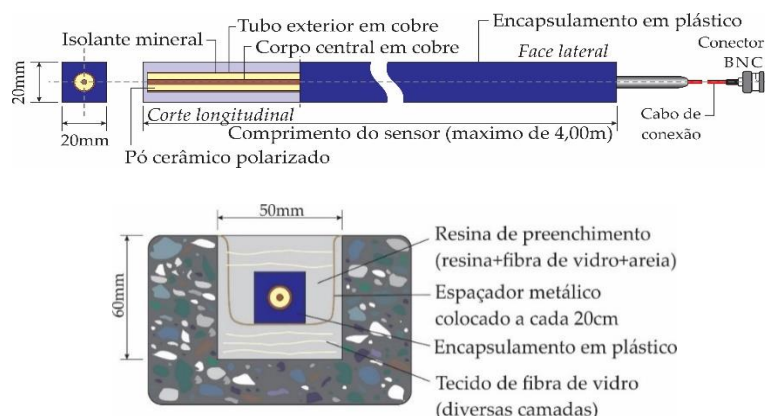


Figura 4.7: Representação – Sensor piezo-cerâmico - *Thermocoax*
 Fonte: Otto (2018)

(iv) Piezo-quartzo

Os sensores piezoelétricos de quartzo, ou simplesmente piezo-quartzo, consistem em uma linha com sucessivos discos de quartzo (cristais), do tamanho de lentes de contato, os quais são montados em um perfil de alumínio extrudado. Ainda, o conjunto é envolto por uma espuma, a fim de amortecer as forças laterais e fazer com que ele seja sensível somente aos esforços verticais atuantes (KISTLER, 2020a). Quando uma força de impacto é aplicada, ela é direcionada pelo perfil de alumínio até os discos, produzindo uma carga elétrica, a qual é proporcional à força aplicada. A carga elétrica é gerada, porque os elementos da rede cristalina (positivos e negativos) são deslocados um em relação ao outro, formando um dipolo elétrico (LOO & ZNIDARIC, 2019; KISTLER, 2020b). De acordo com Loo & Znidaric (2019), os sensores piezo-quartzo apresentam baixa sensibilidade às variações de temperatura e se caracterizam por apresentar boa precisão e custos acima da média, se comparado aos demais sensores. Na Figura 4.8, é apresentada a geometria do sensor piezo-quartzo *Kistler*, bem como a representação da seção transversal de sua estrutura interna, quando instalado em um pavimento.

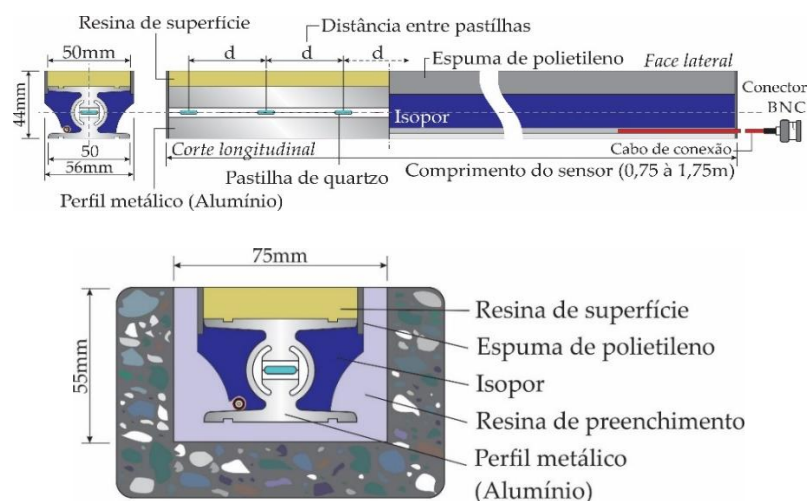


Figura 4.8: Representação – Sensor piezo-quartzo - *kistler*
Fonte: OTTO (2018)

(v) Extensômetro

Os sensores de deformação, ou simplesmente extensômetros, consistem, de modo geral, em vários extensômetros, os quais são compostos por um elemento resistivo à passagem de corrente elétrica. Quando da aplicação de carga, o extensômetro se deforma, alterando seu comprimento e levando à alteração da resistência elétrica do elemento. Com a alteração da resistência elétrica, é gerada uma corrente proporcional à variação do comprimento sofrido pelo extensômetro, a qual é medida nos pontos de conexão. Para esse tipo de sensor, um compensador corrige as alterações decorrentes dos efeitos provocados pela temperatura, e uma espuma lateral é

utilizada para impedir excitações por esforços horizontais (OTTO, 2018; LOO & ZNIDARIC, 2019). Na Figura 4.9, é apresentada representação geométrica de um sensor *Intercomp*, construído com base em extensômetros.

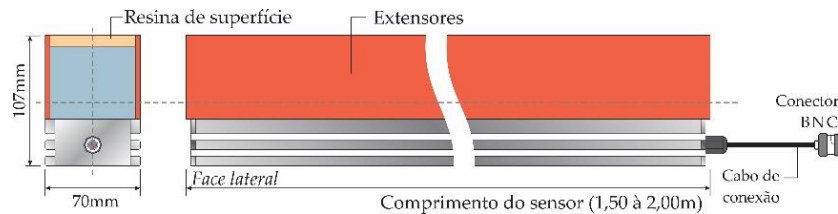


Figura 4.9: Representação – Sensor com base em extensômetro
Fonte: Otto (2018)

Segundo Intercomp (2020a) e Intercomp (2020b), os sensores do tipo extensômetros por ela fabricados são tidos como amplamente aceitos para a pesagem em movimento, possuindo certificação emitida pela OIML, desde fevereiro de 2020, conforme a Recomendação Internacional OIML R-134, especificamente para as classes 5E (velocidade máxima de 40 km/h) e 10F (velocidade máxima de 100 km/h). Ainda, mencionam tais sensores serem certificados conforme a Especificação ASTM E1318-09, especificamente para os tipos I, II e III, bem como para os requisitos relativos às classes A(5), B+(7) e B(10), da Especificação Europeia COST 323.

(vi) Fibra Óptica

Os sensores de tecnologias ópticas são formados por cabos compostos por fibra óptica, que torna o sensor sensível somente aos esforços verticais. Tais sensores, por não possuírem componentes estruturais metálicos, não são influenciados por efeitos magnéticos, corrosão e descargas elétricas. Ainda, em linhas gerais, medem a força vertical através da detecção das variações de transmitância óptica, mediante interface óptica-eletrônica, as quais são transformadas em um sinal elétrico, que, por sua vez, é posteriormente processado em algoritmos para o cálculo de peso (OTTO, 2018). Na Figura 4.10, é apresentada a geometria do sensor óptico *Measurement Specialties*, bem como representação da seção transversal de sua estrutura interna, quando este se encontra instalado em um pavimento.

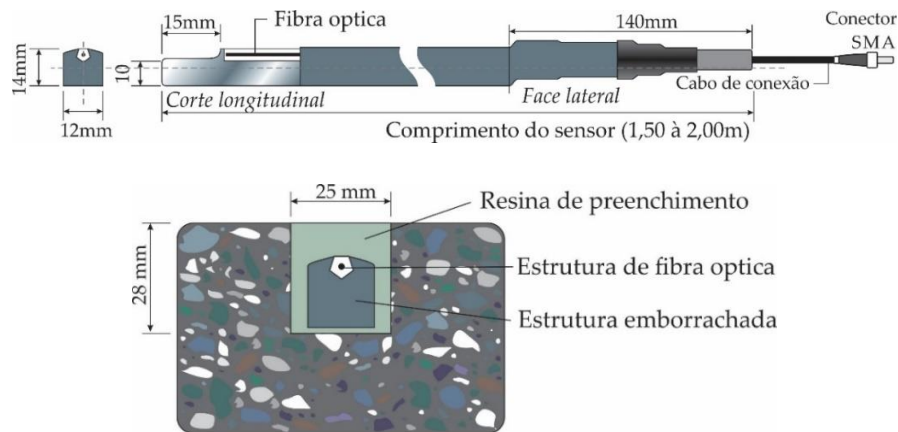


Figura 4.10: Representação – Sensor óptico - *Measurement Specialties*
 Fonte: Otto (2018)

De acordo Loo & Znidaric (2019), por muitos anos, diferentes tipos de sensores ópticos foram desenvolvidos e testados. Entretanto, tais sensores não são comercializados em larga escala, devido à identificação de aspectos relacionados à durabilidade e à necessidade de compensação de temperatura. Findadas as apresentações relativas aos sensores WIM, bem como a respeito das respectivas tecnologias e materiais, na seção seguinte, se expõe, de modo breve, sobre a composição de um sistema HS-WIM.

4.1.3 Sistemas HS-WIM

Os sistemas HS-WIM consistem em um conjunto de sensores de peso que podem ser construídos em compatibilidade com a superfície de um pavimento ou dentro dele. O conjunto de sensores, por sua vez, é complementado com dispositivos eletrônicos e *softwares*, para controle do próprio sistema, e para a coleta, controle, análise e armazenamento dos dados, e com *hardwares* de comunicação, voltados à transmissão dos dados. Os dispositivos eletrônicos e os instrumentos de comunicação são localizados, geralmente, em gabinetes externos às rodovias e adjacente ao local de ocorrência da pesagem em movimento (AL-QADI *et al.*, 2016).

Todos esses componentes, conjuntamente, são utilizados para identificar a presença e medir as forças de impacto dos pneus de um veículo em movimento, em função do tempo, fornecendo dados para o cálculo das cargas ou pesos das rodas, eixos e do PBT. Além do mais, considerando o uso de vários sensores e de dispositivos eletrônicos, *softwares* e *hardwares* de comunicação, demais informações podem ser obtidas, como temperatura, as velocidades praticadas, o espaçamento entre os eixos, a posição lateral das rodas nas faixas de rolamento, as configurações dos veículos e sua classificação e as respectivas placas (JACOB *et al.*, 2002).

Tendo como base a Figura 4.11, é possível observar a composição genérica de um sistema HS-WIM, bem como a diversidade dos dados passíveis de serem adquiridos em uma única estação de pesagem instalada em uma rodovia.

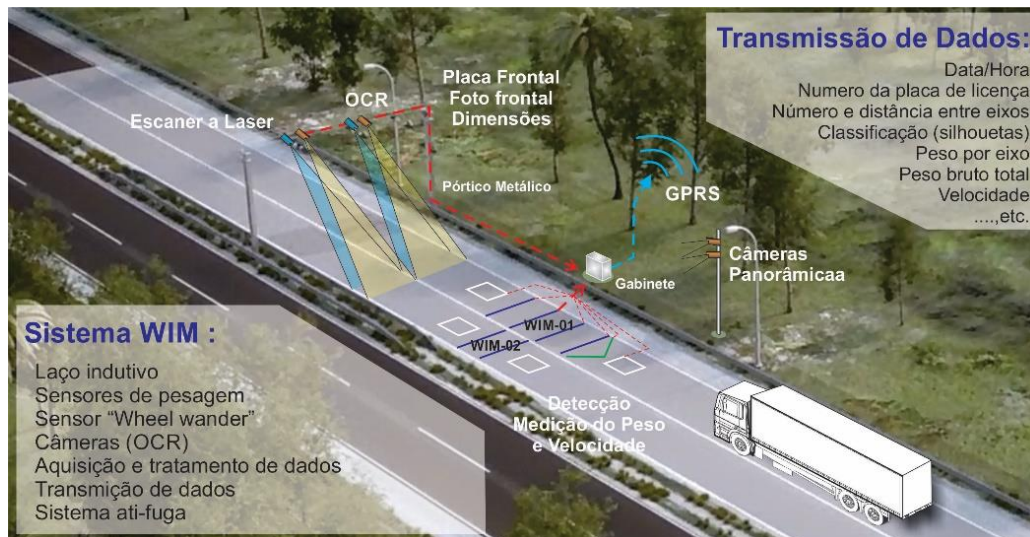


Figura 4.11: Representação genérica de um sistema WIM/HS-WIM
Fonte: Otto (2018)

Diante do panorama apresentado com relação aos tipos de pesagem em movimento, e a respeito da diversidade de instrumentos e tecnologias possíveis de serem empregados para a composição de sistemas HS-WIM, o entendimento quanto ao princípio que rege a forma de aquisição dos dados peso se torna mais claro. Entretanto, surge o questionamento quanto aos fatores que podem influenciar a obtenção das medidas de peso a serem adquiridas por meio de sensores, como os contemplados nesta seção, quando da sua interação com a estrutura de pavimentos, estando este conjunto (pavimento/sensor) sob condições normais de tráfego e ambientais. Nesse sentido, na seção seguinte, aborda-se, de modo sucinto, sobre a estimativa do peso e, também, sobre os fatores que podem impactar para as incertezas das medidas de peso, quando da pesagem em alta velocidade.

4.2 ESTIMATIVA DO PESO

A técnica de pesagem em movimento consiste no processo de estimar o PBT de um veículo e a porção desse peso que é distribuída entre os eixos, rodas e pneus, em correspondência ao peso de um veículo parado (peso estático), a partir da medição e análise da componente vertical da força dinâmica (força de impacto) do pneu de cada roda de um veículo. O peso, por sua vez, é devido apenas à força gravitacional atuante sobre a massa, então composta por todos os componentes do veículo e pela carga transportada (JACOB *et al.*, 2002; LOO & ZNIDARIC, 2019).

As forças horizontais, verticais e laterais decorrentes da passagem de um pneu sobre um sensor WIM instalado em uma rodovia são transmitidas ao pavimento e, por consequência, ao próprio sensor. No caso de sensores em linha, devido à sua pequena largura, o valor máximo da força de impacto, a qual corresponde ao pico do sinal elétrico obtido do sensor, não representa a força total atuante pela roda do veículo, já que esta, através do pneu, entra em contato com o sensor de modo parcial, ao longo do tempo. A impressão do pneu sobre o sensor, portanto, denominada no inglês como *footprint*, representa o tempo em que o pneu permanece sobre o sensor, sendo calculada mediante a consideração da velocidade de deslocamento do veículo. A área abaixo da curva, a qual é formada pelo relacionamento entre as percepções parciais do sensor em relação à força aplicada pelo pneu ao longo de sua trajetória sobre o sensor e o comprimento do *footprint*, é proporcional à carga da roda. O referido relacionamento, por sua vez, depende do tipo do pneu e de sua pressão de enchimento (OTTO, 2018). Na Figura 4.12, é apresentada representação gráfica do que foi exposto pelo autor.

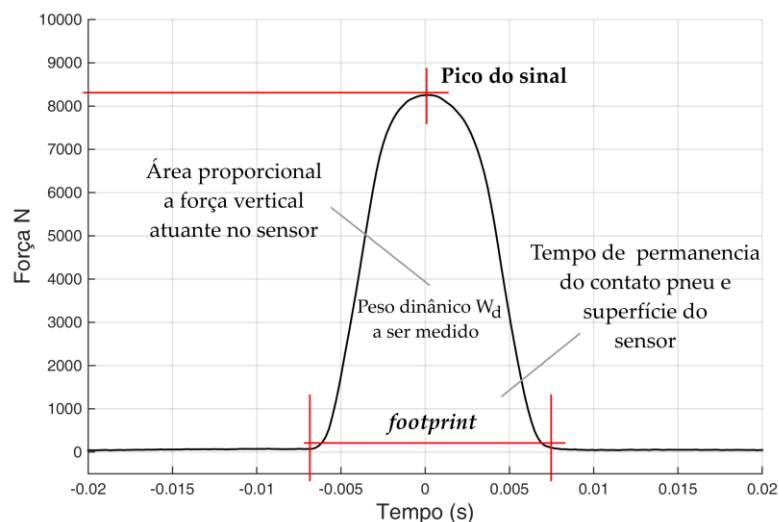


Figura 4.12: Sinal de um sensor WIM em linha expresso em força (N)
 Fonte: Otto (2018)

Entretanto, no que se refere a fatores ligados às incertezas das medidas de peso estimadas a partir de sensores WIM, ressalta-se que, de acordo com Scheuter (1998), qualquer instrumento de pesagem apresenta um erro total, que consiste na diferença entre o peso medido e o peso real estático que se busca estimar, o qual é definido como aquele existente sob condições ideais. Ainda segundo o autor, a diferença entre a resposta do sensor com relação à aplicação de uma carga e a carga de fato aplicada é definida como erro intrínseco. Já a diferença entre a força aplicada e a real carga estática equivalente a ser inferida, é caracterizada como erro devido a fatores externos. Tendo como base todo o exposto, bem como considerando as definições de

erro apresentadas por Scheuter (1998), nos quais se incluem os sensores WIM, as seções 4.2.1 e 4.2.2 contemplam, sucintamente, maior detalhamento a respeito dos mencionados erros.

4.2.1 Erro Intrínseco

Segundo Scheuter (1998), a precisão de um sensor (erro intrínseco) pode ser testada sob condições laboratoriais e, a depender da tecnologia, pode ser influenciada por fatores, como a temperatura, posicionamento da carga sobre o sensor (carga excêntrica), inclinação do sensor em relação à carga aplicada, flexão, forças laterais ou sensibilidade a forças não verticais, repetibilidade, deformação, umidade, suscetibilidade eletromagnética, dentre outros. Ainda com relação ao erro intrínseco, Jacob (2007) aponta que, no caso de sensores embutidos no pavimento, é necessário considerar a influência do módulo (E) do pavimento sobre as leituras do sensor, que somente pode ser determinada no seu local de instalação.

Burnos e Rys (2017), sob a consideração de que o pavimento faz parte dos sistemas de pesagem e que, portanto, suas propriedades afetam todo o sistema WIM, propõem uma divisão dos erros de pesagem em dois grupos, sendo um deles referente ao erro intrínseco, o qual os autores mencionam se tratar, simplesmente, da alteração dos parâmetros elétricos sob a influência da mudança de temperatura do pavimento. Nesse sentido, no que se refere à temperatura, os autores concluem que esta, dada a influência quanto à resposta elétrica das tecnologias de sensores analisadas (quartzo, polímero e *bending plate*), não pode ser negligenciada nos procedimentos de teste e calibração de sistemas WIM. Tal conclusão reforça as conclusões já obtidas por Burnos *et al.* (2016).

Segundo Otto (2018), a calibração é entendida como o procedimento estatístico de determinação de um ou mais coeficientes (de calibração), que são aplicados às medidas realizadas por instrumentos para corrigir o valor obtido para o valor esperado. Como fatores importantes à resposta elétrica do sensor em relação à aplicação da carga, Otto (2018) destaca, também, a existência de atraso em tempo, denominado no inglês como *delay*, ou de degeneração no tempo, sendo esta denominada no inglês como *decay*. Segundo o autor, ainda, o erro intrínseco é introduzido pelas operações de aquisição e tratamento do sinal de saída do sensor (amplificação, filtragem, conversão A/D, *etc.*), em maior ou menor escala. No caso de sistemas que contemplem múltiplos sensores de peso, o erro intrínseco é introduzido pelo algoritmo interno do instrumento de pesagem, que calcula a melhor estimativa do peso estático a partir de

amostras produzidas pelos múltiplos sensores com relação à força aplicada. Do exposto, na seção seguinte, apresenta-se a respeito do erro devido a fatores externos.

4.2.2 Erro Devido a Fatores Externos

De acordo com Scheuter (1998), o erro devido a fatores externos se caracteriza pela combinação das influências decorrentes das características do tráfego, do pavimento em que é instalado o sistema de pesagem e o respectivo sensor ou conjunto de sensores, e do próprio sensor ou sensores. O autor destaca, portanto, as influências devido a: (i) inclinação do veículo; (ii) suspensão do veículo; (iii) fricção da suspensão; (iv) reação à frenagem; (v) movimento oscilatório do veículo (chassis e eixos); (vi) frisos dos pneus; (vii) forças aerodinâmicas; (viii) instalação dos sensores (nivelamento); e (ix) irregularidade e planicidade do pavimento. O detalhamento relativo às influências discriminadas pelo autor, sobre as quais se apresenta em sequência, são complementadas com as exposições correspondentes aos pavimentos e sua interação com as características do tráfego, conforme Capítulo 2 desta dissertação.

Nesse sentido, segundo Scheuter (1998), o fator de influência relativo à inclinação do veículo provoca dois efeitos. O primeiro se refere à inclinação do veículo propriamente dita, que causa deslocamento do centro de gravidade, fornecendo medidas equivocadas os eixos. O segundo se refere à inclinação decorrente do sensor, a qual acarreta medida de peso menor, já que os sensores registram somente o peso devido à componente vertical da força gravitacional. Esse último efeito, entretanto, é considerado pequeno pelo autor, já que 5% de inclinação influencia o peso medido em -0,12%. Tal erro pode ser totalmente compensado com o uso de sensores que medem o eixo inteiro (comprimento transversal de uma faixa de rolamento). No caso de sensores de roda, que abarcam metade do comprimento transversal de uma faixa de rolamento, o erro pode ser considerável.

O fator de influência relativo à suspensão ocorre devido ao fato de a carga em uma roda ou eixo ser diretamente proporcional à compressão da mola de suspensão. Se, devido à carga, a compressão é diferente da média, um sensor, então calibrado para suspensão com compressão média, medirá equivocadamente a carga aplicada. Logo, quanto mais rígida ou incompressível a mola estiver (fim do curso de compressão da mola), maior será o erro. Há, portanto, um aumento da carga medida a cada milímetro de compressão da mola de suspensão (SCHEUTER, 1998).

Já com relação ao fator de influência devido à fricção da suspensão, Scheuter (1998) aponta que dois tipos de atrito ocorrem na suspensão de um veículo, o mecânico e o hidráulico. A direção dos tipos de força de fricção é oposta ao movimento vertical real de um eixo. A magnitude do atrito mecânico depende do tipo de suspensão e de sua manutenção, sendo praticamente independente da velocidade vertical do eixo. O atrito hidráulico ocorre devido aos amortecedores (absorvedores de impacto), com pequena parcela relativa à fricção mecânica. Sua magnitude depende do tipo de amortecedor, bem como do tipo de fluido usado, e aumenta linearmente com a velocidade vertical do eixo. Ao medir uma roda, o atrito pode resultar em um peso maior ou menor, dependendo da direção real do movimento vertical do eixo, quando o veículo passa por um sensor WIM.

No tocante à influência relativa à reação da frenagem, Scheuter (1998) menciona que, em sistemas WIM não existe a necessidade de frenagem. Logo, seus efeitos podem ser desprezados. Entretanto, de acordo com Otto (2018), principalmente no que diz respeito a sistemas de pesagem de alta velocidade, é importante que se garanta que o local destinado à pesagem não impõe a necessidade de uso dos freios, sendo desejável, portanto, um acesso retilíneo (pelo menos 200 metros) anteriormente ao sistema WIM. Entretanto, a despeito do exposto pelos autores, do ponto de vista prático, menciona-se não ser possível prever eventuais comportamentos intencionais de frenagem por parte dos condutores dos veículos.

O movimento oscilatório dos veículos, por sua vez, é considerado aquele que apresenta maior parcela de influência nos erros devido a fatores externos, sendo dividido em dois, a saber pelo movimento oscilatório do chassi, que depende do tipo da carga e da sua distribuição ao longo do veículo, e pelo movimento oscilatório dos eixos. A magnitude relativa ao erro proveniente do efeito ocasionado pelo movimento oscilatório dos veículos depende da velocidade praticada, do tipo de suspensão, especificamente no que se refere ao amortecedor, e da planicidade do pavimento, e, em menor escala, da sua irregularidade superficial (SCHEUTER, 1998).

No que se refere aos frisos dos pneus, Scheuter (1998) aponta que eles podem induzir a erros nas medidas, se a ranhura no pneu for grande e transversal ao movimento do veículo. De acordo com Otto (2018), tais frisos são típicos de veículos de neve, não se enquadrando na realidade brasileira, apesar de certos veículos de carga extrapesadas possuírem pneus com consideráveis ranhuras. Ainda segundo o autor, os efeitos decorrentes dos frisos são considerados de segunda ordem, se comparados àqueles decorrentes do movimento oscilatório dos veículos.

Com relação às forças aerodinâmicas, Scheuter (1998) menciona que, na direção vertical, elas são pequenas se comparadas ao peso do veículo. Nesse sentido, somente a força transversal decorrente do vento pode provocar alguma influência, fazendo com que a carga de um grupo de rodas seja transferida lentamente para o grupo de rodas diretamente oposto. Da mesma forma que para o fator relativo à inclinação do veículo, tal erro pode ser totalmente compensado quando do uso de sensores de eixo, e significativo nos casos de uso de sensores de rodas.

O nivelamento de sensores, por sua vez, o qual pode ser alterado em decorrência do próprio desgaste do pavimento e uso dos sensores, resulta em erro que tem como fonte a própria suspensão do veículo, conforme já mencionado. Já o fator atrelado à irregularidade e à planicidade do pavimento, antes e depois dos locais de instalação de sensores WIM, pode induzir a ocorrência de movimentos oscilatórios dos veículos, gerando oscilações no conjunto massa suspensa e veículo trator e, por consequência, piorando as medidas de peso em alta velocidade (SCHEUTER, 1998).

4.2.3 Desafios da Pesagem Dinâmica

Considerando os erros expostos nas seções 4.2.1 e 4.2.2, menciona-se que o desenvolvimento da pesagem dinâmica, em rodovias, apresenta como desafio, portanto, a estimação do peso estático, com determinada precisão e confiabilidade, a partir da distribuição espacial da força de impacto, a qual varia em torno do peso, no tempo, ao longo da trajetória percorrida pelas rodas do veículo sobre o pavimento e sensores. Em resumo, para a estimativa do peso estático, as medidas das forças de impacto são associadas a outros parâmetros, como velocidade e posição do veículo na faixa de rolamento, sendo a mencionada distribuição influenciada pela dinâmica do veículo como um todo, bem como pelo movimento individual de cada eixo, os quais são função da interação dos pneus com o pavimento. Nesse sentido, quanto mais perturbações, maior é a variação dinâmica e, por consequência, maior a dificuldade em se estimar o peso estático a partir de instrumentos de pesagem em movimento. (JACOB, 2000; JACOB, 2007; LOO & ZNIDARIC, 2019). Na Figura 4.13, é apresentada ilustração gráfica sobre as considerações apresentadas pelos autores.

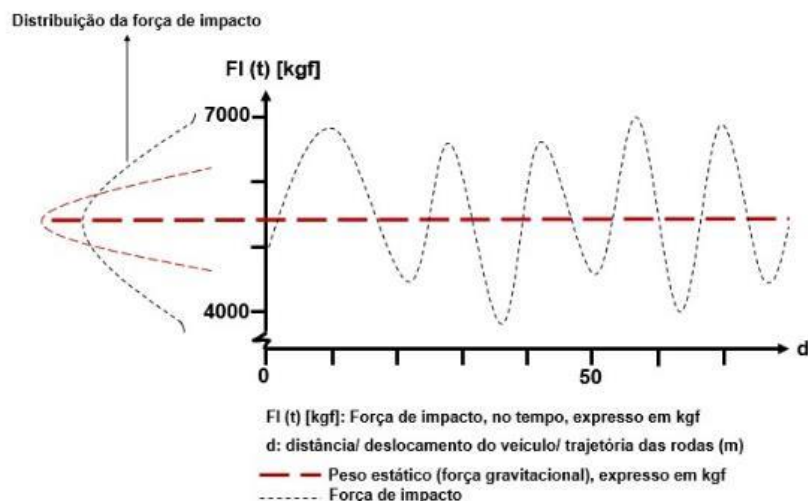


Figura 4.13: Estimativa do peso a partir da força de impacto
Fonte: Adaptado de Jacob (2007) e Loo *apud* Loo & Znidaric (2019)

Segundo Loo & Znidaric (2019), a seleção do adequado sistema WIM leva em consideração cinco etapas, a saber pela: (i) determinação da finalidade de aplicação do sistema WIM, ou seja, se para fins estatísticos, de pré-seleção, de fiscalização ou demais aplicações, e ainda, definição de quais dados serão requeridos como resultado da operação do sistema; (ii) seleção do local para instalação, considerando as condições do tráfego, pavimento e as restrições de instalação e/ou operação; (iii) definição dos requerimentos do sistema WIM e de seu teste de aceitação, o que inclui definir a precisão (tolerância) e a confiabilidade das medidas, definir os procedimentos de teste e critérios para aceitação do sistema; (iv) instalação do sistema, que contempla a seleção do melhor sistema WIM ofertado pelo mercado, e a realização do teste de aceitação propriamente dito; (v) uso do sistema WIM, incluindo a coleta e armazenamento dos dados, realização do plano de manutenção e calibração. Nesse sentido, considerando os objetivos desta pesquisa, as seções seguintes têm como base a terceira etapa (iii), sendo apresentados requerimentos de desempenho e procedimentos para avaliação de sistemas WIM.

4.3 REQUERIMENTOS DE DESEMPENHO, PROCEDIMENTOS DE TESTE E AVALIAÇÃO DE SISTEMAS WIM

Segundo Loo & Znidaric (2019), dentre as questões referentes à definição dos requerimentos de desempenho de um sistema WIM, destaca-se o estabelecimento de especificações relativas à mínima precisão (tolerâncias) e à confiabilidade para cada um dos itens requeridos do sistema, conforme a aplicação desejada. Segundo os autores, a adoção de especificações extremamente rigorosas quanto à precisão e confiabilidade pode resultar na não existência, no mercado, de

tecnologias que consigam atingir tais especificações, ou somente a existência daqueles cujos preços tornem inviável sua aquisição. Nesse sentido, os autores entendem ser necessário haver um equilíbrio entre o que de fato é necessário para a aplicação desejada e o que pode ser esperado, na realidade, dos sensores e tecnologias disponíveis, quando em condições normais de uso.

Ainda no tocante à definição da precisão e confiabilidade das medidas decorrentes de sistemas WIM, menciona-se existir como principais documentos internacionais a Especificação Europeia COST 323, de 2002, a Recomendação Internacional OIML R-134-1, de 2006, a Especificação Padrão Norte Americana ASTM-E1318-09, de 2009, e o documento produzido pelo Instituto Metrológico Independente dos Países Baixos, de 2016, o qual é denominado como NMI Padrão Internacional WIM. Entretanto, todos esses documentos apresentam critérios e padrões distintos quanto às precisões ou intervalos de tolerância dos erros, não havendo um consenso e uniformidade quanto à sua aplicação, inclusive no que se refere à pesagem em alta velocidade, haja vista alguns deles sequer prever o uso de sistemas HS-WIM, com foco na fiscalização direta de veículos. Além do mais, cada país pode adotar sua legislação metrológica específica (JACOB *et al.*, 2002; OIML, 2008; ASTM, 2009; BURNOS *et al.*, 2018; LOO & ZNIDARIC, 2019; NMI, 2020). No Brasil, por exemplo, o Regulamento Técnico Metrológico (RTM), em que se estabelecem os Erros Máximos Admissíveis (EMAs) para sistemas de pesagem em movimento, leva em consideração a Recomendação Internacional OIML R-134-1, porém com algumas diferenciações (INMETRO, 2013).

Com relação aos procedimentos para avaliação e aceitação de sistemas WIM, Loo & Znidaric (2019) mencionam haver a necessidade, primeiramente, de definição de veículos de referência, ou seja, a quantidade e tipos dos veículos, sendo tão melhor, em termos de confiabilidade, quanto maior for a variedade e, de forma oposta, com relação aos custos para a realização dos testes. Recomendam, portanto, a utilização dos tipos mais comuns de veículos, que sejam representativos com relação ao tráfego do local. Ainda, os autores destacam quanto à quantidade de passadas dos veículos de referência, inclusive considerando variações de velocidade e posição lateral do veículo na faixa de rolamento (esquerda, centro e direita). Por fim, os autores mencionam sobre o carregamento a ser considerado (vazio, carregado pela metade, ou totalmente carregado), em que, para fins de fiscalização, somente veículos totalmente carregados seriam utilizados e, para avaliações quanto à precisão, seriam utilizados

veículos carregados, que apresentassem centro de gravidade estável quando em movimento, excluindo-se, portanto, carregamentos líquidos ou outras cargas móveis.

No tocante à obtenção do peso de referência, para fins de comparação com o peso a ser obtido a partir dos sensores WIM, Loo & Znidaric (2019) mencionam que o PBT e grupos de eixos dos veículos de referência podem ser determinados por meio da realização de pesagem estática ou em baixa velocidade, em balanças de plataforma, que sejam capazes de pesar os veículos de uma única vez. Já as cargas por eixo podem ser determinadas por meio da realização de pesagem estática ou baixa velocidade, através de balanças de eixo fixas ou portáteis. Diante do breve exposto, nas seções seguintes, são apresentadas parte dos principais documentos internacionais, que contemplam requerimentos de desempenho e procedimentos para a avaliação e aceitação de sistemas WIM, sendo elas: (i) Especificação Europeia COST 323, (ii) Recomendação Internacional OIML R134-1; (iii) Especificação Padrão Norte Americana ASTM E1318-09; (iv) Regulamento Técnico Metrológico (RTM) do INMETRO; e (v) NMI Padrão Internacional WIM.

4.3.1 Especificação Europeia COST 323 (2002)

A Especificação Europeia COST 323 não se constitui como um padrão oficial, mas apresenta recomendações gerais para seleção de locais voltados à instalação de sistemas WIM, sejam eles LS-WIM ou HS-WIM, bem como para a instalação propriamente dita, calibração e avaliação dos sistemas. O documento contempla aspectos estatísticos relacionados à aprovação de modelos, teste para aceitação dos locais de instalação e avaliação de precisão/erro (JACOB *et al.*, 2002). De acordo com Jacob (1997) *apud* Jacob *et al.* (2002), a precisão de um sistema WIM, em sua condição de uso, somente pode ser definida de modo estatístico. Ainda, conforme apontado por Jacob *et al.* (2002), os locais de instalação (sítios de pesagem), tendo em vista o disposto no Quadro 4.1, são definidos em três classes (I- excelente, II – bom e III – aceitável), as quais consideram as condições do pavimento, com base nas deformações permanentes, deflexões e irregularidade.

Quadro 4.1: Classificação dos locais de instalação de sistemas WIM – COST 323

Pavimento			Classes dos sítios WIM		
			I (Excelente)	II (Bom)	III (Aceitável)
Deformação permanente (régua de 3m)		Profundidade máxima (mm)	≤ 4	≤ 7	≤ 10
Deflexão	semi-rígido	Deflexão média (10^{-2} mm)	≤ 15 ± 3	≤ 20 ± 5	≤ 30 ± 10
Quase estático	betuminoso espesso	Deflexão média (10^{-2} mm)	≤ 20 ± 4	≤ 35 ± 8	≤ 50 ± 12
Eixo de 13 t	flexível	Deflexão média (10^{-2} mm)	≤ 30 ± 7	≤ 50 ± 10	≤ 75 ± 15
Deflexão	semi-rígido	Deflexão (10^{-2} mm)	≤ 10 ± 2	≤ 15 ± 4	≤ 20 ± 7
Dinâmico	betuminoso espesso	Deflexão média (10^{-2} mm)	≤ 15 ± 3	≤ 25 ± 6	≤ 35 ± 9
Carga de 5 t	flexível	Deflexão média (10^{-2} mm)	≤ 20 ± 5	≤ 35 ± 7	≤ 55 ± 10
Irregularidade	IRI	Índice (m/km)	0 - 1,3	1,3 - 2,6	2,6 - 4,0
	APL	Taxa NBO	9-10	7 - 8	5-6
Inclinação longitudinal			< 1%	< 2%	< 2%
Inclinação transversal			< 3%	< 3%	< 3%

Fonte: Adaptado de Jacob *et al.* (2002)

Tendo como base o Quadro 4.1, de acordo com as condições do pavimento, na Especificação COST 323 ainda são apresentadas classes de precisão passíveis de serem atendidas em relação às classes definidas para os sítios de pesagem. Tal ponto pode ser observado em consulta ao Quadro 4.2. As classes A(5) e B+(7), por sua vez, no geral, são voltadas para fins legais, ou seja, fiscalização dos limites legais de peso, respeitadas as respectivas especificidades de aplicação (JACOB *et al.*, 2002).

Quadro 4.2: Classes de precisão em relação às classes de sítios de pesagem – COST 323

Classes de precisão	Classes do sítio de pesagem WIM		
	I (excelente)	II (bom)	III (aceitável)
A (5)	Suficiente	Insuficiente	Insuficiente
B+(7)	Suficiente	Insuficiente	Insuficiente
B(10)	Suficiente	Suficiente	Insuficiente
C(15)	Mais que suficiente	Suficiente	Suficiente
D+(20)	Mais que suficiente	Mais que suficiente	Suficiente
D(25)	Mais que suficiente	Mais que suficiente	Suficiente

Fonte: Adaptado de Jacob *et al.* (2002)

No geral, segundo Jacob *et al.* (2002), um sistema WIM pode ser classificado em diferentes classes de precisão, sendo elas definidas em relação à estimativa do peso ou outras referências, como as medidas independentes das forças de impacto. Considerando uma abordagem estatística, para os autores, o intervalo de confiança do erro relativo de uma medida de referência é definido a partir da relação $(W_d - W_s)/W_s$, onde (W_d) se caracteriza pela força de impacto ou carga dinâmica medida pelo sistema WIM, e (W_s) pelo peso estático correspondente ao valor ou medida de referência. Tal intervalo de confiança, centrado no peso estático, é notado

$[-\delta, +\delta]$, onde δ define a tolerância ou comprimento do intervalo de confiança, para um nível de confiança π , ou $1-\alpha$.

Ainda para Jacob *et al.* (2002), qualquer medida individual (PBT, eixo isolado, grupo de eixos ou eixo de um grupo) deve apresentar uma probabilidade π maior que a requerida π_0 de estar contida no intervalo $[W_s (1-\delta); W_s (1+\delta)]$, centrado na carga estática W_s . Estatisticamente, segundo os autores, também significa dizer que o risco de cada medida individual deve ser menor que $(1-\pi_0)$. A tolerância, para os autores, somente depende da classe de precisão e da entidade de medida considerada. Entretanto, o nível de confiança, por sua vez, depende das condições de teste/ensaio e ambientais, considerando os respectivos níveis de repetibilidade e reprodutibilidade. As descrições dos referidos níveis, para as condições de ensaio e ambientais, se encontram sintetizadas no Quadro 4.3. Em sequência, as tolerâncias definidas, conforme as classes de precisão constantes na Especificação Europeia COST 323, constam sintetizadas no Quadro 4.4.

Quadro 4.3: Dependência do nível de confiança – especificações de ensaio – COST 323

Dependência do nível de confiança - especificações de ensaio			
Condições ambientais		Condições de ensaio	
Níveis de repetibilidade (reprodutibilidade)	I	Efetuada durante uma jornada ou alguns dias consecutivos. Condições meteorológicas estáveis. Pouca variação de fatores externos	r1 (repetibilidade estrita)
	II	Desenvolvido em vários dias, semanas consecutivas, ou não. Condições meteorológicas variáveis. Variabilidade de fatores externos durante certa temporada.	r2 (repetibilidade estendida)
			R1 (reprodutibilidade limitada)
III	Desenvolvido por vários dias ou semana, de modo contínuo, espalhados durante um ano ou menos, contemplando a totalidade das condições meteorológicas e da variabilidade de fatores externos.	R2 (reprodutibilidade geral)	

Fonte: Adaptado de Jacob *et al.* (2002)

Quadro 4.4: Tolerância das classes de precisão – Especificação Europeia COST 323

Critério (tipo de medida)	Domínio de utilização	Classes de precisão - largura do intervalo de confiança δ (%)						
		A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)	E
1- Peso total (PBT)	> 3,5 t	5	7	10	15	20	25	> 25
Carga de um eixo:	> 1,0 t							
2- Grupo de eixos	-	7	10	13	18	23	28	> 28
3- Eixo isolado	-	8	11	15	20	25	30	> 30
4- Eixo isolado	-	10	14	20	25	30	35	> 35
Velocidade	> 30 km/h	2	3	4	6	8	10	> 10
Distância entre eixos	-	2	3	4	6	8	10	> 10
Volume de Tráfego	-	1	1	1	3	4	5	> 5

Fonte: Adaptado de Jacob *et al.* (2002)

Na Especificação COST 323, são apresentados procedimentos específicos para o desenvolvimento de ensaios e avaliação de sistemas WIM, quanto à aprovação de modelo, que deve ocorrer para verificar o seu atendimento com relação aos requerimentos de desempenho, como forma de definição de sua classe de precisão e consequente aceitação para a aplicação desejada, bem como no tocante às etapas de verificação inicial, anteriormente à efetiva operacionalização do sistema WIM, e de verificação em serviço, ou seja, após o sistema WIM já ter sido colocado em operação. Todos os procedimentos, por sua vez, levam em consideração as condições de ensaio e ambientais e os respectivos níveis de repetibilidade e reprodutibilidade. No Quadro 4.5, constam apresentados procedimentos gerais contemplados na Especificação Europeia COST 323, que se voltam à análise dos resultados obtidos a partir dos testes (ensaios) realizados, para fins de definição da classe de precisão de um sistema WIM.

Quadro 4.5: Procedimentos para definição da classe de precisão de um sistema WIM – COST 323

Procedimentos para definição da classe de precisão de sistemas WIM	
Etapa	Descrição
1	Dados sobre falhas do sistema ou de seu funcionamento defeituoso, compreendendo a efetiva duração do mencionado funcionamento e os intervalos de tempo entre as falhas.
2	Dados estatísticos considerando a quantidade de veículos registrados corretamente pelo sistema, e a porcentagem daqueles faltantes
3	Análise específica dos valores aberrantes (<i>outliers</i> , pontos extremos) detectados sobre uma base estatística (teste de Dixon)
4	Verificação da normalidade dos resultados, no caso de uma amostra suficientemente grande, sendo a hipótese de normalidade necessária para o cálculo do nível de confiança. A identificação de não normalidade pode significar uma possível disfunção do sistema.
5	Cálculo dos erros relativos com relação ao peso ou carga estática, considerando unidades específicas de referência (PBT, eixos isolados, grupos de eixos, eixos de um grupo): $x_i = \frac{(W_{di} - W_{si})}{W_{si}}$ <p>Onde, W_{di} e W_{si} são, respectivamente, o valor medido em movimento medido pelo sistema WIM e o valor estático de referência da mesma unidade ou entidade. Em sequência, a média (μ) e o desvio padrão (σ), de cada amostra.</p>
6	Estimar o nível de confiança do intervalo centrado em $[-\delta; +\delta]$, utilizando os dados estatísticos da amostra. Define-se o valor mínimo do nível de confiança, denominado como π , com um risco estatístico α , conforme a relação: $\pi = \Phi(u_1) - (u_2)$ <p>Onde,</p> $u_1 = \frac{(\delta - \mu)}{\sigma} - \frac{t_{v,1-\alpha/2}}{n^{1/2}}$ $u_2 = \frac{(-\delta - \mu)}{\sigma} - \frac{t_{v,1-\alpha/2}}{n^{1/2}}$ <p>Sendo que Φ é função de distribuição normal acumulativa de uma variável de <i>Student</i>, $t_{v,1-\alpha/2}$ é a variável de <i>Student</i> a $v = n - 1$ graus de liberdade, e $\alpha = 0,05$</p>

7	<p>O nível de precisão de um sistema de pesagem é estimado utilizando um dos seguintes métodos:</p> <p>(i) Para cada amostra medida, em correspondência a um dos critérios do Quadro 4.4, e para cada classe de precisão proposta (exigida), definida por δ (%), o teste de aceitação é: se $\pi \geq \pi_0$, o sistema é aceito para a classe exigida; se $\pi < \pi_0$, o sistema não pode ser aceito para a classe de precisão proposta, sendo o teste repetido para uma classe inferior;</p> <p>(ii) Consiste em calcular, utilizando a equação apresentada na etapa 6, o $\delta_{min.}$ de δ, para o qual $\pi = \pi_0$. Sequencialmente, é verificado se o $\delta_{min.}$ é inferior ao valor indicado no Quadro 4.4, para classe de precisão e o critério proposto</p>
---	---

Fonte: Adaptado de Jacob *et al.* (2002)

4.3.2 Recomendação Internacional OIML R134-1 (2006)

A Recomendação Internacional OIML R-134-1, de 2006, foi desenvolvida com o objetivo de apresentar requerimentos metrológicos e técnicos de teste para instrumentos automáticos voltados à pesagem em movimento de veículos rodoviários e à medição de cargas por eixo, tendo contemplado, dentre outros pontos, a respeito dos controles metrológicos para aprovação de modelos de sistemas WIM e para as respectivas verificações iniciais e subsequentes (em serviço) (OIML, 2008).

Ainda, tal Recomendação se aplica à instrumentos WIM que sejam instalados em áreas controladas e em locais onde a velocidade do veículo também possa ser controlada. Nesse sentido, a Recomendação traz instruções práticas para a instalação de instrumentos WIM, contemplando a respeito da construção e geometria das estruturas de pista, em que se é recomendado, basicamente, a instalação em pistas estáveis e retilíneas, construídas em concreto de cimento *Portland* ou em outro material igualmente durável, que garanta uma adequada regularidade superficial. No tocante à geometria, é recomendado um comprimento mínimo de pista igual a 16 metros, podendo este ser menor ou maior, a depender do país que opte por utilizar a Recomendação, bem como a depender do comprimento do mais longo veículo a ser pesado (OIML, 2008).

Com relação aos requerimentos metrológicos, na Recomendação OIML R134-1, são previstas seis classes de precisão para a massa do veículo, e seis classes de precisão para as cargas por eixo isolado ou grupos de eixos, sendo que os respectivos limites das classes, a depender da aplicação desejada para o instrumento WIM, podem ser determinados pelas regulamentações nacionais de cada país. Como massa do veículo, a Recomendação define ser a massa total da combinação veicular, incluindo todos os componentes conectados, do qual se depreende

corresponder ao PBT. Tendo como base o exposto, no Quadro 4.6, é apresentada a relação entre as classes de precisão para as cargas por eixo isolado ou grupos de eixos e as classes de precisão para a massa do veículo (PBT).

Quadro 4.6: Classes de precisão – OIML R134-1

Classe de precisão - carga de um eixo isolado ou grupo de eixos	Classe de precisão - massa do veículo					
	0,2	0,5	1	2	5	10
A	✓	✓				
B	✓	✓	✓			
C		✓	✓	✓		
D			✓	✓	✓	
E				✓	✓	✓
F						✓

Fonte: Adaptado de OIML (2008)

Já com relação aos limites de erro, na Recomendação OIML R134-1, é trazido o conceito do denominado valor convencional verdadeiro (de uma quantidade), definido pelo valor atribuído a uma quantidade particular (massa de um veículo de referência ou carga por eixo isolado de um veículo de referência rígido de dois eixos) e aceita, por convenção, como possuindo uma apropriada incerteza para dada finalidade. Ainda, é feita menção ao denominado Erro Máximo Admissível (EMA), que é definido como o extremo valor de um erro permitido por uma especificação. Por último, menciona-se a respeito do denominado Desvio Máximo Admissível (DMA), conceituado como sendo o desvio máximo admissível para qualquer carga por eixo ou grupo de eixos, frente às médias corrigidas correspondentes (OIML, 2008). Nos Quadros 4.7, 4.8 e 4.9, são contemplados, respectivamente, os EMAs, para as condições de verificação inicial e verificação em serviço, referentes à massa total de um veículo (PBT) e a um veículo de referência rígido de dois eixos, e os DMAs correspondentes a quaisquer outros tipos de veículos de referência, com exceção do rígido de dois eixos

Quadro 4.7: Limites de erro para massa total de um veículo carregado ou não - OIML

Classe de precisão para massa total de um veículo	Percentagem do valor convencional verdadeiro da massa total de um veículo (PBT) carregado ou não	
	Verificação inicial	Verificação em serviço
0,2	± 0,10 %	± 0,20%
0,5	± 0,25%	± 0,50%
1	± 0,50%	± 1,00%
2	± 1,00%	± 2,00%
5	± 2,5%	± 5,00%
10	± 5,00%	± 10,00%

Fonte: Adaptado de OIML (2008)

Quadro 4.8: Erro Máximo Admissível para um veículo de referência rígido de dois eixos - OIML

Classe de precisão para carga de um eixo isolado	Percentagem do valor convencional verdadeiro da carga estática de um eixo isolado	
	Verificação inicial	Verificação em serviço
A	± 0,25%	± 0,50%
B	± 0,50%	± 1,00%
C	± 0,75%	± 1,50%
D	±1,00%	± 2,00%
E	± 2,00%	± 4,00%
F	± 4,00%	± 8,00%

Fonte: Adaptado de OIML (2008)

Quadro 4.9: Desvio Máximo Admissível para todos os tipos de veículos de referência com exceção do veículo rígido de dois eixos - OIML

Classe de precisão para carga de um eixo isolado ou grupo de eixos	Percentagem da média corrigida da carga de um eixo isolado ou média corrigida da carga de um grupo de eixos	
	Verificação inicial	Verificação em serviço
A	± 0,50%	±1,00%
B	±1,00%	±2,00%
C	±1,50%	±3,00%
D	±2,00%	±4,00%
E	±4,00%	± 8,00%
F	± 8,00%	± 16,00%

Fonte: Adaptado de OIML (2008)

O controle metrológico de um instrumento WIM, segundo OIML (2008), deve ocorrer em consonância com a legislação nacional de cada país, contemplando a aprovação de modelo, verificação inicial, verificações subsequentes (em serviço) e inspeções em serviço e, ainda, em caso de o instrumento ser utilizado, de modo automático, para fins de fiscalização, é recomendado que cada país, mediante legislação específica, contemple métodos de verificação e avaliação mais extensos que aqueles presentes na Recomendação OIML R134-1. Nesse sentido, entretanto, a aceitação de instrumentos WIM, com foco na aprovação de modelos, prevê, conforme a OIML (2008), o seguimento de alguns procedimentos gerais, os quais se encontram sintetizados no Quadro 4.10.

Quadro 4.10: Procedimentos gerais para avaliação metrológica de um instrumento WIM - OIML

Procedimentos		
Item	Etapa	Descrição
1	Documentação	Devem ser apresentados documentos que forneçam as seguintes informações:

		<ul style="list-style-type: none"> (i) Características metrológicas do instrumento; (ii) Conjunto padrão de especificações; (iii) Descrição funcional dos componentes e dispositivos; (iv) Desenhos, diagramas e informações gerais de <i>software</i> (se aplicáveis) e explicações de construção e operação; (v) Qualquer documento ou evidência que demonstre que o desenho e a construção do instrumento se encontram de acordo com os requerimentos contemplados na Recomendação.
2	Avaliação (Requerimentos Gerais)	<p>A avaliação deve ser conduzida em pelo menos um, e não mais que três, instrumentos WIM que representem o modelo definitivo. Pelo menos um dos instrumentos deve ser completamente instalado em um sítio (local) típico, e pelo menos um, ou a maior parte de seus componentes, deve ser submetido a testes de simulação em laboratório, respeitando os seguintes pontos de procedimentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Avaliar se o instrumento WIM se encontra de acordo com os requerimentos metrológicos apresentados nos Quadros 4.7, 4.8 e 4.9 desta dissertação, especialmente com relação aos limites de erros (Quadro 4.7) – Cláusula 2 da Recomendação, utilizando os tipos de veículos de referência contemplados no item 6.5 da Recomendação, e se o instrumento se encontra de acordo com as condições operacionais informadas pelo fabricante; 2- A autoridade metrológica deve conduzir os testes de modo a impedir: <ul style="list-style-type: none"> (i) o uso desnecessário de recursos; (ii) permitir que os resultados dos testes sejam avaliados para a verificação inicial do instrumento; (iii) garantir que um instrumento não automático, de pesagem estática, para pesagem dos veículos de referência e obtenção dos valores convencionais verdadeiros, esteja (certificado) de acordo com o item 2.2.2 da Recomendação, atendendo aos requisitos de desempenho de pesagem constantes na OIML R-76-1.
2.1	Testes em movimento	<p>Um instrumento WIM completo deve ser testado em consonância com os métodos de teste constantes na Cláusula 6 da Recomendação, usando tipos e quantidades de veículos que sejam representativos aos veículos relativos ao local em que se pretende instalar o sistema WIM. Deve contemplar, também, no mínimo, outros dois tipos de veículos de referência, podendo eles ser um rígido de três/quatro eixos, ou um articulado de quatro ou mais eixos, ou um rígido de dois/três eixos com um reboque de dois/três eixos. Para a determinação do valor convencional verdadeiro deve ser utilizado um veículo de referência rígido de dois eixos.</p>
2.2	Avaliação e interpretação dos erros e desvios para aceitação de um instrumento WIM	<ol style="list-style-type: none"> 1- Erro de pesagem (massa total – PBT): obtido a partir da massa do veículo de referência observada menos o valor convencional verdadeiro correspondente à massa do veículo de referência. O EMA deve estar em conformidade com o disposto no Quadro 4.7, para a verificação inicial, e apropriado à classe de precisão do instrumento, para 100% das medidas. 2- Erro (carga de um eixo isolado) com relação ao veículo rígido de referência de dois eixos: obtido a partir da carga do eixo isolado observado menos o valor convencional verdadeiro referente à carga estática de referência de um eixo isolado correspondente. O EMA deve estar em conformidade com o disposto no Quadro 4.8, para verificação inicial, e apropriado à classe de precisão do instrumento, para 100% das medidas.

		<p>3- Desvio (carga de um eixo isolado) com relação ao eixo de outro tipo de veículo de referência: obtido a partir da carga do eixo isolado observado menos a média corrigida da carga correspondente a um eixo isolado do veículo de referência. O DMA deve estar em conformidade com o disposto no Quadro 4.9, e apropriado à classe de precisão do instrumento, para 100% das medidas.</p> <p>4- O ponto 3 também é utilizado para a obtenção dos desvios relativos à carga de um grupo de eixos.</p>
--	--	---

Fonte: Adaptado de OIML (2008)

4.3.3 Especificação Padrão Norte Americana (ASTM E1318-09) (2009)

A Especificação Padrão Norte Americana ASTM E1318-09 aborda sistemas WIM em rodovias, bem como se volta à apresentação de requerimentos e métodos de teste e requisitos e condições ideais de pavimento, tendo como foco principal a coleta de dados de tráfego e a pré-seleção de veículos. Entretanto, assim como na Especificação COST 323 e na Recomendação Internacional OIMLR134-1, tal Especificação prevê ser de responsabilidade do usuário determinar a aplicabilidade das limitações regulatórias antes do uso da ASTM E1318-09 (ASTM, 2009). Ainda de acordo com ASTM (2009), cada tipo de sistema WIM deve ser especificado em consonância com as necessidades de aplicação indicadas pelo usuário. Nesse sentido, na ASTM E1318-09, são previstos quatro tipos de sistemas WIM, sendo que cada um deles é definido quanto às possibilidades de instalação, bem como com relação à velocidade de operacionalização e, também, no tocante aos dados a serem adquiridos. Os tipos e condições de operacionalização e aquisição dos dados podem ser observados em consulta ao Quadro 4.11.

Quadro 4.11: Tipos de sistemas WIM e os dados de aquisição do sistema - ASTM

Item	Dados de aquisição do sistema WIM para cada veículo	Sistemas WIM			
		Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
		Uma ou mais faixas no local de coleta de dados de tráfego (estatístico) - 16 a 130 km/h	Uma ou mais faixas no local de coleta de dados de tráfego (estatístico) - 24 a 130 km/h	Uma ou mais faixas, fora ou na da rodovia, para pré-seleção de veículo - 16 a 130 km/h	Não aprovado pelos EUA. Deve ser projeto para uso em estações de fiscalização (ambiente controlado) - 3 a 16 km/h
1	Carga por roda	✓	-	✓	✓
2	Carga por eixo	-	✓	✓	✓
3	Carga por grupo de eixos	-	✓	✓	✓
4	Carga total do veículo (PBI)	-	✓	✓	✓
5	Velocidade	✓	✓	✓	✓
6	Distância entre eixos (centro a centro)	✓	✓	✓	✓
7	Classe do veículo - via composição dos eixos	-	✓	-	-
8	Código de identificação do local	✓	✓	✓	✓
9	Faixa e direção de tráfego	✓	✓	✓	-
10	Data e horário da passagem	✓	✓	✓	✓
11	Número sequencial de registro do veículo	✓	✓	✓	✓
12	Distância entre eixos (eixo dianteiro ao extremo eixo traseiro)	-	✓	-	-
13	Cargas equivalentes a um eixo isolado - padrão (ESALs)	-	✓	-	-
14	Código de violação	-	✓	✓	✓

Fonte: Adaptado de ASTM E11318-09

Com relação aos requerimentos de desempenho, destacam-se alguns conceitos. A precisão, segundo ASTM (2009), consiste na proximidade ou grau de concordância, em termos de satisfação da tolerância declarada e da percentagem de conformidade, entre o valor medido ou estimado por um sistema WIM e um valor de referência aceito. A tolerância, por sua vez, se define pelo limite permitido para um valor medido ou estimado com relação ao valor de referência aceito. Nesse sentido, no Quadro 4.12, constam as tolerâncias e os requerimentos de desempenho definidos para os quatro tipos de sistemas WIM.

Quadro 4.12: Requerimentos de desempenho (tolerâncias) – sistemas WIM - ASTM

Função	Tolerâncias para 95% de conformidade (nível de confiança)				
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	
				Valores \geq (Kg)*	\pm (kg)
Carga por roda	$\pm 25\%$	-	$\pm 20\%$	2.300	100
Carga por eixo	$\pm 20\%$	$\pm 30\%$	$\pm 15\%$	5.400	200
Carga por grupo de eixos	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	11.300	500
PBT	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 6\%$	27.200	1.100
Velocidade	± 2 km/h				
Espaço entre eixos	$\pm 0,15$ m				

*Valores menores não são preocupação usual na fiscalização

Fonte: Adaptado de ASTM (2009)

De acordo com ASTM (2009), existem condições ideais para instalação dos sistemas WIM, os quais se fazem apresentados no Quadro 4.13. Ainda, são definidos os procedimentos gerais para a avaliação dos resultados obtidos a partir de sistemas WIM, visando à aceitação de seu modelo e à sua calibração. Os procedimentos para avaliação dos resultados provenientes do sistema WIM sob teste constam apresentados no Quadro 4.14.

Quadro 4.13: Requerimentos dos pavimentos dos sítios de instalação dos sistemas WIM - ASTM

Principais critérios dos pavimentos**	Tipos de sistemas WIM			
	I	II	III	IV
1- Alinhamento horizontal (Raio de curvatura da faixa 60 m antes e 30 m depois dos sensores instalados)	$\geq 1,7$ km	$\geq 1,7$ km	$\geq 1,7$ km	$\geq 1,7$ km
2- Alinhamento longitudinal (perfil) - (Grandiente longitudinal da superfície 60 m antes e 30 m depois dos sensores)	$\leq 2,0\%$	$\leq 2,0\%$	$\leq 2,0\%$	$\leq 1,0\%$
3- Inclinação transversal - (Inclinação lateral 60 m antes e 30 m depois dos sensores)	$\leq 3,0\%$	$\leq 3,0\%$	$\leq 3,0\%$	$\leq 1,0\%$
4- Largura da faixa e marcações - (Largura da faixa 60 m antes e 30 m depois dos sensores)	$\leq 3,6$ e $\geq 4,3$ m	$\leq 3,6$ e $\geq 4,3$ m	$\leq 3,6$ e $\geq 4,3$ m (100 - 150 mm)***	$\leq 3,6$ e $\geq 4,3$ m (100 a 150 mm)***
5- Regularidade superficial (60 m antes e 30 m depois dos sensores)	$\varnothing \leq 150$ mm; $e^* \leq 3$ mm	$\varnothing \leq 150$ mm; $e^* \leq 3$ mm	$\varnothing \leq 150$ mm; $e^* \leq 3$ mm	$\varnothing \leq 150$ mm; $e^* \leq 3$ mm

*e= espessura; **Pavimentos rígidos são tidos como os ideais pela ASTM E1318-09, podendo ser na solução de pavimento continuamente armado, ou com juntas transversais espessadas em 5m; ***Marcações sólidas nas extremidades dos pavimentos das faixas/pistas.

Fonte: Adaptado de ASTM (2009)

Quadro 4.14: Procedimentos para avaliação e aceitação do sistema WIM – ASTM

Procedimentos		
Item	Etapa	Descrição
1	Escolha e avaliação do sítio de pesagem	A escolha e a avaliação do sítio de pesagem devem atender aos requisitos constantes no Quadro 4.13 desta dissertação. O local deve contemplar, para fins de teste, instalações/instrumentos voltados à pesagem estática de veículos de teste. Tais instrumentos devem ser localizados em distância razoável ao sistema WIM a ser testado, de modo que o tráfego possa ser controlado e os 2 veículos testes possam retornar para múltiplas passadas. Todas as condições para teste do sistema WIM devem seguir somente mediante autorização e concordância das autoridades competentes.
2	Instalação do sistema WIM	Deve ocorrer em consonância com as recomendações do fabricante, sendo executados os procedimentos de calibração necessários conforme a Especificação.
3	1º Teste de unidade para avaliação de cargas	<p>1-Utilização de 2 veículos de teste, previamente pesados estaticamente, nas condições estabelecidas pela Especificação, sendo registrados os valores de referência, conforme os requerimentos de desempenho constantes no Quadro 4.12 desta dissertação.</p> <p>2-Posteriormente, cada veículo de teste deverá realizar 5 passadas sobre os sensores do sistema WIM, em 2 velocidades diferentes. Em cada velocidade, os pneus de cada veículo deverão realizar uma ou mais passadas no lado extremo esquerdo da faixa de rolamento, e uma ou mais passadas no lado extremo direito. As demais passadas deverão ocorrer no centro da faixa.</p> <p>3-As medidas obtidas para cada veículo de teste deverão ser registradas em correspondência às medidas de referência obtidas e registradas quando da pesagem estática.</p>
4	Cálculo e interpretação relativos ao 1º teste de unidade	<p>1-Para cada função discriminada no Quadro 4.12, deve-se calcular a diferença ou a diferença percentual do valor estimado pelo sistema WIM e do correspondente valor de referência, usando a seguinte relação:</p> $d = 100 \times \left[\frac{C - R}{R} \right]$ <p>Onde “d” é a diferença de carga ou peso, referente ao valor obtido ou estimado pelo sistema WIM e o valor de referência correspondente (estático); “C” é o valor obtido ou estimado pelo sistema WIM, e “R” é o valor de referência correspondente (estático) do item ou função a ser analisada. As diferenças “d” (%) são comparadas com as tolerâncias definidas no Quadro 4.12.</p> <p>2- Determinar o número calculado das diferenças (%) que excedem as tolerâncias definidas no Quadro 4.12, sendo tal número, para cada item ou função, expresso em termos percentuais (%) com relação ao total de números observados para cada item/função, conforme a seguinte relação:</p> $P_{de} = 100 \left[\frac{n}{N} \right]$ <p>Onde “P_{de}” é porcentagem das diferenças calculadas que excedem as tolerâncias definidas no Quadro 4.12; “n” é o número das diferenças que excedem as tolerâncias; e “N” é número total de valores observados.</p>

		3-Interpretação do cálculo: Se $P_{de} > 5\%$ para as funções e itens avaliados, o sistema WIM é declarado disfuncional e impreciso e, portanto, tendo falhado no teste para aprovação do modelo.
5	2º teste de unidade para avaliação de cargas	<p>Mesmo se em caso de eventual declaração de imprecisão do sistema WIM, o usuário decida pela continuidade do teste para aprovação de modelo, o nível de confiança de 95%, para os novos resultados a serem obtidos, deverá ser atendido para aprovação do modelo dos sistemas WIM. Para tanto, seguem-se os procedimentos:</p> <p>1-Adicionalmente às pesagens realizadas para os dois veículos de teste, outros 51 veículos, a serem retirados do próprio tráfego local, deverão ser pesados no sistema WIM, em velocidade normal, e, também, deverão ser parados, para a realização de pesagem estática, por meio de instrumento (estático) a ser localizado antes ou depois do sistema WIM. Deverão ser coletados dados referentes às funções ou itens discriminados no Quadro 4.12, com exceção da carga por roda. As classes dos veículos a serem retirados do tráfego e as respectivas quantidades constam estabelecidas na Especificação.</p> <p>2-Depois a coleta e registro dos dados relativos às funções a serem avaliadas, deverão ser realizados os cálculos e interpretações, conforme discriminado no item 4 deste Quadro.</p>

Fonte: Adaptado de ASTM (2009)

4.3.4 Regulamento Técnico Metrológico (RTM) – INMETRO:

O RTM em vigor, no Brasil, e o qual foi aprovado por meio da Portaria INMETRO nº 375/2013 e alterado pela Portaria INMETRO nº 47/2016, tem como base a Recomendação Internacional OIML R134-1, sendo estabelecidos, principalmente, os requisitos metrológicos e o controle metrológico legal aplicado aos instrumentos de pesagem automáticos de veículos rodoviários em movimento, então voltados à determinação do PBT e das cargas por eixo ou grupo de eixos, para fins de fiscalização (INMETRO, 2013; INMETRO, 2016). O INMETRO (2013) ainda apresenta os conceitos de EMAs relativos ao PBT, carga por eixo isolado de um veículo rígido de dois eixos, e carga por eixo isolado ou por grupo de eixos de todos os outros veículos, definindo-os, sinteticamente, como a diferença máxima entre a medida avaliada, obtida a partir do ensaio em movimento, e o valor convencional verdadeiro, obtido com base nas medidas decorrentes de pesagens estáticas do veículo de referência. Nesse sentido, os EMAs, para as condições de aprovação de modelo, verificação inicial, subsequentes e em serviço, são apresentadas no Quadro 4.15.

Quadro 4.15: Erros Máximos Admissíveis (EMAs) – INMETRO

Erros Máximos Admissíveis - EMAs				
Parâmetro	Avaliações			
	Aprovação de modelo	Verificação inicial	Verificação Subsequente	Inspeção em serviço
1- PBT: determinado por pesagem em movimento	± 2,5%	± 2,5%	± 2,5%	± 3,0%
2- Carga por eixo isolado de um veículo de referência rígido de dois eixos: (diferença máxima entre a carga por eixo indicada no ensaio em movimento e o valor convencional verdadeiro da carga estática de referência)	± 4,0%	± 4,0%	± 4,0%	± 5,0%
3- Carga por eixo isolado ou grupo de eixos de todos os outros veículos de referência: (diferença máxima entre a carga por eixo indicada no ensaio em movimento e a média corrigida da carga por eixo isolado ou por grupo de eixos)	± 4,0%	± 4,0%	± 4,0%	± 5,0%
*Conforme as informações constantes na Portaria de Aprovação do Modelo, as verificações subsequentes, a partir da verificação inicial, têm validade de, no máximo, um ano. Anteriormente ao vencimento da validade especificada nos certificados de verificação, o instrumento deve passar por nova verificação do INMETRO.				

Fonte: Adaptado de INMETRO (2016)

O INMETRO (2013) menciona que todo instrumento somente pode ser utilizado se estiver em conformidade com o modelo aprovado pelo INMETRO, sendo que, para a aprovação, ressalta ser necessário o seguimento de procedimentos e critérios estabelecidos pelo próprio Instituto, em regulamentação técnica metrológica específica, bem como em normas internas de procedimentos específicos, devendo a apreciação técnica ser executada em pelo menos um instrumento completo. Tendo como base INMETRO (2013) e INMETRO (2017), seguem, no Quadro 4.16, os procedimentos para avaliação de sistemas e instrumentos WIM.

Quadro 4.16: Procedimentos para ensaio e avaliação de sistemas WIM com relação às massas e cargas - INMETRO

Procedimentos		
Item	Etapa	Descrição
1	Método de ensaio (teste)	<p>1-Utilização de instrumento de pesagem não automático (de pesagem estática) certificado pelo INMETRO, para obtenção dos valores convencionais verdadeiros de referência, cujas medidas são aceitas quando não excedem 1/3 dos EMAs;</p> <p>2-O ensaio em movimento deve ser realizado no local de instalação, com pelo menos um instrumento correspondente ao modelo;</p> <p>3-Utilização de veículos de referência (que seja representativo com relação ao tráfego local e que contenham um veículo rígido de 3 eixos, um veículo rígido de 5 eixos, um veículo rígido de 6 eixos e um veículo articulado de 7 eixos), sendo adotada a quantidade de: (i) 4 veículos, para verificação inicial; (ii) 3 veículos, para verificação subsequente;</p> <p>4-Adoção de 3 velocidades com tolerâncias de: +2 km/h; ± 2 km/h e -2km/h;</p>

		<p>5-Consideração de carregamento de 80% a 100% da capacidade de cada veículo, sem a exceder a capacidade máxima;</p> <p>6-Obtenção de pelo menos 5 medições válidas para cada situação de velocidade, totalizando 60 medições para a verificação inicial e 45 para a subseqüente.</p>
2	Cálculo	<p>1-Procedimento de cálculo:</p> $Er\% = \left(\frac{MV_i - VVC}{VVC} \right) \times 100 \quad (1)$ $\overline{MV} = \frac{\sum_i^n MV}{n} \quad (2)$ $ErroSistemático = \frac{VVC}{\overline{MV}} \quad (3)$ $\overline{Eixo_iCorrigido} = \overline{Eixo_i} \times \frac{VVC}{\overline{MV}} \quad (4)$ $\overline{Conjunto_iCorrigido} = \overline{Conjunto_i} \times \frac{VVC}{\overline{MV}} \quad (5)$ <p>Onde \overline{MV} é o valor médio da massa total (PBT) do veículo em movimento; $\overline{Eixo_iCorrigido}$ é valor médio corrigido para a carga de um eixo isolado; e $\overline{Conjunto_iCorrigido}$ é o valor médio corrigido da carga por grupo (conjunto) de eixos.</p> <p>2-Ressalta-se que a equação (1) se faz como equação padrão, devendo os valores de MV_i e VVC serem substituídos conforme o parâmetro de avaliação definido no Quadro 4.15, tendo em vista as formas de obtenção das médias corrigidas estabelecidas pelas equações (4) e (5), especificamente para o caso do parâmetro 3 discriminado no Quadro 4.15.</p>
3	Interpretação dos resultados	<p>Os Erros relativos, obtidos conforme a equação (1), da etapa 2, considerando os parâmetros 1, 2 e 3, do Quadro 4.15, deverão ser menores que os EMAs estabelecidos, para 100% das medidas válidas registradas, nas situações de avaliações especificadas no mesmo Quadro.</p>

Fonte: Adaptado de INMETRO (2013), INMETRO (2016) e INMETRO (2017)

4.3.5 NMi Padrão Internacional WIM:

O Instituto Independente de Metrologia dos Países Baixos, conhecido pela sigla NMi, publicou, em 2019, o denominado NMi Padrão Internacional WIM. Tal publicação ocorreu sob a justificativa de que, por muitos anos, apenas três documentos internacionais (Especificação COST 323, OIML R134-1 e a ASTM E1318-09) têm sido utilizados para determinar o desempenho de sistemas WIM (NMi, 2019). Segundo NMi (2019), ainda, os três referidos documentos apresentam vantagens e desvantagens específicas. Como uma das desvantagens, é citado que nenhum dos documentos tratam todas as aplicações e condições operacionais de

sistemas WIM, como por exemplo, a fiscalização direta da sobrecarga transportada, o que implica que as autoridades locais de cada país desenvolvam suas próprias especificações e procedimentos de teste.

Como consequência, segundo o NMI (2019), tem sido gerada uma série de requerimentos de desempenho de sistemas WIM, que não são compatíveis entre si e, inclusive, complicados de serem aplicados em termos práticos. Todas essas divergências, por sua vez, para o NMI (2019), têm resultado em esforços e custos desnecessários por parte de fabricantes (vendedores) e de usuários (autoridades locais). Nesse sentido, o NMI (2019) propõe uma nova especificação, que contempla o uso de sistemas WIM (LS-WIM e HS-WIM), para fins de uso estatístico e legal (fiscalização).

Considerando a instalação de sistemas WIM em rodovias, na especificação publicada pelo NMI (2019), são estabelecidos alguns critérios e requerimentos geométricos a serem atendidos com relação ao pavimento em que se fará instalado o sistema WIM, para um segmento compreendido entre 200 metros anteriores ao sistema e 50 metros posteriores ao seu local de instalação. Ainda, o local deve se encontrar livre de interferências construtivas que provoquem solavancos dos veículos, devido a mudanças repentinas de inclinações, ou que possibilitem constante alternância entre as faixas de rolamento, além de alterações de velocidade (aceleração, desaceleração) (NMI, 2019). Os requerimentos geométricos podem ser observados em consulta ao Quadro 4.17.

Quadro 4.17: Requerimentos geométricos do sítio de instalação de sistemas WIM - NMI

Pavimento			Critério
Deformação permanente (régua de 3m)		Profundidade máxima (mmm)	≤ 4
Deflexão	semi-rígido	Deflexão média (mmm)	≤ 15
Quase estático	betuminoso espesso	Deflexão média (mmm)	≤ 20
Eixo de 13 t	flexível	Deflexão média (mmm)	≤ 30
Deflexão	semi-rígido	Deflexão (mm)	≤ 10
Dinâmico	betuminoso espesso	Deflexão média (mmm)	≤ 15
Carga de 5 t	flexível	Deflexão média (mmm)	≤ 20
Irregularidade	IRI	Índice (m/km)	< 1,3
	APL	Taxa NBO	9-10
Inclinação longitudinal			< 1%
Inclinação transversal			< 3%

Fonte: Adaptado de NMI (2019)

No que se refere à utilização de sistemas WIM, para fins legais (fiscalização), NMi (2019) estabelece requerimentos metrológicos de desempenho relativos à quatro classes de precisão, tendo em vista os parâmetros a serem avaliados, conforme se verifica no Quadro 4.18. Não diferente do que se é apresentado na Recomendação Internacional OIML R134-1 e no RTM elaborado pelo INMETRO, o NMi (2019) também trabalha com o conceito de Erro Máximo Admissível (EMA) da medida relativa do erro, o qual deve incluir 100% das medidas.

Quadro 4.18: Erros Máximos Admissíveis (EMAs) - NMi

Parâmetro	EMAs			
	Classe de precisão			
	L (3)	L (5)	L (7)	L (10)
PBT	± 3	± 5	± 7	± 10
Carga por grupo de eixos	± 5	± 8	± 11	± 15
Carga por eixo	± 7	± 10	± 15	± 20

Fonte: Adaptado de NMi (2019)

Tendo como base o Quadro 4.18, de acordo com NMi (2019), a faixa de pesagem mínima para as medições de PBT deve ser superior a 3.500 kg, enquanto, para as medições de carga por eixo, a faixa de pesagem mínima deve ser de 2.000 kg a 15.000 kg. Com relação aos testes de pesagem em movimento, especificamente para a aprovação de modelo de sistemas WIM, os procedimentos a serem adotados, conforme NMi (2019) constam sintetizados no Quadro 4.19.

Quadro 4.19: Procedimentos para avaliação de sistemas WIM quanto às medidas de carga - NMi

Item	Etapa	Descrição
1	Teste de pesagem em movimento	<p>1-Veículo de referência: devem ser utilizados no mínimo 3 veículos que sejam representativos com relação ao local de instalação do sistema WIM;</p> <p>2-Balança de referência: o PBT e as cargas por eixo ou grupo de eixos dos veículos de referência devem ser determinados a partir do uso de balanças de plataforma fixas, balanças portáteis ou sistemas LS-WIM, que sejam capazes de medir todo o veículo de uma única vez, com um erro que seja menor ou igual a 1/3 do EMA definido conforme o Quadro 4.17;</p> <p>3- O PBT é obtido a partir da pesagem em uma balança de plataforma de uma única vez. A carga por eixo de cada eixo do veículo de referência é determinada sequencialmente, sendo utilizada uma balança de referência, com no mínimo 3 passadas nas duas direções. A média da carga por eixo é calculada como a média aritmética dos valores registrados. A média corrigida do valor da carga de referência, por eixo, é calculada a partir da seguinte equação:</p>

		$CorrAxle_i = Axle_i \times \frac{VM_{ref}}{VM}$ <p>Onde, VM_{ref} é o valor de referência do PBT determinado pela balança de plataforma, e VM é a soma dos valores médios dos eixos individuais. A média corrigida do valor de carga por eixo ($CorrAxle_i$) é utilizada como valor de referência para cada eixo do veículo de referência.</p>
2	<p>Teste e interpretação da precisão da pesagem em movimento</p>	<p>1-Teste de passadas: cada veículo de referência deve realizar no mínimo 30 passadas sobre o sistema WIM, em cada uma das seguintes velocidades : (i) 5 passadas próximas da velocidade máxima de operação; (ii) 5 passadas próximas da velocidade mínima de operação; (iii) 20 passadas próximas da velocidade média da faixa de velocidade de operação. Os resultados somam no mínimo 90 passadas. A velocidade do veículo, por sua vez, deve ser mantida constante na medida do possível durante as passadas.</p> <p>2-Resultados do teste: os valores das medidas de PBT e de carga por eixo são registrados. Para cada valor registrado (PBT, carga por eixo ou grupo de eixos), calcula-se o erro relativo E (%), conforme a seguinte equação:</p> $E\% = \left(\frac{C - R}{R} \right) \times 100$ <p>Onde C é o valor medido pelo sistema WIM, e R é o valor de referência correspondente medido por meio da balança (instrumento) de referência.</p> <p>3-Interpretação: para a aceitação do sistema WIM, nenhum dos erros relativos devem exceder 50% dos EMAs especificados no Quadro 4.17 desta dissertação.</p>

Fonte: Adaptado de NMi (2019)

4.3.6 Tópico Complementar

Nas seções de 4.3.1 a 4.3.5, foram realizadas exposições contemplando cinco documentos internacionais voltados à avaliação de sistemas WIM, para diversas aplicabilidades. Todos esses documentos apresentam critérios e requerimentos, mesmo que mínimos, relativos aos pavimentos e às pistas para a instalação de sistemas WIM. Da mesma forma, todos os documentos internacionais discriminados apresentam classes de precisão e/ou tolerâncias previamente estabelecidas, tendo como base a aplicação desejada para o sistema WIM. Também levam em consideração a adoção de critérios relacionados à variabilidade e representatividade de veículos de referência, para a obtenção de medidas de referência, além também de critérios relacionados à consideração de diferentes velocidades e de quantidade mínima de passadas pelos sistemas WIM.

Entretanto, apenas a Especificação COST 323 e o denominado NMI Padrão Internacional WIM, por sua vez, expressamente declaram viabilizar a avaliação de sistemas HS-WIM. Ainda, no que refere à avaliação dos resultados dos testes e ensaios voltados à classificação da precisão e das tolerâncias de sistemas WIM, com foco em sua aceitação (aprovação), apenas a Especificação COST 323 apresenta um caráter estatístico de experimentação e inferência estatística, que possibilita a verificação quanto ao atingimento de tolerâncias e de intervalos de confiança, sendo a interpretação da avaliação fundamentada na comparação com base em intervalos de confiança ou em erros estatísticos amostrais.

Ainda, ressalta-se que nenhuma das especificações apresentam requisitos ou requerimentos voltados à definição de tolerâncias propriamente ditas, as quais se mostram previamente estabelecidas, a depender do que cada país considera necessário de ser respeitado quanto à obtenção das medidas de peso e a depender da aplicabilidade requerida pelo usuário (órgãos e/ou entidades competentes). Do exposto, o Capítulo seguinte contempla o método do trabalho. Tal método, então baseado em métodos estatísticos de experimentação, leva em consideração alguns requisitos identificados conforme referências bibliográficas. Entretanto, diferentemente dos documentos internacionais, não pré-estabelece tolerâncias às medidas de peso a serem obtidas por meio do uso de sistemas de pesagem.

5 MÉTODO

Neste Capítulo é apresentado o método proposto para o desenvolvimento da pesquisa e, portanto, para a definição dos limites de tolerância de peso de veículos comerciais pesados a partir de sistemas de pesagem em alta velocidade. É proposta a execução de um sequenciamento metodológico, o qual se encontra apresentado no fluxograma exposto na Figura 5.1. Tal sequenciamento contempla três fases, as quais consistem na definição do local a ser utilizado para teste, na realização de testes em campo e aquisição dos dados e na análise dos dados coletados, então resultantes dos testes de campo. As fases definidas pela realização de testes em campo e pela análise dos dados são compostas por etapas, as quais também estão explícitas na Figura 5.1.

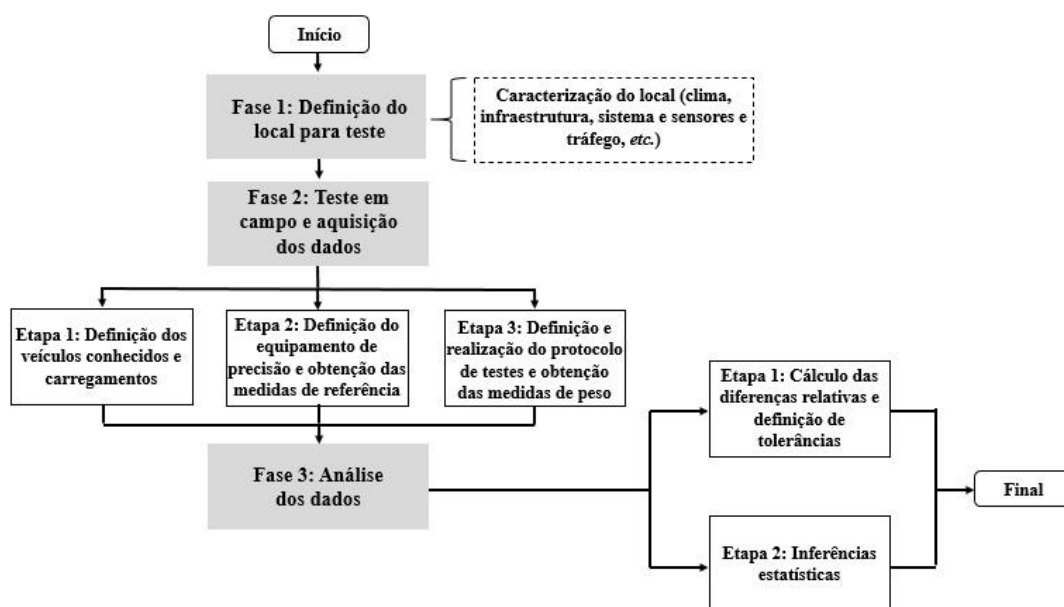


Figura 5.1: Sequenciamento metodológico

5.1 FASE 1: DEFINIÇÃO DO LOCAL PARA TESTE

Os locais a serem definidos para a realização de testes de campo devem ser indicados pelas autoridades competentes pela fiscalização de veículos comerciais pesados e pela manutenção das rodovias sob sua circunscrição, uma vez tais órgãos ou entidades detêm o conhecimento quanto aos locais que necessitam de serem fiscalizados com relação aos excessos de carga praticados. Ainda, a definição dos locais para teste deve ocorrer de modo que eles sejam representativos, principalmente, com relação ao tráfego e quanto ao clima e condições ambientais dos locais ou regiões que se caracterizam como requeridos ao desenvolvimento de

atos de fiscalização por meio do uso de instrumentos de pesagem em alta velocidade, sendo tão melhor quanto maior for a abrangência de locais e/ou de regiões para teste.

Conforme exposto nos Capítulos 2 e 4, as estruturas de pavimentos utilizadas para a instalação de tecnologias relativas aos sensores de peso são parte componente dos sistemas WIM. Ainda, a interação tráfego-pavimento-sensor, acarreta a necessidade de que sejam estabelecidos critérios a serem atendidos pelas estruturas dos pavimentos, a depender da aplicabilidade e finalidade previstas para os sistemas WIM, bem como a depender da admissibilidade dos órgãos ou entidades quanto à precisão e à confiabilidade dos dados a serem obtidos por meio desses sistemas. Nesse sentido, a definição do local a ser utilizado para teste deve adequadamente atender aos critérios geométricos e de desempenho previamente estabelecidos para diferentes estruturas de pavimentos, o que pressupõe a necessidade de adoção de especificações e/ou normas nacionais ou internacionais que estabeleçam condições mínimas a serem atingidas por essas estruturas, em compatibilidade ao uso de equipamentos de pesagem em alta velocidade.

No que se refere ao clima e às condições ambientais, de acordo com Souza *et al.* (2019), além de a temperatura ambiente, variáveis climáticas, como a umidade e a radiação solar têm relação de influência com a temperatura do pavimento, porém em diferentes níveis. Ainda, conforme apresentado no Capítulo 4, forças transversais devido ao vento podem influenciar a aerodinâmica de veículos comerciais pesados em movimento e, a depender da geometria do sensor e de sua condição de uso, impactar para o surgimento de erros. Nesse sentido, para o período de realização dos testes de campo, informações adicionais a respeito da umidade, radiação solar, direção e velocidade do vento podem ser obtidas junto aos institutos meteorológicos locais e/ou regionais, a fim de mais bem caracterizar o clima e as condições ambientais do local foco de estudo, e que podem, por sua vez, influenciar nas medidas de peso e em suas incertezas (erros).

Ainda levando em consideração as informações apresentadas nos Capítulos 2 e 4, a definição e caracterização do local para teste deve considerar a máxima possível variabilidade não somente de estruturas de pavimento, mas também de tecnologias relativas aos sensores WIM de peso disponíveis no mercado.

5.2 FASE 2: TESTE EM CAMPO E AQUISIÇÃO DOS DADOS

Tendo como base a Figura 5.1, a fase relativa à realização de teste em campo e aquisição dos dados é composta por três etapas, as quais se dividem na definição dos veículos conhecidos (referência) e de seus respectivos carregamentos, na definição do equipamento ou instrumento de pesagem de precisão, que será utilizado para a obtenção das medidas de peso de referência, e na definição e realização do protocolo de testes para avaliação de sistemas HS-WIM. Nesse sentido, as seções seguintes contemplam as descrições relativas às etapas mencionadas.

5.2.1 Etapa 1: Definição dos Veículos Conhecidos e Carregamentos

Devem ser definidos no mínimo dois veículos conhecidos, para a obtenção das medidas de peso de referência e, por conseguinte, para a realização do protocolo de testes voltado à avaliação de sistemas HS-WIM, quanto a diferentes parâmetros. A definição dos veículos conhecidos deve priorizar a máxima possível variabilidade de veículos e sua representatividade com relação ao volume total de veículos comerciais pesados existentes no local de instalação do sistema HS-WIM, sendo tão melhor quanto maior for a quantidade e variabilidade dos veículos.

Da mesma forma, a definição do carregamento a ser adotado deve ser compatível com a aplicabilidade prevista para o sistema HS-WIM que se deseja avaliar. É importante observar a escolha de cargas que apresentem estabilidade, no tocante à manutenção do centro de gravidade do carregamento total, e baixa absorção de umidade, a fim de que não haja eventual carregamento adicional em decorrência de adsorção e/ou acúmulo de água, quando da realização dos testes.

5.2.2 Etapa 2: Definição do Equipamento de Precisão e Obtenção das Medidas de Referência

Nessa etapa é definido qual equipamento ou instrumento de pesagem de precisão será utilizado para a obtenção das medidas de peso de referência. Tal instrumento, o qual pode ser de pesagem estática ou dinâmica em baixa velocidade, deve possuir laudo de verificação e/ou certificação emitidos por entidade competente, que sirva como validação de que o mesmo se encontra apto de ser utilizado comercial e/ou legalmente, considerando os fins determinados quando da aprovação de seu modelo, bem como considerando as tolerâncias de medidas admitidas para o próprio instrumento.

Uma vez definido qual equipamento será utilizado, podendo este ser localizado anteriormente ou depois do local de instalação do sistema HS-WIM que se pretende avaliar, parte-se para a obtenção das medidas de peso, a qual deve ser compatível com o tipo do instrumento então definido. Nesse sentido, procede-se à realização de um número suficiente de repetições de pesagem, com o uso dos veículos conhecidos, registrando-se as medidas de peso obtidas (PBT, peso por eixo e/ou por grupo de eixos). As medidas obtidas devem ser então avaliadas, a fim de obter as medidas de peso de referência, que serão admitidas para a avaliação do sistema HS-WIM.

5.2.3 Etapa 3: Definição e Realização do Protocolo de Teste e Obtenção das Medidas de Peso

Conforme apresentado nos Capítulos 2 e 4, diversos fatores podem contribuir para a ocorrência, em diferentes níveis, de incertezas com relação às medidas de peso a serem estimadas por meio de instrumentos de pesagem, incluindo os sensores WIM, quando estes se encontram em serviço ou sob condições reais e normais de uso. Nesse sentido, para o estabelecimento do protocolo de testes, devem ser previstos parâmetros de controle e teste que abarquem o máximo possível ou os principais fatores de influência com relação aos quais se pretende avaliar determinado sistema HS-WIM, bem como deve ser previsto um número suficiente de repetições de pesagem para cada um dos veículos conhecidos e para cada um dos parâmetros definidos, sendo realizadas as marcações horárias correspondentes a cada pesagem.

De acordo com Scheuter (1998), a maior parcela de influência para a ocorrência de incertezas das medidas de peso está relacionada ao movimento oscilatório dos veículos, cuja magnitude depende, inclusive, da velocidade praticada. No que se refere ao acúmulo de deterioração da estrutura de um pavimento, com efeito em seu desempenho, conforme apresentado no Capítulo 2, além das próprias condições preestabelecidas quando do seu dimensionamento e processo construtivo, esses também são influenciados pela interação das respectivas estruturas com as características decorrentes do tráfego e das condições climáticas e ambientais. Nesse sentido, as variações das medidas de peso (PBT, peso por eixo ou por grupo de eixos), então decorrentes das variações relacionadas aos tipos de veículos e eixos, à velocidade e à temperatura, acaba configurando tais parâmetros como minimamente obrigatórios à avaliação de sensores de peso e sistemas WIM.

No que se refere especificamente à temperatura, os testes com os veículos devem ser desenvolvidos em vários horários durante os dias definidos para coleta de dados e/ou em vários períodos ao longo de um ano, com o objetivo de obter leituras diferentes para a temperatura do pavimento. Assim, para cada veículo, adicionalmente às medias de peso relativas às variações dos parâmetros mínimos obrigatórios configurados pelos tipos de veículos e eixos e pela velocidade, devem ser registradas as temperaturas das respectivas estruturas de pavimento, em cada uma das repetições de pesagem, podendo ser obtidas a partir de sensores de temperatura instalados na própria estrutura de um pavimento. Todas as medidas de peso, então decorrentes das repetições de pesagem devem ser devidamente registradas.

No tocante à etapa de obtenção das medidas de peso a partir de sistemas HS-WIM, para a identificação de veículos e foto registro, as placas dos veículos conhecidos podem ser registradas, para posterior identificação no sistema de aquisição de dados. Nesse sentido, tendo como base as propriedades e princípio de funcionamento das tecnologias correspondentes aos sensores de peso, dentre as quais muitas daquelas disponíveis no mercado constam na Seção 4.1.2, parte-se para a fase do método correspondente à análise dos dados.

5.3 FASE 3: ANÁLISE DOS DADOS

Tendo como base a Figura 5.1, a fase relativa à análise dos dados é composta por duas etapas, as quais se dividem no cálculo das diferenças relativas das medidas de peso e definição de tolerâncias, e na realização de inferências estatísticas, contemplando a aplicação de testes estatísticos, análise e interpretação dos dados. As seções seguintes contemplam descrições correspondentes às mencionadas etapas.

5.3.1 Etapa 1: Cálculo das Diferenças Relativas e Definição de Tolerâncias

Nessa etapa, tendo como base as medidas de peso estimadas a partir do sistema HS-WIM sob avaliação, bem como considerando as medidas de peso de referência obtidas por meio do equipamento de precisão, parte-se para o cálculo das diferenças relativas das medidas de PBT, peso por eixo e/ou peso por grupo de eixos. Para o cálculo das mencionadas diferenças, pode-se utilizar a Equação (5.1).

$$d_i = \frac{P_i - P_r}{P_r} \quad (5.1)$$

onde d_i é a diferença relativa entre as medidas de peso estimadas pelo sistema HS-WIM (P_i) e as medidas de referência correspondentes (P_r), então obtidas por meio do equipamento de

precisão, para $i = 1, 2, 3 \dots, n$ medidas de peso relativas ao PBT, peso por eixo e/ou peso por grupo de eixos. Posteriormente, inicia-se o processo de definição de tolerâncias, e como procedimentos necessários à obtenção dos valores máximos e mínimos de tolerância de peso, constroem-se diagramas de caixas, comumente denominados, em inglês, como *box-plot*.

5.3.2 Etapa 2: Inferências Estatísticas

Nesta etapa, a partir das diferenças relativas calculadas, parte-se para a definição e realização dos testes estatísticos, e posterior análise e interpretação dos dados. Assim, tendo em vista os resultados provenientes do desenvolvimento do protocolo de testes estabelecido na segunda fase do sequenciamento metodológico, pretende-se avaliar, primeiramente, a precisão do sistema HS-WIM.

Nesse caso, pode-se utilizar o teste t de *Student*, a fim de verificar se os pesos médios das diversas medições são iguais ao peso real. Tem-se como hipótese nula (H_0) que a média dos valores observados é igual ao peso real medido (ou que a diferença entre os dois seja igual a zero). A hipótese alternativa (H_1) é de que a média dos valores é diferente do peso real medido (ou que a diferença entre os dois seja diferente de zero). A estatística do teste é dada por:

$$H_0) \bar{x} = \mu \quad H_1) \bar{x} \neq \mu$$

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{S/\sqrt{n}} \quad (5.2)$$

onde n é o tamanho da amostra; \bar{x} é a média dos pesos observados; e S o desvio padrão dos pesos observados. O desvio padrão S é definido pela Equação (5.3).

$$S = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - n.\bar{x}^2}{n-1}} \quad (5.3)$$

Se \bar{x} seguir uma distribuição normal, utiliza-se o teste paramétrico t de *Student*, com $n - 1$ graus de liberdade (gl). Se \bar{x} não seguir uma distribuição normal, o teste de *Wilcoxon*, que se trata do teste não paramétrico equivalente ao teste t de *Student* para amostras pareadas, é o mais aconselhável de ser utilizado (BLAIR & HIGGINS, 1985).

Para a comparação dos pesos médios (ou das diferenças relativas) entre diferentes veículos, temperaturas, ou entre quaisquer outros parâmetros, pode-se utilizar a análise de variância, ou do inglês *Analys of Variance* (ANOVA). O teste tem como hipótese nula (H_0) que as médias das populações são todas iguais, contra a hipótese alternativa (H_1) de que pelo menos duas médias das populações diferem entre si.

No caso de se rejeitar (H_0), pode-se aplicar o teste de *Tukey* (teste de comparações múltiplas), a fim de se encontrar as diferenças consideradas significativas. Tal teste, baseado no teste *t* de *Student*, consiste em comparar as médias duas a duas através de sua diferença em valor absoluto $D = |\bar{x}_i - \bar{x}'_i|$, com a diferença mínima significativa, sendo o teste realizado conforme a Equação (5.4).

$$\Delta = q_{[\alpha;t;(n-t)]} x \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (5.4)$$

onde $q_{[\alpha;t;(n-t)]}$ é o quartil estudentizado, ao nível de significância de α , com t tratamentos (grupos), e $(n - t)$ graus de liberdade do resíduo, QMR é o quadrado médio dos resíduos (desvio padrão do residual) e j é o número de repetições de cada tratamento (grupo).

A aplicação da ANOVA é condicionada ao atendimento de duas suposições, ou seja, que as amostras sejam extraídas de populações normais e apresentem variâncias constantes. Para tanto, anteriormente à aplicação da ANOVA, deve-se realizar a verificação quanto ao atendimento das duas suposições. É prevista a realização, portanto, do teste de *Kolmogorov-Smirnov*, para se verificar a aderência dos dados à distribuição normal de probabilidade e do teste de homocedasticidade de *Levene*, para se verificar a igualdade das variâncias. Em não sendo verificada a normalidade dos dados e/ou a igualdade das variâncias, aplica-se o teste não paramétrico de *Kruskal-Wallis*.

No teste de *Kruskal-Wallis* se atribui como hipótese nula (H_0) que as amostras relativas às k diferenças d_i são todas iguais, sendo provenientes da mesma população. Ou seja, as diferentes diferenças de medidas de peso (PBT, peso por eixo ou peso por grupo de eixos), relacionadas a cada um dos veículos, não provocam efeitos significativos, independentemente das condições de variação dos parâmetros. Já a hipótese alternativa (H_1) é a de que pelo menos uma das amostras relativas às diferenças d_i provém de populações com medianas diferentes umas das outras. Para a aplicação do referido teste, as observações devem ser ordenadas do menor para

o maior valor, sendo atribuído um ranqueamento geral entre todas as diferenças d_i de todas as amostras. Nesse sentido, para cada amostra (tratamento), é calculado $R_i, i = 1, 2, 3, \dots, k$, como a soma dos ranqueamentos correspondentes a cada amostra. O teste estatístico, portanto, se dá conforme a Equação (5.5).

$$H = \left[\frac{12}{Nx(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} \right] - 3x(N+1) \quad (5.5)$$

onde $N = n_1 + n_2 + \dots + n_k$, sendo n_i o tamanho relativo a cada amostra “k”. De posse de H, faz-se a comparação com o valor tabelado, decidindo entre rejeitar ou não a hipótese nula. Ressalta-se que, quando k é maior que 5, pode-se aproximar o valor crítico por X^2 (Qui-quadrado), com $k - 1$ graus de liberdade e nível de significância igual a α , o qual deverá ser comparado com H.

6 APLICAÇÃO DO MÉTODO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste Capítulo é apresentada a aplicação do método proposto no Capítulo 5, bem como a análise dos resultados obtidos. Primeiramente, ressalta-se que os dados utilizados nesta pesquisa decorrem dos Planos de Trabalho estabelecidos no âmbito dos Termos de Execução Descentralizada (TED nº 497/2012 e TED nº 448/2017), firmados entre o DNIT e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por intermédio do Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans), da UFSC. Todos os dados das análises foram obtidos a partir do *software* SAS 9.4.

6.1 FASE 1: DEFINIÇÃO DO LOCAL PARA TESTE

Como sítio de teste e pesquisa, utilizam-se as infraestruturas correspondentes ao Posto de Pesagem de Veículos (PPV 16.08), de circunscrição preliminar do DNIT, que se localiza nas proximidades do Município de Araranguá, no Estado de Santa Catarina, mais especificamente no km 418,50, sentido sul (Araranguá/Divisa SC-RS), da rodovia BR-101/SC. Ainda, tendo como base a Figura 5.1, nas seções seguintes, o mencionado sítio de teste se encontra caracterizado quanto ao clima, bem como quanto às infraestruturas ligadas ao PPV e com relação aos sensores WIM e as tecnologias existentes.

6.1.1 Clima

O clima do Município de Araranguá, local em que se encontra instalado o PPV 16.08 e as respectivas infraestruturas, apresenta um verão curto e opressivo, com temperatura máxima média de aproximadamente 29°C, e um inverno curto e ameno, com temperatura mínima média de cerca de 8°C, sendo as médias correspondentes ao período de setembro de 2008 a maio de 2020. Ainda, durante todo o ano, tendo como base o mesmo período, a precipitação média se faz relativa a aproximadamente 1.300 mm/ano (INMET, 2020). Especificamente para o primeiro semestre de 2019, período este consecutivo à verificação da balança de precisão do PPV pelo INMETRO, e o qual contemplou o mês e dias de coleta dos dados utilizados nessa pesquisa (05 a 09 de maio de 2019), na Figura 6.1 se apresentam as variações de temperatura do ar, ao longo do período mencionado.



Figura 6.1: PPV - Município de Araranguá/SC – Variações de temperatura (maio de 2019)
 Fonte: Adaptado INMET (2020)

Ainda, tendo em vista demais variáveis climáticas que podem influenciar a temperatura do pavimento, bem como a aerodinâmica dos veículos, menciona-se que informações adicionais a respeito da umidade, radiação solar, direção e velocidade do vento podem ser obtidas em INMET (2020). A seção seguinte contempla descrição das infraestruturas correspondentes ao PPV 16.08.

6.1.2 Infraestruturas do PPV 16.08 (Sítio de Pesagem WIM)

Na Figura 6.2 é apresentado um desenho esquemático das infraestruturas relacionadas ao PPV 16.08. Tais infraestruturas abarcam três segmentos, então definidos como I (Estação Integrada), II (Pista Experimental) e III (PPV). Ainda, destaca-se que os seguimentos I e II, em que se fazem instalados sistemas HS-WIM, foram projetados e construídos de modo a atender os parâmetros estabelecidos para a Classe I, da Especificação Europeia COST 323, de Jacob *et al.* (2002).

A estrutura de pavimento dimensionada para o segmento I, o qual contempla o denominado Trecho A01, é do tipo flexível, estando a aproximadamente 1,2 quilômetro anterior à balança de precisão localizada no PPV (sentido sul), e sendo composta por duas faixas de rolamento de 200 metros de comprimento e 3,6 metros de largura cada uma (BRASIL, 2015a). O segmento II contempla os denominados Trechos A02 e A03, cujas estruturas se referem, respectivamente, a um Pavimento de Concreto Betuminoso Espesso (PCBE) e a um Pavimento de Concreto Continuamente Armado (PCCA). O pavimento correspondente ao Trecho A02 possui comprimento de 120 metros, largura total de 7,2 metros e duas faixas de rolamento de 3,6

metros, estando a aproximadamente 750 metros da balança de precisão do PPV (sentido sul). Já o pavimento relativo ao Trecho A03 se localiza a aproximadamente 600 metros da balança de precisão do PPV (sentido sul) e apresenta comprimento igual a 136 metros, incluindo as placas de transição, e largura total de 7,2 metros, com duas faixas de rolamento de 3,6 metros (BRASIL, 2018a). As camadas que compõem cada uma das estruturas são representadas, simplificada, na Figura 6.3.

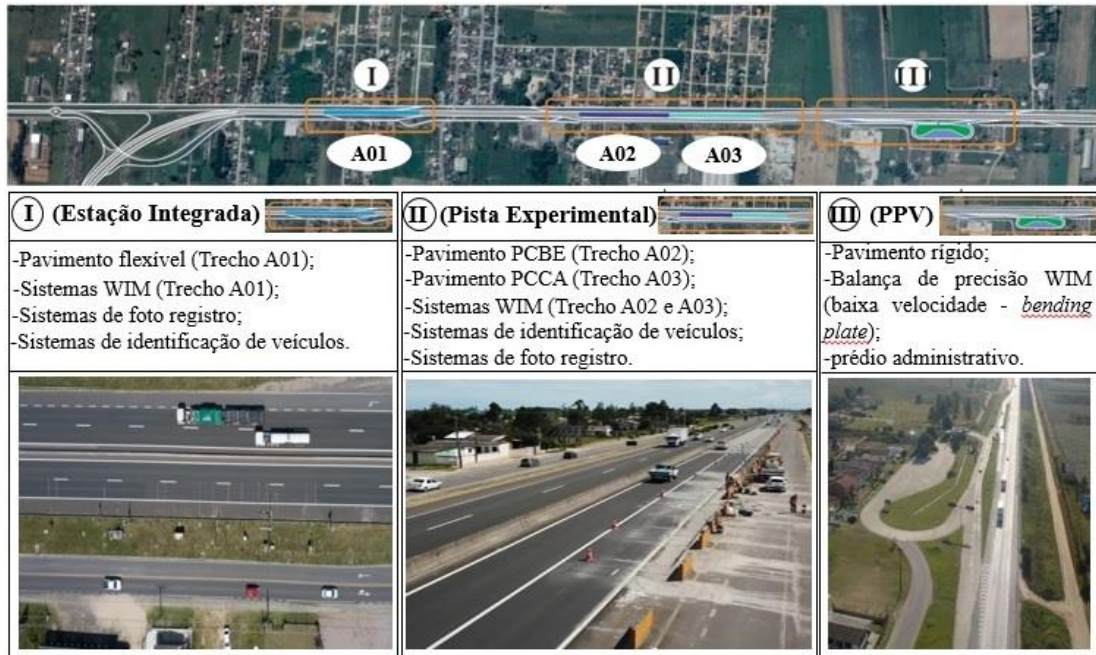


Figura 6.2: Sítio de pesagem WIM – PPV Município de Araranguá/SC
Fonte: Adaptado de Brasil (2018a) e Otto (2018)

(a) Trecho A01	(b) Trecho A02	(c) Trecho A03
Camada de rolamento (6m)	Camada de rolamento (6m)	PCCA (25 cm)
Mistura Asfáltica Densa (12 cm)	Camada de ligação (<i>Binder</i>) (10 cm)	Base de brita graduada (existente – 9 cm)
Base granular + ligante asfáltico (12 cm)	Base granular + ligante asfáltico (10 cm)	Sub-base de macadame seco (existente – 20cm)
Base granular + ligante asfáltico (12 cm)	Base granular + ligante asfáltico (10 cm)	Solo arenoso (existente)
Sub-base de brita graduada (30 cm)	Base granular + ligante asfáltico (11 cm)	
Subleito estabilizado com cal (100 cm)	Subleito estabilizado com cal (100 cm)	

Figura 6.3: Camadas das estruturas dos pavimentos dos trechos A01, A02 e A03 – PPV 16.08
Fonte: (a) Adaptado de Brasil (2015a), (b) e (c) Adaptado de Brasil (2018a)

6.1.3 Sensores e Balança de Precisão

Caracterizadas as infraestruturas que suportam as instalações dos sensores de peso e sistemas HS-WIM, parte-se para a caracterização dos sensores de peso propriamente ditos, a partir dos quais foram obtidos os dados de peso utilizados nessa pesquisa. Nesse sentido, considerando o que foi apresentado no Capítulo 4, nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 são apresentados os sistemas e os tipos de tecnologias de sensores instalados nos pavimentos, respectivamente, dos Trechos A01, A02 e A03, com destaque para aqueles a partir dos quais decorreram os dados utilizados neste trabalho.

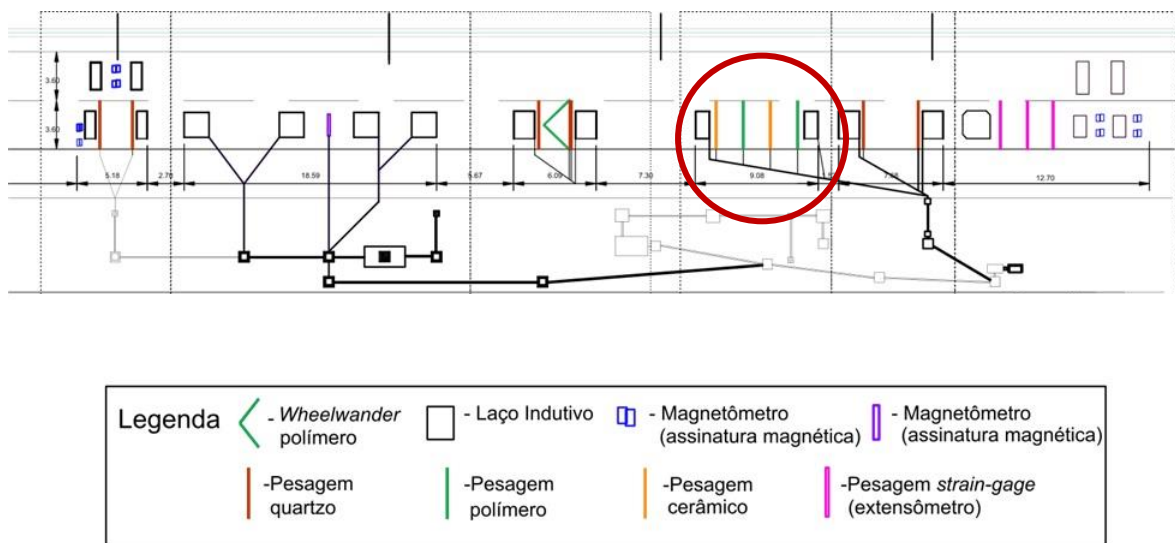


Figura 6.4: Sensores – Trecho A01 – Estação de Integração
Fonte: BRASIL (2015a)

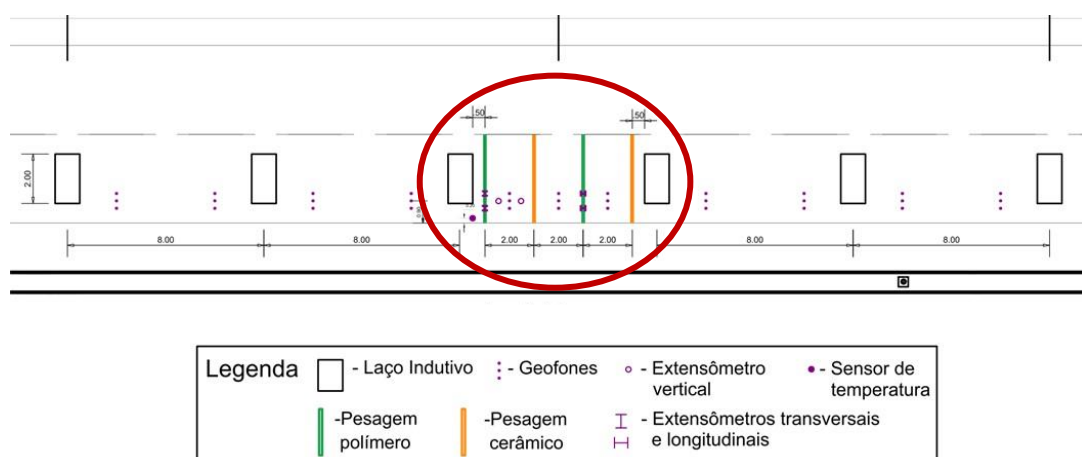


Figura 6.5: Sensores – Trecho A02 – Pista Experimental
Fonte: BRASIL (2018a)

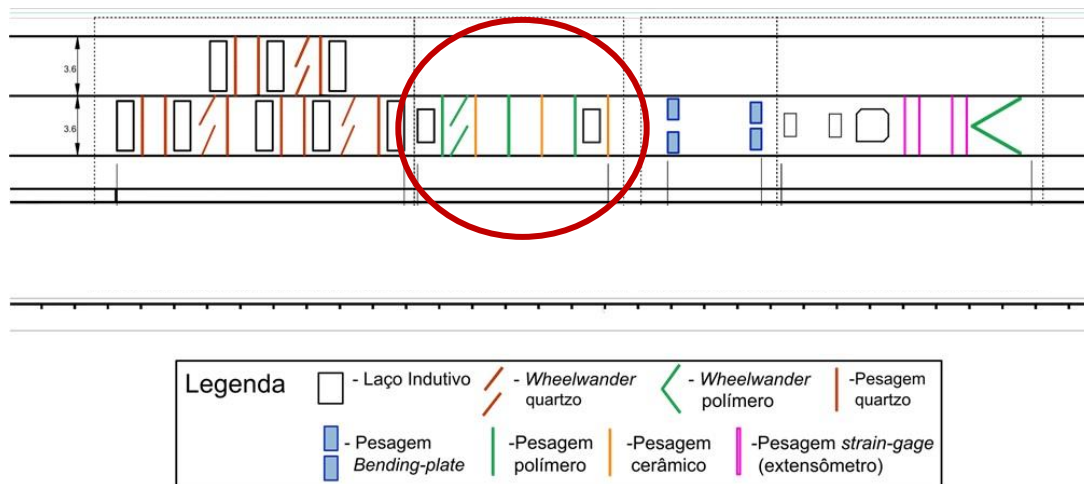


Figura 6.6: Sensores – Trecho A03 – Pista Experimental
Fonte: BRASIL (2018a)

Tendo como base os esquemáticos dispostos nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6, os dados utilizados nessa pesquisa decorreram dos sistemas HS-WIM compostos com sensores de peso dos tipos piezo-cerâmicos e piezo-polímeros instalados nos Trechos A01, A02 e A03. Ainda, com relação ao segmento III, relativo ao PPV, destaca-se o mesmo ser contemplado com uma balança do tipo *bending plate* (seção 4.1.1). Na seção seguinte, apresenta-se a respeito da segunda fase do sequenciamento metodológico.

6.2 FASE 2: TESTE EM CAMPO E AQUISIÇÃO DOS DADOS

Nesta seção é apresentada a segunda fase do sequenciamento metodológico, conforme a Figura 5.1. As etapas que compõem tal fase contemplam a definição dos veículos conhecidos, dos respectivos carregamentos e do instrumento de pesagem de precisão, então utilizados para a obtenção das medidas de peso de referência, e a definição dos protocolos de teste e aquisição dos dados. Tais etapas se encontram descritas a seguir.

6.2.1 Etapa 1: Definição dos Veículos Conhecidos e Carregamentos

Tendo em vista os tipos de veículos comerciais pesados predominantes no Estado de Santa Catarina e, mais especificamente, na região em que se encontram instalados os sistemas HS-WIM sob estudo nessa pesquisa, bem como considerando os tipos de veículos homologados por meio da Portaria DENATRAN nº 63/2009, menciona-se terem sido utilizados três veículos. Tais veículos, portanto, se encontram caracterizados na Figura 6.7.

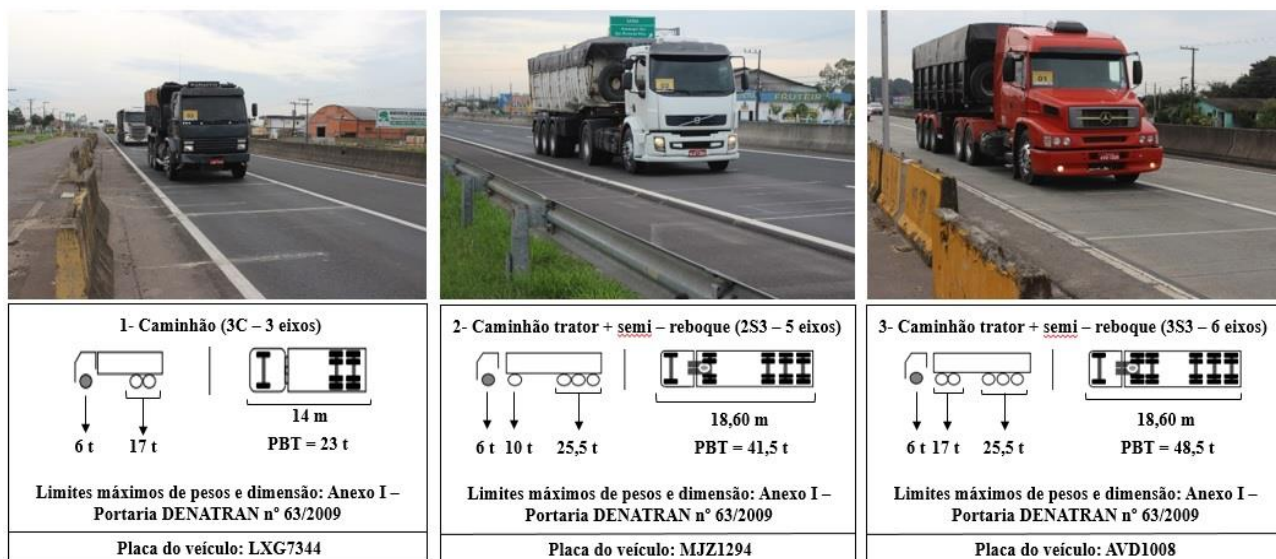


Figura 6.7: Veículos conhecidos

Os veículos apresentados na Figura 6.7 foram carregados com carga próxima aos limites máximos de peso (carregamento total), devido ao objetivo de avaliação dos sistemas com relação à sua viabilidade de aplicação para fins legais, em que o interesse de investigação, portanto, corresponde aos veículos que excedem os limites regulamentares de peso impostos pela legislação. Ainda com relação ao carregamento, considerou-se a utilização de brita, uma vez tal material se caracterizar como uma carga estável e com baixa possibilidade de absorção de umidade. Em complementação, informa-se que o custo médio diário de locação de apenas um veículo foi de cerca de R\$ 1.333,33, incluindo somente a entrega do veículo no local desejado e o combustível, sem carregamento, tendo-se totalizado, para os dias de 05 a 09 de maio de 2020, aproximadamente R\$ 20.000,00. Na seção seguinte, é apresentado a etapa 1 do método.

6.2.2 Etapa 2: Definição do Equipamento de Precisão e Obtenção das Medidas de Referência

O equipamento de precisão considerado foi a balança do tipo *bending plate* (pesagem em baixa velocidade) (seção 4.1.1), localizada no segmento III (PPV 16.08) (Figura 6.2). Tal equipamento foi verificado pelo INMETRO, em 20 de dezembro de 2018, tendo sido aprovado, com validade de verificação de um ano, conforme laudo disponível no Anexo II desta dissertação, para classe de exatidão das medidas de PBT ($\pm 2,5\%$) e peso por eixo ($\pm 4,0\%$), com medições desenvolvidas em até 6 km/h.

Definidos os veículos conhecidos, bem como o equipamento de precisão, para a obtenção das medidas de referência, foram realizadas 20 repetições de pesagem sobre a balança *bending plate*, para cada um dos veículos conhecidos. As medidas de peso obtidas resultaram nas seguintes medidas referenciais de peso: (i) caminhão não articulado (*truck*) de 3 eixos e dois grupos de eixos (classe 3C), com PBT igual a 23.216 kg, peso do grupo de eixos 1 (G1) igual a 5.475 kg e peso do grupo de eixos 2 (G2) igual a 17.741 kg; (ii) caminhão articulado de 5 eixos e três grupos de eixos (classe 3S2), com PBT igual a 41.075 kg, peso do grupo de eixos 1 (G1) igual a 5.787 kg, peso do grupo de eixos 2 (G2) igual a 10.487 kg, e peso do grupo de eixos 3 (G3) igual a 24.801 kg; (iii) caminhão articulado de 6 eixos e três grupos de eixos (3S3), com PBT igual a 44.287 kg, peso do grupo de eixos 1 (G1) igual a 5.245 kg, peso do grupo de eixos 2 (G2) igual a 16.208 kg e peso do grupo de eixos 3 (G3) igual a 22.834 kg. Na seção seguinte, é apresentado o protocolo de testes definido para avaliação dos sistemas HS-WIM.

6.2.3 Etapa 3: Definição e Realização do Protocolo de Teste e Obtenção das Medidas de Peso

Foram realizadas pesagens dos veículos conhecidos, tendo como base os sistemas HS-WIM contemplados com sensores de peso dos tipos piezo-cerâmico e piezo-polímero, então instalados nas estruturas de pavimento dos Trechos A01, A02 e A03, conforme exposto nas seções 6.1.2 e 6.1.3. O teste, para cada veículo, foi composto pela observância ao atingimento, o quanto possível, de três velocidades obrigatórias (60, 70 e 80 km/h) e ainda, quando possível, de uma quarta velocidade (90 km/h). O estabelecimento de tais velocidades levou em consideração as velocidades praticadas regularmente pelo tráfego local.

Foi também considerada a passagem de cada veículo em três posições laterais diferentes com relação às faixas de rolamento (centro, esquerda e direita) em que se encontram instalados os sistemas HS-WIM. Tal parâmetro foi considerado, adicionalmente, a fim de se verificar a sensibilidade e percepção dos sensores de peso com relação às medidas de peso efetivamente aplicadas sobre o pavimento e sobre os sensores. Ainda, considerou-se a realização dos testes em vários horários durante os dias de coleta, bem como o registro das temperaturas de cada estrutura de pavimento no momento de cada repetição de pesagem, tendo sido as temperaturas obtidas a partir de sensores de temperatura instalados nas estruturas dos pavimentos dos Trechos A01, A02 e A03.

Os testes foram desenvolvidos, de 05 a 09 de maio de 2019, tendo sido realizadas, no mínimo, 30 pesagens para cada veículo conhecido, contemplando a variação da velocidade e de posição lateral na faixa de rolamento. A partir das placas dos veículos, bem como mediante o uso de instrumentos voltados ao reconhecimento de placas e foto registro, as medidas de peso foram identificadas e extraídas do sistema de aquisição de dados desenvolvido pelo LabTrans/UFSC. Diante de todo o exposto, a seção seguinte contempla a terceira fase do sequenciamento metodológico apresentado na Figura 5.1.

6.3 FASE 3: ANÁLISE DOS DADOS

Nesta seção é apresentado o desenvolvimento da terceira fase do sequenciamento metodológico. As etapas que compõem tal fase abarcam o cálculo das diferenças relativas das medidas de peso e definição de tolerâncias, e a realização de inferências estatísticas, contemplando a aplicação de testes estatísticos, análise e interpretação dos dados. Tais etapas se encontram descritas nas seções seguintes.

6.3.1 Etapa 1: Cálculo das Diferenças Relativas e Definição de Tolerâncias

As diferenças relativas das medidas de peso (PBT, peso por eixo e peso por grupos de eixos) foram obtidas tendo como base a Equação (5.1). Nessa pesquisa, para a construção dos diagramas de caixas, os conjuntos de dados, os quais contemplam as variações de velocidade e de posição lateral dos veículos na faixa de rolamento, foram diferenciados entre cada veículo conhecido de referência, bem como entre cada um dos sistemas HS-WIM contemplados nos Trechos A01, A02 e A03. Nas seções seguintes se apresentam os diagramas de caixas referentes a cada sistema HS-WIM contemplado na pesquisa.

(i) Sistema 01

Nesta seção são apresentados os diagramas de caixas elaborados para o denominado Sistema 01, então composto pelo conjunto de sensores de peso dos tipos piezo-cerâmico e piezo-polímero e pela estrutura de pavimento correspondente ao Trecho A01 (Figura 6.3). Anteriormente à elaboração dos diagramas, identificou-se, conforme Tabela 6.1, as frequências absolutas referentes aos conjuntos de diferenças relativas de medidas de peso (PBT, peso por eixo e peso por grupo de eixos), para cada veículo conhecido de referência, abrangendo as condições de velocidade e posição lateral na faixa de rolamento, que foram desenvolvidas no teste em campo e, também, dois conjuntos de temperaturas, então diferenciados pela temperatura média identificada para estrutura do pavimento do Trecho A01. Todas as pesagens, em suas condições de variação, totalizaram 169 observações.

Tabela 6.1: Frequências absolutas – Sistema 01

Frequências absolutas - Sistema 01									
Velocidade	Posição lateral na faixa de rolamento	Veículos						Totais	
		Caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C)		Caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3)		Caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3)			
		Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento			
		< 37,2° C	≥ 37,2° C	< 37,2° C	≥ 37,2° C	< 37,2° C	≥ 37,2° C		
60 km/h	centro	7	1	2	0	7	1	18	46
	esquerda	1	5	1	2	1	4	14	
	direita	0	6	0	6	0	2	14	
70 km/h	centro	5	0	5	0	3	0	13	53
	esquerda	1	6	1	5	1	6	20	
	direita	1	6	1	5	1	6	20	
80 km/h	centro	5	0	6	0	6	0	17	53
	esquerda	0	7	0	7	0	7	21	
	direita	4	1	4	1	4	1	15	
90 km/h	centro	2	4	2	4	1	4	17	17
	esquerda	0	0	0	0	0	0	0	
	direita	0	0	0	0	0	0	0	
Totais		26	36	22	30	24	31	169	
		62		52		55			

Tendo como base a Tabela 6.1, foram construídos os diagramas de caixas apresentados nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10, os quais contemplam as distribuições das diferenças relativas correspondentes às medidas de PBT e de pesos por grupos de eixos de cada um dos veículos de referência. Para cada veículo e, também, para cada conjunto de temperaturas, foram consideradas todas as variações de velocidade e de posição lateral na faixa de rolamento.

A partir da Figura 6.8, na qual se apresentam as distribuições das medidas de peso correspondentes ao veículo do tipo caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C), verifica-se, para o conjunto de temperaturas menores que 37,2° C, que o maior grau de dispersão ocorre para a distribuição referente ao grupo de eixos 1 (G1). Já para conjunto de temperaturas maiores que 37,2° C, todas as distribuições sinalizam por haver grande similaridade na dispersão dos dados, sendo que a maior variabilidade entre elas se apresenta, entretanto, para as diferenças relativas das medidas de peso correspondentes ao grupo de eixos 1, seguido por aquelas referentes ao grupo de eixos 2 (G2) e, por último, pelo PBT. As diferenças relativas máximas absolutas das medidas de peso, considerando os dois conjuntos de temperaturas são iguais a 11% (PBT), 14% (G1) e 11% (G2).

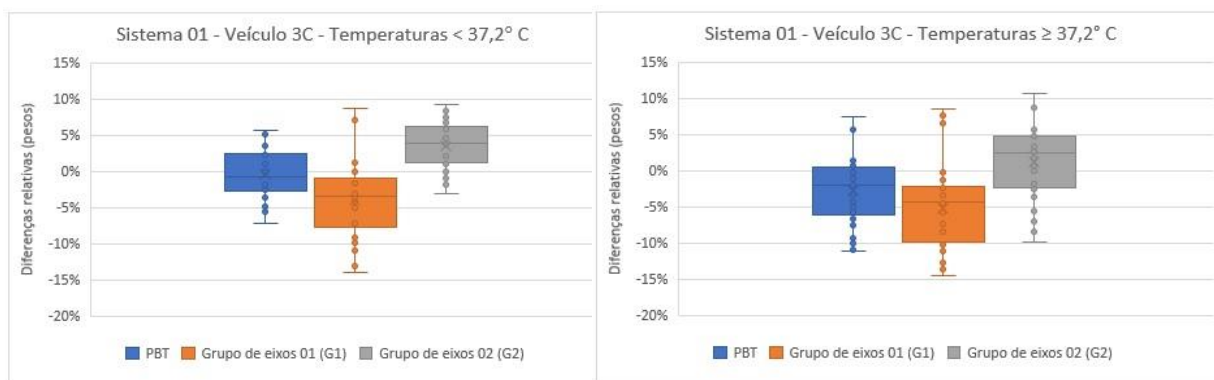


Figura 6.8: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 01 - Caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C) – Temperatura média do pavimento igual a 37,2° C

Com relação à Figura 6.9, na qual se apresentam as distribuições das diferenças relativas das medidas de peso relacionadas ao veículo do tipo caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3), é possível observar, para os dois conjuntos de temperaturas, que as distribuições correspondentes aos grupos de eixos 1 (G1) apresentam maiores graus de dispersão, sendo seguidas por aquelas referentes aos grupos de eixos 3 (G3), aos grupos de eixos 2 (G2) e ao PBT. As diferenças relativas máximas absolutas das medidas de peso, para os dois conjuntos de temperaturas, desconsiderando-se os valores que excedem (*outliers* ou pontos extremos) os limites máximos e mínimos, são iguais a 11% (PBT), 19% (G1), 11% (G2) e 13% (G3).

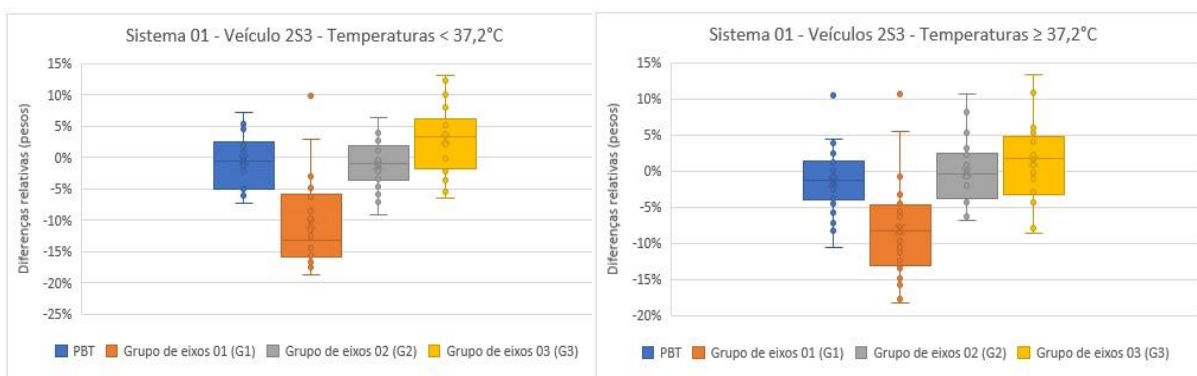


Figura 6.9: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 01 - Caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3) – Temperatura média do pavimento igual a 37,2° C

Da Figura 6.10, na qual se apresentam as distribuições das diferenças relativas das medidas de peso relacionadas ao veículo do tipo caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3), é possível observar, para os dois conjuntos de temperaturas, que as distribuições

correspondentes aos grupos de eixos 1 (G1) apresentam maiores graus de dispersão, sendo seguidas por aquelas referentes aos grupos de eixos 2 (G2), aos grupos de eixos 3 (G3) e ao PBT. As diferenças relativas máximas absolutas das medidas de peso, para os dois conjuntos de temperaturas, desconsiderando-se os valores que excedem (*outliers* ou pontos extremos) os limites máximos e mínimos, são iguais a 13% (PBT), 17% (G1), 19% (G2) e 17% (G3).

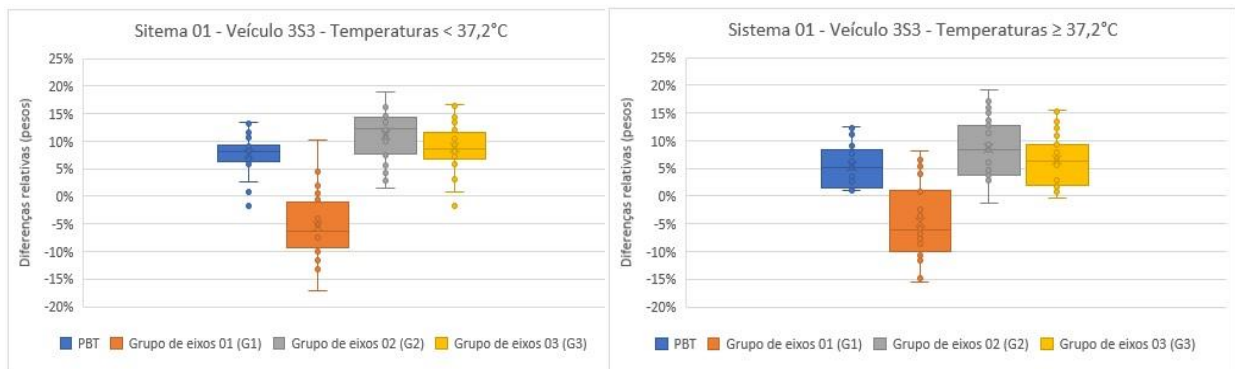


Figura 6.10: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 01 - Caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3) – Temperatura média do pavimento igual a $37,2^{\circ}\text{C}$

Tendo como base especificamente o Sistema 01, independentemente de suas condições de calibração e percepção (precisão) quanto às medidas de peso reais praticadas, foram verificados valores máximos absolutos diferentes, de acordo com cada tipo de medida de peso considerada (PBT ou peso por grupos de eixos) e, também, conforme cada tipo de configuração veicular. Nesse sentido, os percentuais máximos obtidos, em termos absolutos, considerando todos os veículos de referência, foram iguais a 13% (PBT), 19% (G1), 19% (G2) e 17% (G3).

(ii) Sistema 02

Nesta seção são apresentados os diagramas de caixas elaborados para o denominado Sistema 02, então composto pelo conjunto de sensores de peso dos tipos piezo-cerâmico e piezo-polímero e pela estrutura de pavimento correspondente ao Trecho A02 (Figura 6.3). Anteriormente à elaboração dos diagramas, identificou-se, conforme Tabela 6.2, as frequências absolutas referentes aos conjuntos de diferenças relativas de medidas de peso (PBT, peso por eixo e peso por grupo de eixos), para cada veículo conhecido de referência, abarcando as condições de velocidade e posição lateral na faixa de rolamento, que foram desenvolvidas no teste em campo e, também, dois conjuntos de temperaturas, então diferenciados pela

temperatura média identificada para estrutura de pavimento do Trecho A02. Todas as pesagens, em suas condições de variação, totalizaram 177 observações.

Tabela 6.2: Frequências absolutas – Sistema 02

Frequências absolutas - Sistema 02									
Velocidade	Posição lateral na faixa de rolamento	Veículos						Totais	
		Caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C)		Caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3)		Caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3)			
		Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento			
		< 37,0° C	≥ 37,0° C	< 37,0° C	≥ 37,0° C	< 37,0° C	≥ 37,0° C		
60 km/h	centro	8	0	7	0	7	0	22	56
	esquerda	7	0	6	0	7	0	20	
	direita	2	5	2	5	0	0	14	
70 km/h	centro	0	5	0	7	0	3	15	51
	esquerda	2	5	2	5	1	3	18	
	direita	6	0	7	0	5	0	18	
80 km/h	centro	0	6	0	7	0	1	14	48
	esquerda	0	9	0	10	0	1	20	
	direita	1	6	1	6	0	0	14	
90 km/h	centro	0	3	1	5	0	1	10	22
	esquerda	0	4	0	6	0	2	12	
	direita	0	0	0	0	0	0	0	
Totais		26	43	26	51	20	11	177	
		69		77		31			

Tendo como base a Tabela 6.2, foram construídos os diagramas de caixas apresentados nas Figuras 6.11, 6.12 e 6.13, os quais contemplam as distribuições das diferenças relativas correspondentes às medidas de PBT e de pesos por grupos de eixos de cada um dos veículos de referência. Para cada veículo e, também, para cada conjunto de temperaturas, foram consideradas todas as variações de velocidade e de posição lateral na faixa de rolamento.

Com relação à Figura 6.11, na qual se apresentam as distribuições das diferenças relativas das medidas de peso relacionadas ao veículo do tipo caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C), é possível observar, para os dois conjuntos de temperaturas, que todas as distribuições apresentam proximidade quanto ao grau de dispersão, sendo mais acentuado aquele correspondente à distribuição das medidas de peso relativas aos grupos de eixos 1 (G1), principalmente em termos de amplitude dos dados e, também, com relação ao conjunto de temperaturas maiores que 37,0°C. Em menor magnitude, destaca-se aquele referente à distribuição das medidas de PBT relacionadas ao conjunto de temperaturas maiores que 37,0°C. As diferenças relativas máximas absolutas das medidas de peso, para os dois conjuntos de temperaturas, desconsiderando-se os valores que excedem (*outliers* ou pontos extremos) os limites máximos e mínimos, são iguais a 12% (PBT), 20% (G1) e 17% (G2).

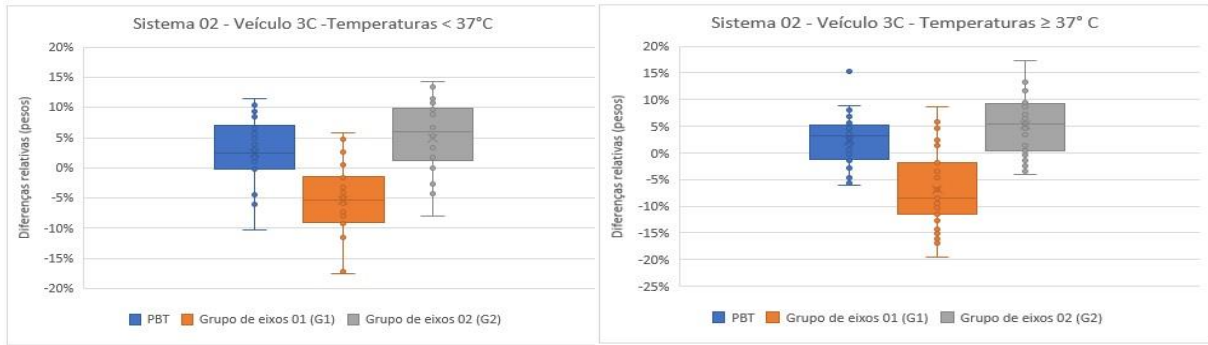


Figura 6.11: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 02 – Caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C) – Temperatura média do pavimento igual a 37° C

Referente à Figura 6.12, na qual se apresentam as distribuições das diferenças relativas das medidas de peso relacionadas ao veículo do tipo caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3), observa-se, para os dois conjuntos de temperaturas, que as distribuições das medidas de peso relativas aos grupos de eixos 1 (G1) apresentam maiores graus de dispersão com relação às demais. Especificamente para o conjunto de temperaturas menores que 37°C, o segundo maior grau de dispersão, em termos de amplitude dos dados, é atribuído às medidas relativas ao grupo de eixos 3 (G3), seguido por aqueles referentes ao grupo de eixos 2 (G2) e ao PBT. Já para o conjunto de temperaturas maiores que 37° C, as medidas de peso relativas aos grupos de eixos 2 e 3 apresentam graus de dispersão similares, em amplitude, sendo seguidos pelo PBT. Entretanto, as dispersões se apresentam de maneira mais acentuada, em termos de magnitude, para as distribuições referentes ao conjunto de temperaturas maiores que 37,0° C. As diferenças relativas máximas absolutas das medidas de peso, para os dois conjuntos de temperaturas, desconsiderando-se os valores que excedem (*outliers* ou pontos extremos) os limites máximos e mínimos, são iguais a 13% (PBT), 19% (G1), 13% (G2) e 17% (G3).

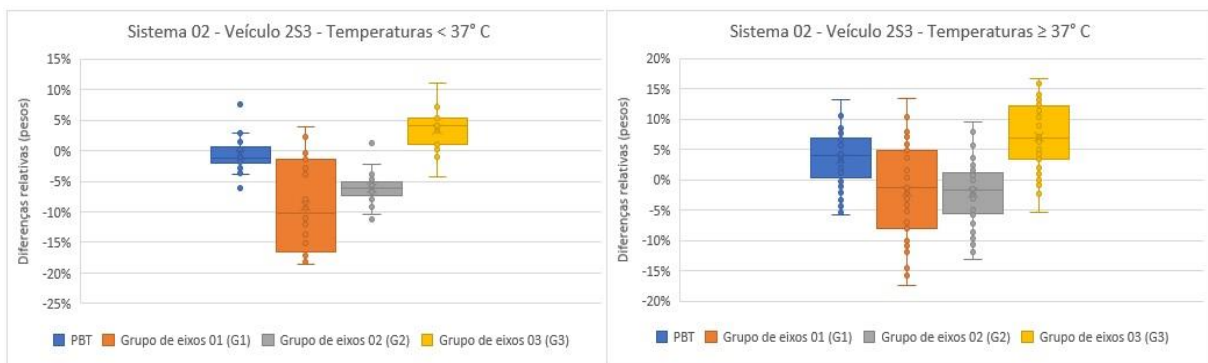


Figura 6.12: Diagrama de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e peso por grupos de eixos – Sistema 02 - Caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3) – Temperatura média do pavimento igual a 37° C

Da Figura 6.13, na qual se apresentam as distribuições das diferenças relativas das medidas de peso relacionadas ao veículo do tipo caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3), é possível observar, para os dois conjuntos de temperaturas, que as distribuições correspondentes aos grupos de eixos 2 (G2) apresentam maiores graus de dispersão em relação aos demais. As diferenças relativas máximas absolutas das medidas de peso, para os dois conjuntos de temperaturas, desconsiderando-se os valores que excedem (*outliers* ou pontos extremos) os limites máximos e mínimos, são iguais a 7% (PBT), 20% (G1), 20% (G2) e 15% (G3).

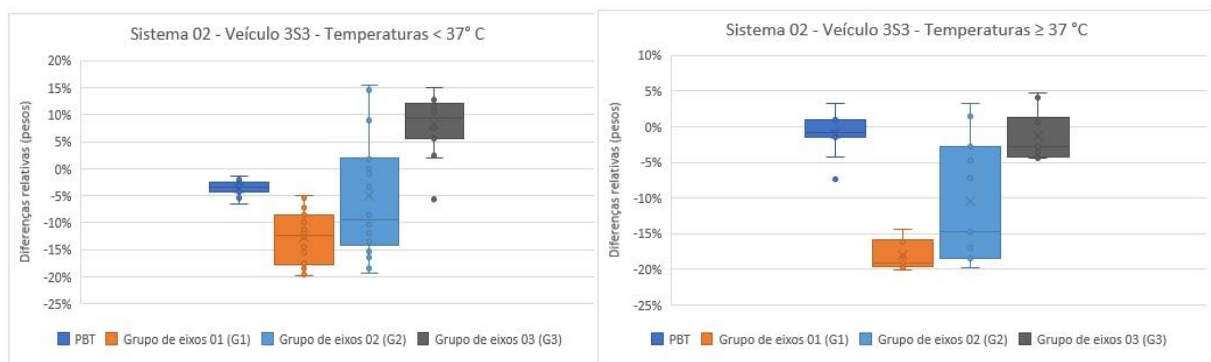


Figura 6.13: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 02 - Caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3) – Temperatura média do pavimento igual a 37° C

Tendo como base especificamente o Sistema 02, independentemente de suas condições de calibração e percepção (precisão) quanto às medidas de peso reais praticadas, foram verificados valores máximos absolutos diferentes, de acordo com cada tipo de medida de peso considerada (PBT ou peso por grupos de eixos) e, também, conforme cada tipo de configuração veicular. Nesse sentido, os percentuais máximos obtidos, em termos absolutos, considerando todos os veículos de referência, foram iguais a 13% (PBT), 20% (G1), 20% (G2) e 17% (G3).

(iii) Sistema 03

Nesta seção são apresentados os diagramas de caixas elaborados para o denominado Sistema 03, então composto pelo conjunto de sensores de peso dos tipos piezo-cerâmico e piezo-polímero e pela estrutura de pavimento correspondente ao Trecho A03 (Figura 6.3). Anteriormente à elaboração dos diagramas, identificou-se, conforme Tabela 6.3, as frequências absolutas referentes aos conjuntos de diferenças relativas de medidas de peso (PBT, peso por eixo e peso por grupo de eixos), para cada veículo conhecido de referência, abrangendo as condições de velocidade e posição lateral na faixa de rolamento, que foram desenvolvidas no

teste em campo e, também, dois conjuntos de temperaturas, então diferenciados pela temperatura média identificada para estrutura de pavimento do Trecho A03. Todas as pesagens, em suas condições de variação, totalizaram 205 observações.

Tabela 6.3: Frequências absolutas – Sistema 03

Frequências absolutas - Sistema 03									
Velocidade	Posição lateral na faixa de rolamento	Veículos						Totais	
		Caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C)		Caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3)		Caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3)			
		Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento			
		< 37,1° C	≥ 37,1°C	< 37,1° C	≥ 37,1°C	< 37,1° C	≥ 37,1°C		
60 km/h	centro	8	1	7	1	8	1	26	60
	esquerda	1	3	1	1	1	6	13	
	direita	0	7	0	7	0	7	21	
70 km/h	centro	7	0	7	0	7	0	21	62
	esquerda	1	6	1	6	1	6	21	
	direita	1	6	1	5	1	6	20	
80 km/h	centro	7	0	7	0	7	0	21	65
	esquerda	0	9	0	9	0	8	26	
	direita	5	2	5	2	4	0	18	
90 km/h	centro	2	4	2	4	2	4	18	18
	esquerda	0	0	0	0	0	0	0	
	direita	0	0	0	0	0	0	0	
Totais		32	38	31	35	31	38	205	
		70		66		69			

Tendo como base a Tabela 6.3, foram construídos os diagramas de caixas apresentados nas Figuras 6.14, 6.15 e 6.16, os quais contemplam as distribuições das diferenças relativas correspondentes às medidas de PBT e de pesos por grupos de eixos de cada um dos veículos de referência. Para cada veículo e, também, para cada conjunto de temperaturas, foram consideradas todas as variações de velocidade e de posição lateral na faixa de rolamento.

Com relação à Figura 6.14, na qual se apresentam as distribuições das diferença relativas das medidas de peso relacionadas ao veículo do tipo caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C), é possível observar, para os dois conjuntos de temperaturas, que as distribuições que apresentam os maiores graus de dispersão são aquelas correspondentes às medidas de peso relativas aos grupos de eixos 2 (G2), tanto em termos de amplitude dos dados quanto com relação ao desvio ou distância inter-quartilica. As diferenças relativas máximas absolutas das medidas de peso, para os dois conjuntos de temperaturas, desconsiderando-se os valores que excedem (*outliers* ou pontos extremos) os limites máximos e mínimos, são iguais a 11% (PBT), 19% (G1) e 16% (G2).

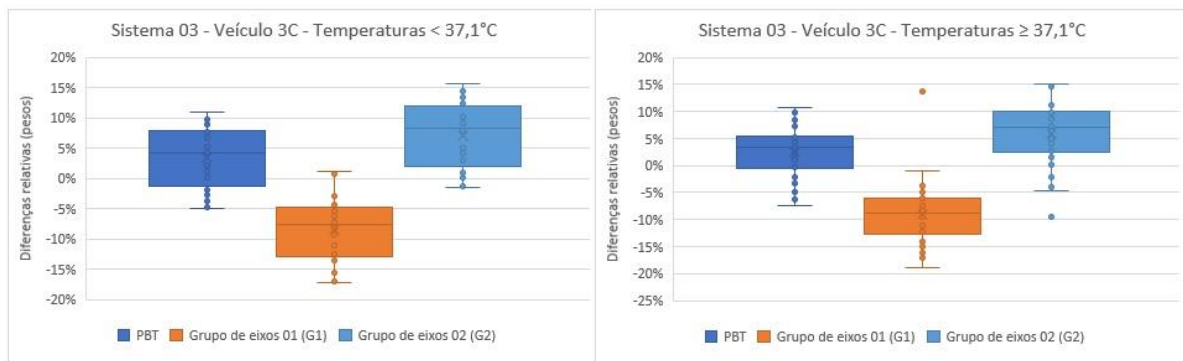


Figura 6.14: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 03 - Caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C) – Temperatura média do pavimento igual a 37,1° C

Referentemente à Figura 6.15, na qual se apresentam as distribuições das diferenças relativas das medidas de peso relacionadas ao veículo do tipo caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3), é possível observar, para o conjunto de temperaturas menores que 37,1° C, que a distribuição que apresenta o maior grau de dispersão é aquela correspondente às medidas de peso relativas aos grupos de eixos 1 (G1), em termos de distância inter-quartílica, apresentando similaridade, em se considerando a amplitude dos dados, à distribuição referente às medidas de peso do grupo de eixos 3 (G3). Já para o conjunto de temperaturas acima de 37,1° C, a distribuição que apresenta maior grau de dispersão se refere às medidas de peso do grupo de eixos 3 (G3), tanto em termos de amplitude quanto em distância inter-quartílica. As diferenças relativas máximas absolutas das medidas de peso, para os dois conjuntos de temperaturas, desconsiderando-se os valores que excedem (*outliers* ou pontos extremos) os limites máximos e mínimos, são iguais a 9% (PBT), 19% (G1), 11% (G2) e 12% (G3).

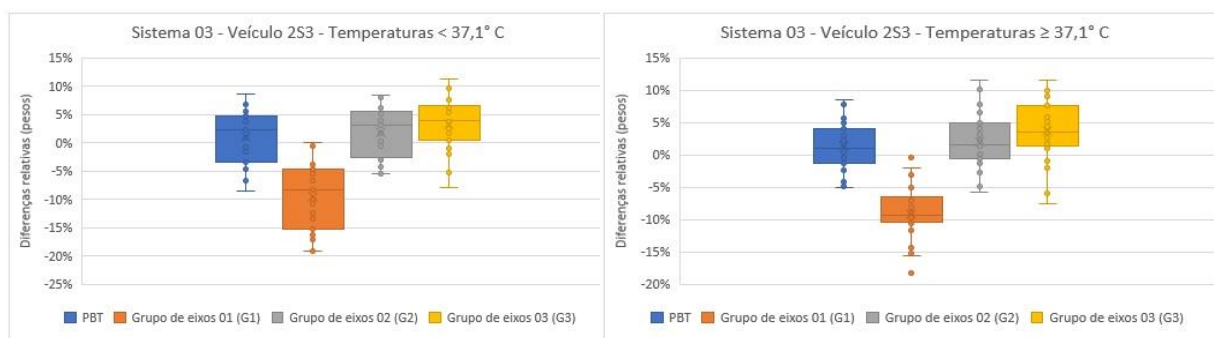


Figura 6.15: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 03 - Caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3) – Temperatura média do pavimento igual a 37,1° C

No tocante à Figura 6.16, na qual se apresentam as distribuições das diferenças relativas das medidas de peso relacionadas ao veículo do tipo caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de

eixos (classe 3S3), é possível observar, para o conjunto de temperaturas menores que 37,1° C, que a distribuição que apresenta o maior grau de dispersão é aquela correspondente às medidas de peso relativas aos grupos de eixos 1 (G1), sendo seguida pelas distribuições referentes ao grupo de eixos 3 (G3), ao PBT e ao grupo de eixos 2 (G2). Já para o conjunto de temperaturas maiores que 37,1° C, a distribuição que apresenta maior grau de dispersão se refere às medidas de peso do grupo de eixos 3 (G3), sendo seguida pelas distribuições relativas às medidas de peso dos grupos de eixos 1 (G1), ao PBT e ao grupo de eixos 2 (G2). As diferenças relativas máximas absolutas das medidas de peso, para os dois conjuntos de temperaturas, desconsiderando-se os valores que excedem (*outliers* ou pontos extremos) os limites máximos e mínimos, são iguais a 13% (PBT), 16% (G1), 14% (G2) e 14% (G3).

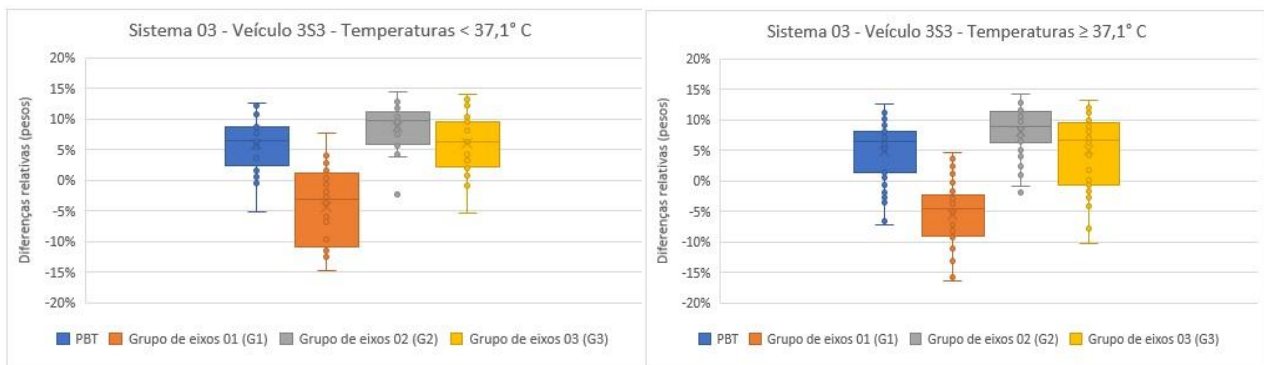


Figura 6.16: Diagramas de caixa das diferenças relativas das medidas de PBT e pesos por grupos de eixos – Sistema 03 - Caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3) – Temperatura média do pavimento igual a 37,1° C

Tendo como base especificamente o Sistema 03, independentemente de suas condições de calibração e percepção (precisão) quanto às medidas de peso reais praticadas, foram verificados valores máximos absolutos diferentes, de acordo com cada tipo de medida de peso considerada (PBT ou peso por grupos de eixos) e, também, conforme cada tipo de configuração veicular. Nesse sentido, os percentuais máximos obtidos, em termos absolutos, considerando todos os veículos de referência, foram iguais a 13% (PBT), 19% (G1), 16% (G2) e 14% (G3).

(iv) Sistemas 01, 02 e 03

A construção dos diagramas de caixas, conforme seções (i), (ii) e (iii), possibilitou a representação gráfica dos dados de distribuições de variáveis quantitativas, então correspondentes às medidas de peso (PBT e peso por grupo de eixos), ou de suas diferenças relativas, em função dos parâmetros definidos e, por conseguinte, possibilitou a obtenção de informações visuais facilitadas a respeito da posição, dispersão e simetria de cada uma das

distribuições, em uma escala variável, além da identificação de seus limites máximos e mínimos, viabilizando a definição de tolerâncias às medidas de peso com base em tais limites. De modo geral, tendo em vista os Sistemas 01, 02 e 03, os percentuais máximos obtidos, em termos absolutos, considerando todos os veículos de referência, foram iguais a 13% (PBT), 20% (G1), 20% (G2) e 17% (G3), sendo que, na maioria dos casos, as distribuições relativas às medidas de peso correspondentes aos grupos de eixos 1 foram aquelas que apresentaram maiores graus de dispersão, enquanto que as distribuições relativas ao PBT, por outro lado, apresentaram menores dispersões, na maior parte das situações.

Entretanto, a obtenção de percentuais máximos e mínimos adequados, para fins de definição de tolerâncias às medidas de peso, quando da fiscalização de veículos comerciais pesados, exige que os sistemas HS-WIM sob avaliação ou em teste estejam calibrados, minimizando os erros totais (intrínsecos e devido a fatores externos) e possibilitando uma mais adequada precisão com relação às medidas de peso a serem estimadas. Da mesma forma, considerando os diversos fatores que podem influenciar na obtenção das medidas de peso, sendo esses, muitas das vezes, inerentes à realidade de cada país, a definição de tolerâncias exige que diversos parâmetros sejam comparados, a fim de se identificar a existência de igualdade entre eles, bem como quais dos parâmetros podem se mostrar preponderantes e, também, quais devem ser as considerações a serem realizadas em termos de definição de tolerâncias. Nesse sentido, na seção seguinte, os testes estatísticos contemplam, primeiramente, a verificação relativa à precisão dos sistemas avaliados e, por último, a comparação entre alguns dos parâmetros de variação estabelecidos.

6.3.2 Etapa 2: Inferências Estatísticas

Nesta etapa, pretende-se avaliar, inicialmente, a situação de precisão dos sistemas HS-WIM contemplados na presente pesquisa com relação às medidas de peso de referência. Para tanto, foram obtidos os p-valores (probabilidade ou menor nível de significância para o qual se rejeita a hipótese nula de um teste estatístico), conforme pode ser observado em consulta às Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6, as quais se referem, respectivamente, aos Sistemas 01, 02 e 03. Tendo sido realizada a avaliação prévia das médias relativas às medidas de pesos observadas (estimadas pelos sistemas), quanto ao seu seguimento à distribuição normal de probabilidade, mediante a aplicação do teste *Kolmogorov-Smirnov*, a obtenção dos p-valores ocorreu por meio da aplicação do teste *t* de *Student* ou do teste de *Wilcoxon* (teste não paramétrico equivalente ao teste *t* de *Student*, quando a suposição de normalidade não é satisfeita).

As Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 mostram os p-valores correspondentes às medidas de peso (PBT e peso por grupos de eixos), para cada um dos veículos de referência e, também, para cada uma das variações de velocidade, posição lateral na faixa de rolamento e temperaturas do pavimento, as quais, por sua vez, foram agrupadas em dois conjuntos, distintos a partir da temperatura média identificada para cada uma das estruturas de pavimento dos respectivos sistemas. Os p-valores foram diferenciados por aqueles que apresentaram diferença significativa a um nível de significância de 5% ($p\text{-valor} < 0,05$), rejeitando a hipótese nula de que a média dos valores observados é igual ao peso real medido (ou que a diferença entre os dois seja igual a zero), e por aqueles cuja diferença não foi significativa a um nível de significância de 5% ($p\text{-valor} \geq 0,05$), ou seja, não se rejeitando a hipótese nula do teste estatístico. Ainda, os p-valores que sinalizaram pela não ocorrência de diferença significativa foram diferenciados entre aqueles cujos tamanhos das amostras eram superiores à 5 e inferiores ou iguais a 5.

De maneira geral, tendo como base as Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6, observa-se que nenhum dos três sistemas HS-WIM avaliados se mostraram devidamente precisos com relação às medidas de peso (PBT e peso por grupos de eixos) estimadas, para todas as variações de veículo, velocidade, posição lateral na faixa de rolamento e de temperaturas do pavimento, uma vez existir grande quantidade de p-valores que apontaram haver diferença significativa a um nível de significância de 5%. Tais imprecisões apontam pela ocorrência de disfunções dos sistemas com relação aos erros intrínsecos e/ou devido a fatores externos. Observa-se que o Sistema 01 se apresentou mais adequado quanto ao nível de precisão, especificamente com relação às condições de teste referentes ao veículo articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3). Nesse sentido, entretanto, os limites máximos e mínimos identificados conforme diagramas de caixas não poderiam ser considerados válidos, de modo geral, à definição de tolerâncias.

Tomando como referência especificamente as observações relativas ao PBT e aos pesos por grupos de eixos, observa-se que, para todos os Sistemas, e independentemente das configurações veiculares e variações de velocidade, posição lateral na faixa de rolamento e temperaturas dos pavimentos, as medidas ou diferenças relativas correspondentes aos grupos de eixos 1 (G1) foram aquelas que apresentaram um número maior de diferenças significativas a um nível de significância de 5%. Tal constatação pode estar relacionada ao fato de as distribuições correspondentes às medidas de peso dos grupos de eixos 1 terem sido aquelas que apresentaram maiores graus de dispersão, na maior parte dos casos dos diagramas de caixas.

Tabela 6.5: Sistema 02 (p-valores)

Sistema 02 (p-valores)																							
Medidas de peso	Velocidades	Posições laterais	Veículos												Todos os veículos		Todos os veículos temperaturas do pavimento						
			Caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (3C)						Caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (2S3)						Caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (3S3)						Temperaturas do pavimento		
			Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento			Temperaturas do pavimento		Temperaturas do pavimento			
			< 37,0° C	≥ 37,0° C	< 37,0° C	≥ 37,0° C	< 37,0° C	≥ 37,0° C	< 37,0° C	≥ 37,0° C	< 37,0° C	≥ 37,0° C	< 37,0° C	≥ 37,0° C	< 37,0° C	≥ 37,0° C		< 37,0° C	≥ 37,0° C				
PBT	60 km/h	Centro	0,0002*	-	0,0287*	0,0002*	0,0328*	-	0,0006*	0,0328*	0,0001*	0,0001*	-	0,0001*	0,5235 ^{NS}	0,0001*	0,0001*	0,5235 ^{NS}	0,0011*	0,0001*	0,9490 ^{NS}		
		Esquerda	0,3141 ^{NS}	0,1690 ^{NS}	-	0,3141 ^{NS}	0,0130*	-	0,0026*	0,0001*	0,0001*	-	-	0,0001*	0,0026*	0,0016*	-	0,0011*	-	-	0,0001*		
		Direita	0,1056 ^{NS}	-	0,0287*	0,0027*	0,0036*	0,0006*	0,0001*	-	-	-	-	-	0,1250 ^{NS}	-	-	0,0001*	-	-	0,0001*		
	70 km/h	Centro	0,3750 ^{NS}	0,0106*	0,0822 ^{NS}	0,2950 ^{NS}	0,0038*	0,0038*	0,0038*	0,0038*	0,0002*	0,0002*	0,4532 ^{NS}	0,0003*	0,4532 ^{NS}	0,5196 ^{NS}	0,0301*	0,0015*	0,0288*	0,0097*	0,7149 ^{NS}		
		Esquerda	0,5215 ^{NS}	0,0106*	0,2314 ^{NS}	0,1125 ^{NS}	0,0023*	0,2730 ^{NS}	0,2272 ^{NS}	0,0152*	0,0001*	0,0028*	0,0002*	0,0554 ^{NS}	0,1400 ^{NS}	0,0418*	0,0008*	0,2088 ^{NS}	0,5196 ^{NS}	0,0301*	0,0015*	0,0097*	
		Direita	0,0009*	-	-	0,0009*	-	0,8105 ^{NS}	-	-	-	0,8105 ^{NS}	-	0,0003*	-	0,0003*	-	0,7533 ^{NS}	-	-	0,7533 ^{NS}		
	80 km/h	Centro	-	-	0,0157*	-	-	0,0001*	-	0,0001*	0,0001*	-	-	-	-	-	-	0,0001*	-	-	0,0001*		
		Esquerda	-	-	0,1129 ^{NS}	0,0048*	0,1129 ^{NS}	-	-	0,0001*	0,0001*	0,0001*	-	-	0,1410 ^{NS}	0,1410 ^{NS}	0,3909 ^{NS}	0,3909 ^{NS}	0,0002*	0,0001*	0,0002*		
		Direita	-	-	0,6554 ^{NS}	-	0,6223 ^{NS}	-	-	0,8351 ^{NS}	0,6960 ^{NS}	0,0003*	-	-	-	-	-	0,3877 ^{NS}	-	-	0,1796 ^{NS}		
	90 km/h	Centro	-	-	0,7506 ^{NS}	0,0586 ^{NS}	0,7506 ^{NS}	-	-	0,1172 ^{NS}	0,0654 ^{NS}	-	-	-	-	-	-	0,4285 ^{NS}	-	-	0,3745 ^{NS}		
		Esquerda	-	-	0,1250 ^{NS}	-	0,1250 ^{NS}	-	-	0,0435*	0,1566 ^{NS}	0,1770 ^{NS}	-	-	0,2211 ^{NS}	0,8121 ^{NS}	0,2211 ^{NS}	0,8121 ^{NS}	-	-	0,0008*		
		Direita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0008*			
Todas as velocidades	Centro	0,0002*	0,0300*	0,0128 ^{NS}	0,0001*	0,0131*	0,0009*	0,0053*	-	0,0001*	0,1805 ^{NS}	0,0008*	0,4049 ^{NS}	0,0004*	0,0004*	0,0004*	0,0003*	-	-	0,0003*			
	Esquerda	0,7084 ^{NS}	0,0025*	0,0390*	0,0001*	0,2891 ^{NS}	0,1916 ^{NS}	0,0001*	0,0002*	0,0010*	0,0001*	0,6875 ^{NS}	0,2483 ^{NS}	0,0143*	0,0750 ^{NS}	0,0764 ^{NS}	0,0001*	0,0010*	0,0010*				
	Direita	0,4527 ^{NS}	0,3294 ^{NS}	0,8174 ^{NS}	0,0003*	0,5587 ^{NS}	0,1259 ^{NS}	0,0003*	0,0003*	0,0003*	-	-	-	0,1668 ^{NS}	0,1668 ^{NS}	0,8388 ^{NS}	0,0816 ^{NS}	0,6587 ^{NS}	0,6587 ^{NS}				
Grupo de eixos (G1)	60 km/h	Centro	0,4226 ^{NS}	-	0,0151*	0,4226 ^{NS}	0,0003*	0,0001*	0,0009*	0,0015*	0,0001*	0,0001*	-	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0043*		
		Esquerda	0,0285*	0,0061*	-	0,0285*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	-	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*		
		Direita	0,0018*	-	0,0151*	0,0010*	0,0797 ^{NS}	-	0,0009*	0,0001*	-	-	-	-	-	0,1250 ^{NS}	-	-	-	-	0,0001*		
	70 km/h	Centro	-	-	0,0148*	0,3878 ^{NS}	0,3878 ^{NS}	0,0003*	0,0345*	0,0003*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0036*		
		Esquerda	0,8335 ^{NS}	0,0083*	0,2705 ^{NS}	0,2413 ^{NS}	0,6780 ^{NS}	0,2354 ^{NS}	0,2494 ^{NS}	0,7019 ^{NS}	0,1687 ^{NS}	0,3698 ^{NS}	0,0006*	0,0030*	0,0001*	0,0019*	0,0005*	0,4835 ^{NS}	0,0001*	0,0723 ^{NS}	0,0006*		
		Direita	0,0004*	-	0,0004*	0,1046 ^{NS}	-	-	-	0,7409 ^{NS}	0,1046 ^{NS}	-	0,0625 ^{NS}	-	-	0,0625 ^{NS}	0,0001*	-	-	-	0,0001*		
	80 km/h	Centro	-	-	0,2188 ^{NS}	0,0594 ^{NS}	-	-	0,7409 ^{NS}	0,7409 ^{NS}	0,0001*	0,0001*	-	-	-	-	-	0,0357*	-	-	0,0357*		
		Esquerda	-	-	0,2985 ^{NS}	0,2985 ^{NS}	-	-	0,0544 ^{NS}	0,8629 ^{NS}	0,0544 ^{NS}	0,8629 ^{NS}	-	-	0,0774 ^{NS}	0,0774 ^{NS}	0,4987 ^{NS}	0,4987 ^{NS}	0,9266 ^{NS}	0,0049*	0,9266 ^{NS}		
		Direita	-	-	0,0008*	0,1250 ^{NS}	-	-	1,0000 ^{NS}	-	1,0000 ^{NS}	-	-	-	-	-	-	0,0008*	-	-	0,0006*		
	90 km/h	Centro	-	-	0,0992 ^{NS}	0,0992 ^{NS}	-	-	0,0292*	0,2521 ^{NS}	0,2521 ^{NS}	0,2181 ^{NS}	-	-	-	-	-	0,0007*	-	-	0,0007*		
		Esquerda	-	-	0,3092 ^{NS}	0,3092 ^{NS}	-	-	0,5932 ^{NS}	-	0,5932 ^{NS}	-	-	0,0288*	0,0073*	0,0288*	0,0073*	-	-	0,3235 ^{NS}	0,0037*		
		Direita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Todas as velocidades	Centro	0,4226 ^{NS}	0,0001*	0,0018*	0,0005*	0,0078*	0,0003*	0,0345*	0,0003*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*			
	Esquerda	0,0325*	0,0001*	0,0509 ^{NS}	0,0001*	0,0034*	0,0064*	0,0382*	0,0808 ^{NS}	0,6198 ^{NS}	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*			
	Direita	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0295*	0,0001*	0,0015*	0,0625 ^{NS}	0,0001*	0,0625 ^{NS}	-	-	0,0625 ^{NS}	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*				
Grupo de eixos (G2)	60 km/h	Centro	0,0001*	-	0,1363 ^{NS}	0,8692 ^{NS}	0,0335*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0118*	0,0001*	-	0,0001*	0,2863 ^{NS}	0,0037*	-	0,2863 ^{NS}			
		Esquerda	0,3692 ^{NS}	0,0157*	0,1363 ^{NS}	0,1363 ^{NS}	0,0266*	0,0244*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	-	-	0,0118*	0,0001*	0,0015*	-	0,0037*	0,0015*			
		Direita	0,1932 ^{NS}	-	0,0831 ^{NS}	0,0831 ^{NS}	0,0125*	0,0456 ^{NS}	0,0875 ^{NS}	0,0478 ^{NS}	0,0875 ^{NS}	0,0478 ^{NS}	-	-	0,7749 ^{NS}	0,7749 ^{NS}	0,5567 ^{NS}	-	-	0,5567 ^{NS}			
	70 km/h	Centro	-	-	0,0003*	0,0003*	0,0203*	0,0203*	0,0003*	0,0003*	0,0003*	0,0003*	-	-	-	-	-	0,0162*	-	-	0,0162*		
		Esquerda	-	-	0,0186*	0,0186*	0,6201 ^{NS}	0,9084 ^{NS}	0,6201 ^{NS}	0,7845 ^{NS}	0,6201 ^{NS}	0,7845 ^{NS}	-	-	0,0583 ^{NS}	0,0583 ^{NS}	0,7506 ^{NS}	0,7506 ^{NS}	0,5979 ^{NS}	0,0701*	0,5979 ^{NS}		
		Direita	-	-	0,0892 ^{NS}	0,0644 ^{NS}	-	-	0,0688 ^{NS}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8212 ^{NS}	-	0,8212 ^{NS}		
	80 km/h	Centro	-	-	0,3227 ^{NS}	0,3227 ^{NS}	0,0080*	0,0044*	0,0080*	0,1264 ^{NS}	0,5615 ^{NS}	0,0879 ^{NS}	-	-	-	-	-	0,1920 ^{NS}	-	-	0,1920 ^{NS}		
		Esquerda	-	-	0,0130*	0,0130*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0125*	-	0,0125*	0,1532 ^{NS}	0,1475 ^{NS}	0,2589 ^{NS}	0,1056 ^{NS}	0,3366 ^{NS}	0,6126 ^{NS}		
		Direita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1898 ^{NS}	-	-	0,1898 ^{NS}			
	90 km/h	Centro	-	-	0,0003*	0,0003*	0,0203*	0,0203*	0,0003*	0,0003*	0,0003*	0,0003*	-	-	-	-	-	0,0162*	-	-	0,0162*		
		Esquerda	-	-	0,0186*	0,0186*	0,6201 ^{NS}	0,9084 ^{NS}	0,6201 ^{NS}	0,7845 ^{NS}	0,6201 ^{NS}	0,7845 ^{NS}	-	-	0,0583 ^{NS}	0,0583 ^{NS}	0,7506 ^{NS}	0,7506 ^{NS}	0,5979 ^{NS}	0,0701*	0,5979 ^{NS}		
		Direita	-	-	0,0892 ^{NS}	0,0644 ^{NS}	-	-	0,0688 ^{NS}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8212 ^{NS}	-	0,8212 ^{NS}		
Todas as velocidades	Centro	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0003*	0,2184 ^{NS}	0,0008*	0,2100 ^{NS}	0,0008*	0,2871 ^{NS}	0,0774 ^{NS}	0,8452 ^{NS}	0,9219 ^{NS}			
	Esquerda	0,5525 ^{NS}	0,0002*	0,0001*	0,0003*	0,0023*	0,4791 ^{NS}	0,0060*	0,0236*	0,0001*	0,0197*	0,0645 ^{NS}	0,0031*	0,0024*	0,0001*	0,0099*	0,0774 ^{NS}	0,8452 ^{NS}	0,9219 ^{NS}				
	Direita	0,0425*	0,2949 ^{NS}	0,0246*	0,0001*	0,0012*	0,0001*	0,0012*	0,0001*	0,0012*	0,0125*	-	-	0,0125*	0,6746 ^{NS}	0,0580 ^{NS}	0,4348 ^{NS}	0,4348 ^{NS}					
Grupo de eixos (G3)	60 km/h	Centro	-	-	-	-	0,0009*	-	0,0009*	0,0001*	0,0001*	-	-	-	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,5827 ^{NS}			
		Esquerda	-	-	-	-	0,3233 ^{NS}	0,0019*	0,5827 ^{NS}	0,3233 ^{NS}	0,0052*	0,0001*	0,0001*	-	-	0,0001*	0,0001*	0,0012*	-	0,0012*			
		Direita	-	-	-	-	0,5827 ^{NS}	0,9976 ^{NS}	0,9976 ^{NS}	-	-	-	-	-	0,1265 ^{NS}	0,1265 ^{NS}	-	-	-	0,9976 ^{NS}			
	70 km/h	Centro	-	-	-	-	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	0,0051	-	-	0,7371 ^{NS}	0,7371 ^{NS}	0,0177*	-	-	0,0177*			
		Esquerda	-	-	-	-	0,1904 ^{NS}	0,0044*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,2470 ^{NS}	0,6875 ^{NS}	0,6250 ^{NS}	0,0039*	0,6875 ^{NS}	0,9571 ^{NS}	0,1103 ^{NS}	0,2479 ^{NS}	0,0087*	0,0543 ^{NS}		
		Direita																					

Em sequência, independentemente da situação de precisão identificada para os sistemas, foram realizadas comparações entre os pesos médios (ou diferenças relativas) de diferentes parâmetros, visando verificar a existência de igualdade entre eles e, portanto, se existe influência de determinado parâmetro nas medidas de peso a serem obtidas pelos sistemas sob avaliação. Para tanto, foram obtidos os p-valores, conforme se observa em consulta às Tabelas 6.7, 6.8 e 6.9, as quais se referem, respectivamente, aos Sistemas 01, 02 e 03. Tendo sido realizada a avaliação prévia das médias amostrais quanto à sua aderência à distribuição normal de probabilidade, mediante a aplicação do teste *Kolmogorov-Smirnov*, bem como a avaliação prévia quanto à igualdade das variâncias, por meio do teste de homocedasticidade de *Levene*, a obtenção dos p-valores ocorreu a partir da aplicação do teste ANOVA ou do teste de *Kruskal-Wallis* (teste não paramétrico equivalente à ANOVA, quando as suposições de normalidade e/ou homogeneidade das variâncias não são satisfeitas).

As Tabelas 6.7, 6.8 e 6.9 contemplam, portanto, os p-valores correspondentes a seis testes comparativos de diferentes parâmetros, sendo eles: (i) comparação entre veículos; (ii) comparação entre temperaturas (conforme temperatura média identificada para cada estrutura de pavimento); (iii) comparação entre velocidades; (iv) comparação entre temperaturas por tipos de veículos; (v) comparação entre velocidades por tipos de veículos; e (vi) comparação entre veículos por faixa de velocidade. Os p-valores foram diferenciados por aqueles que apresentaram diferença significativa a um nível de significância de 5% ($p\text{-valor} < 0,05$), rejeitando a hipótese nula de que as médias das populações são todas iguais (ou que a diferença entre elas seja igual a zero), havendo pelo menos duas médias populacionais diferentes entre si, e por aqueles cuja diferença não foi significativa a um nível de significância de 5% ($p\text{-valor} \geq 0,05$), ou seja, não se rejeitando a hipótese nula do teste estatístico.

Ainda considerando as Tabelas 6.7, 6.8 e 6.9, após a identificação dos p-valores, foi aplicado o teste de *Tukey* (teste de comparações múltiplas) para aquelas distribuições de diferenças relativas das medidas de peso (PBT e peso por grupos de eixos) que apresentaram diferença significativa a um nível de significância de 5% ($p\text{-valor} < 0,05$) nos testes ANOVA ou *Kruskal-Wallis*. A partir da aplicação do teste de *Tukey*, em que as médias foram comparadas duas a duas através de sua diferença em valor absoluto, a fim de verificar a existência de contraste entre elas, identificaram-se os pares de parâmetros (tipo de veículo, velocidade e temperatura), cujas médias das variáveis apresentaram diferença significativa a um nível de significância de 5%, influenciando significativamente os resultados obtidos nos testes ANOVA e *Kruskal-*

Wallis, e aquelas que não apresentaram diferença significativa a um nível de significância de 5%.

Tendo como referência a Tabela 6.7, mais especificamente com relação à comparação entre os veículos, é possível observar que, para todas as medidas de peso (PBT e pesos por grupos de eixos), ou diferenças relativas, ocorreram diferenças significativas entre pelo menos duas das médias populacionais dos veículos considerados, o que se confirma conforme o teste de comparações múltiplas realizadas entre as médias dos parâmetros (duas a duas). Tal resultado mostra que as configurações dos veículos parecem influenciar o Sistema 01 quanto à percepção e obtenção das medidas de peso praticadas.

Ainda tendo como base a Tabela 6.7, considerando a comparação realizada entre os conjuntos de temperaturas, tendo sido estes diferenciados a partir da temperatura média identificativa para o pavimento do Trecho A01 (Figura 6.3), observa-se que, com exceção das medidas relativas ao PBT, para as medidas de peso correspondentes aos grupos de eixos 1 (G1), 2 (G2) e 3 (G3), não foram identificadas diferenças significativas entre os dois conjuntos de temperaturas. Tal resultado mostra que as variações de temperaturas parecem não influenciar a obtenção dos pesos referentes aos grupos de eixos, de modo individualizado, mas parecem influenciar a obtenção do PBT e, portanto, parecem influenciar o Sistema 01 quanto à obtenção das medidas de peso de maneira geral.

Da comparação realizada entre as velocidades (Tabela 6.7), observa-se que, à exceção das medidas relativas ao PBT e ao grupo de eixos 1, não foram identificadas diferenças significativas entre as velocidades, para as medidas de peso correspondentes aos grupos de eixos 2 e 3. As diferenças significativas referentes ao PBT e aos pesos dos grupos de eixos 1 se confirmam conforme teste de comparações múltiplas. Esse resultado mostra que, em relação ao Sistema 01, as variações de velocidade parecem influenciar a obtenção dos pesos referentes ao PBT e ao grupo de eixos 1, mas não aqueles correspondentes aos grupos de eixos 2 e 3 e, portanto, parecem influenciar o Sistema 01 quanto à obtenção das medidas de peso de modo geral.

Com relação à comparação realizada entre as temperaturas por tipos de veículos (Tabela 6.7), observa-se que, para o caminhão articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3), não foram identificadas diferenças significativas entre os conjuntos de temperaturas, para nenhuma

das medidas de peso. Relativamente ao caminhão articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3), somente foi identificada diferença significativa com relação ao PBT. Para o caminhão não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C), ocorrem diferenças significativas para as medidas relativas ao PBT e aos pesos dos grupos de eixos 2. Tal resultado, que se confirma conforme teste de comparações múltiplas, mostra que, a depender da configuração do veículo, as variações de temperatura parecem influenciar o Sistema 01 quanto à obtenção das medidas de peso, principalmente aquelas correspondentes ao PBT.

Da comparação realizada entre as velocidades por tipos de veículos (Tabela 6.7), observa-se que, para todas as configurações veiculares, foram identificadas diferenças significativas entre pelo menos duas das velocidades, principalmente com relação às medidas de peso dos grupos de eixos 1, o que se confirma conforme teste de comparações múltiplas. Os resultados dessa comparação mostram que, a depender da configuração dos veículos, as variações de velocidade parecem influenciar a obtenção das medidas de peso pelo Sistema 01.

E por último, os resultados decorrentes da comparação realizada entre os tipos de veículos por faixa de velocidade (Tabela 6.7) mostram que, a depender da faixa de velocidade, pelo menos duas das configurações veiculares parecem influenciar na obtenção das medidas de peso pelo Sistema 01. Tal resultado é confirmado conforme teste de comparações múltiplas, tendo sido identificado que, para todas as faixas de velocidade, as medidas de peso (PBT e pesos por grupos de eixos) parecem ser influenciadas, para a maioria das comparações, principalmente pela diferença entre os veículos articulados de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classes 2S3) e de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classes 3S3). Entretanto, diferenças significativas também foram identificadas para as comparações realizadas (duas a duas) nas demais configurações veiculares.

Tabela 6.7: Sistema 01 (p-valores) e comparações múltiplas

Sistema 01 - (p-valores) e comparações múltiplas														
Itens	Testes	Diferenças relativas das medidas de peso (Variáveis) - ANOVA e <i>Kruskal-Wallis</i>					Diferenças relativas das medidas de peso (Variáveis) - <i>Tukey</i>							
		Descrição das distribuições		PBT	G1	G2	G3	Descrição das distribuições		PBT	G1	G2	G3	
1	Comparação entre veículos	Classe 3C					Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)	NS	*	*	*	-		
		Classe 2S3	0,0001*	0,0003*	0,0001*	0,0001*	Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)	*	*	*	*	*		
		Classe 3S3					Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)	*	NS	*	*	-		
2	Comparação entre temperaturas	< 37,2° C	0,0195*	0,6326 ^{NS}	0,1006 ^{NS}	0,0712 ^{NS}	< 37,2° C e ≥ 37,2° C		*	-	-	-		
		≥ 37,2° C												
3	Comparação entre velocidades	60 km/h	0,0090*	0,0001*	0,0998 ^{NS}	0,5072 ^{NS}	60 e 70 km/h (vice-versa)		NS	NS				
		70 km/h					60 e 80 km/h (vice-versa)		NS	*				
		80 km/h					60 e 90 km/h (vice-versa)		*	*				
		90 km/h					70 e 80 km/h (vice-versa)		NS	*				
							70 e 90 km/h (vice-versa)		*	*				
		80 e 90 km/h (vice-versa)		NS	NS									
4	Comparação entre temperaturas por tipo de veículo	Classe 3C	< 37,2° C	0,0387*	0,3860 ^{NS}	0,0322*	-	Classe 3C	< 37,2° C e ≥ 37,2° C	*	-	*	-	
			≥ 37,2° C											
		Classe 2S3	< 37,2° C	0,4113 ^{NS}	0,1994 ^{NS}	0,4355 ^{NS}	0,3028 ^{NS}	Classe 2S3	< 37,2° C e ≥ 37,2° C	-	-	-	-	
			≥ 37,2° C											
		Classe 3S3	< 37,2° C	0,0240*	0,7350 ^{NS}	0,0599 ^{NS}	0,0710 ^{NS}	Classe 3S3	< 37,2° C e ≥ 37,2° C	*	-	-	-	
			≥ 37,2° C											
5	Comparação entre velocidades por tipo de veículo	Classe 3C	60 km/h	0,0004*	0,0001*	0,0009*	-	Classe 3C	60 e 70 km/h (vice-versa)		NS	NS	NS	
			70 km/h						60 e 80 km/h (vice-versa)		NS	*	NS	
			80 km/h						60 e 90 km/h (vice-versa)		*	*	*	
			90 km/h						70 e 80 km/h (vice-versa)		NS	*	NS	
									70 e 90 km/h (vice-versa)		*	*	*	
		Classe 2S3	60 km/h	0,4688 ^{NS}	0,0014*	0,2033 ^{NS}	0,6671 ^{NS}	Classe 2S3	60 e 70 km/h (vice-versa)			NS		
			70 km/h						60 e 80 km/h (vice-versa)			*		
			80 km/h						60 e 90 km/h (vice-versa)		-	*		
			90 km/h						70 e 80 km/h (vice-versa)			*		
									70 e 90 km/h (vice-versa)			*		
		Classe 3S3	60 km/h	0,1233 ^{NS}	0,0029*	0,0289*	0,2408 ^{NS}	Classe 3S3	60 e 70 km/h (vice-versa)			NS	*	
			70 km/h						60 e 80 km/h (vice-versa)			*	*	
			80 km/h						60 e 90 km/h (vice-versa)		-	NS	NS	
			90 km/h						70 e 80 km/h (vice-versa)			*	*	
									70 e 90 km/h (vice-versa)			NS	NS	
6	Comparação entre veículos por faixa de velocidade	60 km/h	Classe 3C	0,0001*	0,0368*	0,0001*	0,0027*	60 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		NS	*	NS	-
			Classe 2S3						Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)		*	NS	*	*
			Classe 3S3						Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)		*	NS	*	-
		70 km/h	Classe 3C	0,0001*	0,0002*	0,0001*	0,0071*	70 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		NS	*	*	-
			Classe 2S3						Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)		*	*	*	*
			Classe 3S3						Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)		*	NS	*	-
		80 km/h	Classe 3C	0,0001*	0,0623 ^{NS}	0,0001*	0,0045*	80 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		NS		NS	-
			Classe 2S3						Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)		*	-	*	*
			Classe 3S3						Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)		*		*	-
		90 km/h	Classe 3C	0,0122*	0,0681 ^{NS}	0,0024*	0,0386*	90 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		NS		*	-
			Classe 2S3						Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)		*	-	*	*
			Classe 3S3						Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)		NS		NS	-

G: Grupo de eixos / (*) significativo a 5% / (NS): não significativo a 5%

Em sequência, tendo como referência a Tabela 6.8, mais especificamente com relação à comparação realizada entre os veículos, é possível observar que, com exceção das medidas relativas aos grupos de eixos 3 (G3), ocorreram diferenças significativas entre pelo menos duas das médias populacionais dos veículos considerados, o que se confirma conforme teste de comparações múltiplas. Tal resultado mostra que a configuração dos veículos parece influenciar o Sistema 02 quanto à percepção e obtenção das medidas de peso praticadas.

Ainda tendo como base a Tabela 6.8, considerando a comparação realizada entre os conjuntos de temperaturas, tendo sido estes diferenciados a partir da temperatura média identificativa para o pavimento do Trecho A02 (Figura 6.3), observa-se que, com exceção das medidas relativas ao PBT e aos grupos de eixos 1, para as medidas de peso correspondentes aos grupos de eixos 2 (G2) e 3 (G3), não foram identificadas diferenças significativas entre os dois conjuntos de

temperaturas. Tal resultado mostra que as variações de temperaturas parecem influenciar a obtenção dos pesos referentes ao PBT e aos grupos de eixos 1 e, portanto, parecem influenciar o Sistema 02 quanto à obtenção das medidas de peso.

Da comparação realizada entre as velocidades (Tabela 6.8), observa-se terem sido identificadas diferenças significativas entre pelo menos duas delas, para todas as medidas de peso, conforme também se verifica a partir do teste de comparações múltiplas. Esse resultado mostra que, em relação ao Sistema 02, as variações de velocidade parecem influenciar a obtenção das medidas de peso (PBT e grupos de eixos), principalmente em se comparando as velocidades de 60 e 80 km/h.

Com relação à comparação realizada entre as temperaturas por tipos de veículos (Tabela 6.8), observa-se que, à exceção do veículo de classe 3C, foram identificadas diferenças significativas entre os conjuntos de temperaturas, para todas as medidas de peso, considerando os demais veículos (2S3 e 3S3). Tal resultado, que se confirma conforme teste de comparações múltiplas, mostra que, a depender da configuração do veículo, as variações de temperatura parecem influenciar o Sistema 02 quanto à obtenção das medidas de peso.

Da comparação realizada entre as velocidades por tipos de veículos (Tabela 6.8), observa-se que, à exceção do veículo de classe 3C e ao PBT referente ao veículo de classe 3S3, foram identificadas diferenças significativas, para todas as demais medidas de peso, o que se confirma conforme teste de comparações múltiplas. Os resultados dessa comparação mostram que, a depender da configuração dos veículos, as variações de velocidade, principalmente em se comparando a velocidade 60 km/h com as demais, parecem influenciar a obtenção das medidas de peso pelo Sistema 02.

E por último, dos resultados decorrentes da comparação realizada entre os tipos de veículos por faixa de velocidade (Tabela 6.8), observa-se terem sido identificadas diferenças significativas entre pelo menos dois dos veículos, para cada faixa de velocidade, considerando as diferentes medidas de peso, o que se confirma conforme teste de comparações múltiplas. Tais resultados mostram que, a depender da faixa de velocidade, as configurações veiculares parecem influenciar nas medidas de peso a serem obtidas por meio do Sistema 02.

Tabela 6.8: Sistema 02 (p-valores) e comparações múltiplas

Sistema 02 - (p-valores) e comparações múltiplas																						
Itens	Testes	Diferenças relativas das medidas de peso (Variáveis) - ANOVA e <i>Kruskal-Wallis</i>					Diferenças relativas das medidas de peso (Variáveis) - <i>Tukey</i>															
		Descrição das distribuições		PBT	G1	G2	G3	Descrição das distribuições		PBT	G1	G2	G3									
1	Comparação entre veículos	Classe 3C	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,5893 ^{NS}	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		NS	NS	*	-										
		Classe 2S3					Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)		*	*	*											
		Classe 3S3					Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)		*	*	*											
2	Comparação entre temperaturas	< 37,0° C	0,0001*	0,0257*	0,1211 ^{NS}	0,9752 ^{NS}	< 37,0° C e ≥ 37,0° C		*	*	-	-										
		≥ 37,0° C																				
3	Comparação entre velocidades	60 km/h	0,0001*	0,0009*	0,0004*	0,0367*	60 e 70 km/h (vice-versa)		*	NS	*	NS										
		70 km/h					60 e 80 km/h (vice-versa)		*	*	*	NS										
		80 km/h					60 e 90 km/h (vice-versa)		*	NS	NS	NS										
		90 km/h					70 e 80 km/h (vice-versa)		*	NS	NS	*										
							70 e 90 km/h (vice-versa)		NS	NS	NS	NS										
		80 e 90 km/h (vice-versa)		NS	NS	NS	NS															
4	Comparação entre temperaturas por tipo de veículo	Classe 3C	< 37,0° C	0,9789 ^{NS}	0,1935 ^{NS}	0,7705 ^{NS}	-	Classe 3C	< 37,0° C e ≥ 37,0° C	-	-	-	-									
		Classe 2S3	≥ 37,0° C					0,0001*	0,0007*	0,0003*	0,0038*	Classe 2S3	< 37,0° C e ≥ 37,0° C	*	*	*	*					
		Classe 3S3	< 37,0° C	0,0022*	0,0022*	0,0002*	0,0001*	-	Classe 3S3	< 37,0° C e ≥ 37,0° C	*	*	*	*								
			≥ 37,0° C																			
5	Comparação entre velocidades por tipo de veículo	Classe 3C	60 km/h	0,4716 ^{NS}	0,9622 ^{NS}	0,2154 ^{NS}	-	Classe 3C	60 e 70 km/h (vice-versa)	-	-	-	-									
			70 km/h						60 e 80 km/h (vice-versa)													
			80 km/h						60 e 90 km/h (vice-versa)													
			90 km/h						70 e 80 km/h (vice-versa)													
									70 e 90 km/h (vice-versa)													
		Classe 2S3	60 km/h	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0002*	-	Classe 2S3	60 e 70 km/h (vice-versa)	*	*	*	*								
			70 km/h							60 e 80 km/h (vice-versa)	*	*	*	*								
			80 km/h							60 e 90 km/h (vice-versa)	NS	NS	NS	NS								
			90 km/h							70 e 80 km/h (vice-versa)	NS	NS	NS	NS								
										70 e 90 km/h (vice-versa)	NS	NS	NS	NS								
		Classe 3S3	60 km/h	0,1978 ^{NS}	0,0028*	0,0056*	0,0001*	-	Classe 3S3	60 e 70 km/h (vice-versa)	*	*	*	*								
			70 km/h							60 e 80 km/h (vice-versa)	NS	NS	*									
			80 km/h							60 e 90 km/h (vice-versa)	-	NS	NS	*								
			90 km/h							70 e 80 km/h (vice-versa)	NS	NS	NS	NS								
										70 e 90 km/h (vice-versa)	NS	*	NS									
										80 e 90 km/h (vice-versa)		NS	NS	NS								
			6							Comparação entre veículos por faixa de velocidade	60 km/h	Classe 3C	0,0562 ^{NS}	0,0001*	0,0001*	0,0001*	60 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)	-	*	*	-
												Classe 2S3						Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)				
Classe 3S3	Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)	*		*	*																	
70 km/h	Classe 3C	0,0001*		0,0001*	0,0001*	0,0009*	-	70 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		NS	*	*	*	-							
	Classe 2S3								Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)		*	*	*	*								
	Classe 3S3								Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)		*	*	NS	-								
80 km/h	Classe 3C	0,0508 ^{NS}		0,0016*	0,0001*	0,0343*	-	80 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		-	*	*	*	-							
	Classe 2S3								Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)							*	*	*				
	Classe 3S3								Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)							NS	*	*				
90 km/h	Classe 3C	0,4783 ^{NS}		0,0797 ^{NS}	0,0009*	0,2482 ^{NS}	-	90 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		-	-	*	-								
	Classe 2S3								Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)						*	*	*					
	Classe 3S3								Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)						*	*	*					

Ω Grupo de eixos / (*) significativo a 5% / (NS): não significativo a 5%

Em continuidade, tendo como referência a Tabela 6.9, mais especificamente com relação à comparação realizada entre os veículos, é possível observar que, para todas as medidas de peso (PBT e peso por grupos de eixos), ocorreram diferenças significativas entre pelo menos duas das médias populacionais dos veículos considerados, o que se confirma conforme teste de comparações múltiplas. Tal resultado mostra que a configuração dos veículos parece influenciar o Sistema 03 quanto à percepção e obtenção das medidas de peso praticadas.

Ainda tem como base a Tabela 6.9, considerando a comparação realizada entre os conjuntos de temperaturas, tendo sido estes diferenciados a partir da temperatura média identificada para o pavimento do Trecho A03 (Figura 6.3), observa-se não terem sido identificadas diferenças significativas entre os dois conjuntos de temperaturas, para nenhuma das medidas de peso. Tal

resultado mostra que as variações de temperaturas parecem não influenciar os Sistema 03 quanto à obtenção das medidas de peso.

Da comparação realizada entre as velocidades (Tabela 6.9), observa-se terem sido identificadas diferenças significativas entre pelo menos duas delas, para todas as medidas de peso, o que se confirma conforme teste de comparações múltiplas, principalmente tendo em vista os resultados decorrentes da comparação realizada entre a velocidade 60 e 80 km/h, para todas as medidas de peso. Esse resultado mostra que, em relação ao Sistema 03, as variações de velocidade parecem influenciar a obtenção das medidas de peso (PBT e grupos de eixos).

Com relação à comparação realizada entre as temperaturas por tipos de veículos (Tabela 6.9), observa-se que, para nenhum dos veículos e, também, para nenhuma das medidas de peso (PBT e grupos de eixos), foram identificadas diferenças significativas entre os conjuntos de temperaturas. Tal resultado mostra que, independentemente da configuração dos veículos, as variações de temperatura parecem não influenciar o Sistema 03 quanto à obtenção das medidas de peso.

Da comparação realizada entre as velocidades por tipos de veículos (Tabela 6.9), observa-se que, para todos os tipos de veículos e, também para todas as medidas de peso, foram identificadas diferenças significativas entre pelo menos duas das velocidades, o que se confirma conforme teste de comparações múltiplas. Os resultados dessa comparação mostram que as configurações dos veículos têm relação direta com as variações de velocidade desenvolvidas, parecendo tal relação influenciar, portanto, o Sistema 03 quanto à obtenção das medidas de peso.

E por último, dos resultados decorrentes da comparação realizada entre os tipos de veículos por faixa de velocidade (Tabela 6.9), observa-se terem sido identificadas diferenças significativas entre pelo menos dois dos veículos, para cada faixa de velocidade, considerando as diferentes medidas de peso, o que se confirma conforme teste de comparações múltiplas. Tais resultados mostram que, a depender da faixa de velocidade, as configurações veiculares parecem influenciar nas medidas de peso a serem obtidas por meio do Sistema 03.

Tabela 6.9: Sistema 03 (p-valores) e comparações múltiplas

Sistema 03 - (p-valores) e comparações múltiplas														
Itens	Testes	Diferenças relativas das medidas de peso (Variáveis) - ANOVA e Kruskal-Wallis					Diferenças relativas das medidas de peso (Variáveis) - Tukey							
		Descrição das distribuições		PBT	G1	G2	G3	Descrição das distribuições		PBT	G1	G2	G3	
1	Comparação entre veículos	Classe 3C					Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)	NS	NS	*	-			
		Classe 2S3	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0056*	Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)	*	*	*	*			
		Classe 3S3					Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)	*	*	*	-			
2	Comparação entre temperaturas	< 37,1° C	0,4016 ^{NS}	0,5522 ^{NS}	0,5420 ^{NS}	0,7028 ^{NS}	< 37,1° C e ≥ 37,1° C		-	-	-			
		≥ 37,1° C												
3	Comparação entre velocidades	60 km/h	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	60 e 70 km/h (vice-versa)		*	*	*	NS		
		70 km/h					60 e 80 km/h (vice-versa)		*	*	*	*		
		80 km/h					60 e 90 km/h (vice-versa)		*	*	NS	NS		
		90 km/h					70 e 80 km/h (vice-versa)		*	*	*	*		
							70 e 90 km/h (vice-versa)		NS	NS	NS	NS		
4	Comparação entre temperaturas por tipo de veículo	Classe 3C	< 37,1° C	0,3884 ^{NS}	0,5884 ^{NS}	0,4095 ^{NS}	-	Classe 3C	< 37,1° C e ≥ 37,1° C	-	-	-		
			≥ 37,1° C											
		Classe 2S3	< 37,1° C	0,7643 ^{NS}	0,8522 ^{NS}	0,9226 ^{NS}	0,7923 ^{NS}	Classe 2S3	< 37,1° C e ≥ 37,1° C	-	-	-		
			≥ 37,1° C											
		Classe 3S3	< 37,1° C	0,4006 ^{NS}	0,3655 ^{NS}	0,5196 ^{NS}	0,6995 ^{NS}	Classe 3S3	< 37,1° C e ≥ 37,1° C	-	-	-		
			≥ 37,1° C											
5	Comparação entre velocidades por tipo de veículo	Classe 3C	60 km/h	0,0001*	0,0001*	0,0001*	-	Classe 3C	60 e 70 km/h (vice-versa)		*	NS	NS	
									60 e 80 km/h (vice-versa)		*	*	*	
									60 e 90 km/h (vice-versa)		NS	*	*	
									70 e 80 km/h (vice-versa)		*	*	*	
									70 e 90 km/h (vice-versa)		NS	*	*	
		Classe 2S3	60 km/h	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*	Classe 2S3	60 e 70 km/h (vice-versa)		*	*	*	NS
									60 e 80 km/h (vice-versa)		*	*	*	*
									60 e 90 km/h (vice-versa)		NS	*	*	NS
									70 e 80 km/h (vice-versa)		*	*	*	*
									70 e 90 km/h (vice-versa)		NS	NS	NS	NS
		Classe 3S3	60 km/h	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0005*	Classe 3S3	60 e 70 km/h (vice-versa)		NS	*	*	NS
									60 e 80 km/h (vice-versa)		*	*	*	*
									60 e 90 km/h (vice-versa)		*	*	*	*
									70 e 80 km/h (vice-versa)		*	*	*	*
									70 e 90 km/h (vice-versa)		NS	NS	NS	NS
6	Comparação entre veículos por faixa de velocidade	60 km/h	Classe 3C	0,0004*	0,0043*	0,0001*	0,1035 ^{NS}	60 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		NS	NS	*	
									Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)		*	*	*	
									Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)		*	NS	*	
		70 km/h	Classe 3C	0,0022*	0,0001*	0,0001*	0,0475 ^{NS}	70 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		NS	NS	*	
									Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)		*	*	*	
									Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)		NS	*	NS	
80 km/h	Classe 3C	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0834 ^{NS}	80 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		*	NS	*			
							Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)		NS	*	*			
							Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)		NS	*	NS			
90 km/h	Classe 3C	0,0035*	0,0648 ^{NS}	0,0052*	0,0039*	90 km/h	Classe 3C/ Classe 2S3 (vice-versa)		NS		NS	NS		
							Classe 2S3/ Classe 3S3 (vice-versa)		*	-	*	*		
							Classe 3S3/ Classe 3C (vice-versa)		*		NS	NS		

G: Grupo de eixos / (*) significativo a 5% / (NS): não significativo a 5%

De maneira geral, considerando os p-valores obtidos para os Sistemas 01, 02 e 03, dados os testes comparativos realizados e a situação de precisão dos sistemas, e, também, os testes de comparações múltiplas, é possível verificar que todos eles parecem ser influenciados pelas configurações veiculares, incluindo as respectivas características do tráfego (carga e sua distribuição, dimensões, tipos de eixos, espaçamento entre eixos, tipo de rodado, pressão de enchimento dos pneus e sua distribuição no pavimento, *etc.*), pelas variações de velocidade e, também, pela associação ou relação entre os tipos de veículos e as velocidades praticadas, quando da interação com o pavimento e suas respectivas características geométricas e de respostas às cargas aplicadas. Tal resultado vai ao encontro das considerações apontadas por Gillespie *et al.* (1993) a respeito da interação veículo-via e, também, a respeito da carga dinâmica.

Analogamente ao exposto por Gillespie *et al.* (1993), bem como considerando o que foi apontado por Burnos e Rys (2017), sobre o pavimento fazer parte do sistema de pesagem, os efeitos decorrentes das cargas dinâmicas, ou seja, das oscilações/vibrações dos veículos (associadas às variações de velocidade), quando da interação com a superfície do pavimento e, também, dos sensores de pesagem, acabam determinado como as medidas de peso (PBT e pesos por eixo ou grupos de eixos) poderão ser percebidas pelos sistemas HS-WIM. Entretanto, considerando o exposto por Scheuter (1998) sobre os efeitos decorrentes do erro devido à oscilações dos veículos, tendo como base os resultados identificados nesta pesquisa, as tolerâncias devem ser definidas com base na observância às configurações veiculares, em observância às variações de velocidade, respeitando-se a adequabilidade necessária à conformação geométrica das estruturas de pavimento, principalmente quanto aos níveis de irregularidade longitudinal.

Ainda considerando os p-valores obtidos para os Sistemas 01, 02 e 03, dados os testes comparativos realizados e a situação de precisão dos sistemas, é possível verificar que os efeitos das variações de temperaturas, com relação à obtenção das medidas de peso, parecem influenciar os sistemas cujas estruturas de pavimento sejam compostas por camada de revestimento em concreto asfáltico (CAP), não influenciando os pavimentos rígidos, então estruturados em concreto de cimento *Portland*. Nesse sentido, tendo como base os resultados encontrados, a depender do tipo de estrutura de pavimento a ser utilizada para a composição do sistema HS-WIM, em associação ao local em que se pretende instalar determinado sistema HS-WIM, os efeitos decorrentes da variação de temperatura do pavimento devem ser considerados para fins de definição das tolerâncias.

No Quadro 6.1 estão sintetizados os principais resultados encontrados a partir da aplicação do método proposto nesta pesquisa. São apresentados os limites máximos, mínimos e máximos absolutos obtidos com a construção dos diagramas de caixas, para os veículos de referência, desconsiderando-se os valores que excederam tais limites (*outliers* ou pontos extremos). São apresentados, também, os resultados decorrentes da verificação relativa à situação de precisão dos Sistemas 01, 02 e 03, para algumas das variações referentes aos parâmetros definidos em teste e, por último, contemplam-se os resultados obtidos com a comparação entre alguns dos diferentes parâmetros de teste, como os tipos de veículos, as variações de velocidade e de temperaturas dos pavimentos.

Quadro 6.1: Síntese dos principais resultados obtidos

Itens	Análises		Sistemas																			
			Sistema 01				Sistema 02				Sistema 03				Sistema 01, 02 e 03							
			Medidas de peso				Medidas de peso				Medidas de peso				Medidas de peso							
PBT	G1	G2	G3	PBT	G1	G2	G3	PBT	G1	G2	G3	PBT	G1	G2	G3							
1	LIMITES de caixas)	(diagramas	Veículo classe 3C	Máximos	7%	9%	11%	-	12%	9%	17%	-	11%	1%	16%	-	12%	9%	17%	-		
				Mínimos	-11%	-14%	-10%	-	-10%	-20%	-8%	-	-7%	-19%	-5%	-	-11%	-20%	-10%	-		
			Veículo classe 2S3	Máximos	7%	5%	11%	13%	13%	13%	9%	17%	9%	0%	11%	12%	13%	13%	11%	17%		
				Mínimos	-11%	-19%	-9%	-9%	-6%	-19%	-13%	-5%	-9%	-19%	-6%	-8%	-11%	-19%	-13%	-9%		
			Veículo classe 3S3	Máximos	13%	10%	19%	17%	3%	-5%	15%	15%	13%	5%	14%	14%	13%	10%	19%	17%		
				Mínimos	1%	-17%	-1%	0%	-7%	-20%	-20%	-5%	-7%	-16%	-4%	-10%	-7%	-20%	-20%	-10%		
			Todos veículos	Máximos	13%	10%	19%	17%	13%	13%	17%	17%	13%	5%	16%	14%	13%	13%	19%	17%		
Mínimos	-11%	-19%		-10%	-9%	-10%	-20%	-20%	-5%	-9%	-19%	-6%	-10%	-11%	-20%	-20%	-10%					
			Todos veículos	Máximos absolutos	13%	19%	19%	17%	13%	20%	20%	17%	13%	19%	16%	14%	13%	20%	20%	17%		
2	PRECISÃO DOS SISTEMAS (resultados decorrentes do teste t Student ou Wilcoxon, a depender do atendimento ao teste de normalidade)	Velocidade de 60 km/h, todas as variações de temperaturas dos pavimentos e posições laterais nas faixas de rolamento	Veículo classe 2S3	NS	*	NS	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	NS	Sistemas 01, 02 e 03: não precisos para as variações consideradas		
			Veículo classe 3S3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
			Veículo classe 3C	*	*	NS	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		Velocidade de 70 km/h, todas as variações de temperaturas dos pavimentos e posições laterais nas faixas de rolamento	Veículo classe 2S3	NS	*	*	NS	*	NS	*	*	NS	*	*	NS	*	*	*	*	NS	Sistemas 01, 02 e 03: não precisos para as variações consideradas	
			Veículo classe 3S3	*	*	*	*	*	*	*	*	NS	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	
			Veículo classe 3C	NS	*	*	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Sistemas 01e 03: não precisos para as variações consideradas. Sistema 02 preciso para o veículo 3S3 (todas as medidas de peso). Sistemas não precisos no geral.
		Velocidade de 80 km/h, todas as variações de temperaturas dos pavimentos e posições laterais nas faixas de rolamento	Veículo classe 2S3	NS	*	NS	NS	*	NS	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Sistemas 01: preciso para o veículo 2S3 (todas medidas de peso) e G1. Sistema 02 preciso para PBT. Sistema 03: não preciso. Sistemas não precisos no geral
			Veículo classe 3S3	*	NS	*	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	
			Veículo classe 3C	*	NS	*	-	NS	*	*	*	-	NS	NS	NS	-						
		Velocidade de 90 km/h, todas as variações de temperaturas dos pavimentos e posições laterais nas faixas de rolamento	Veículo classe 2S3	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	NS	NS	*	*	NS	NS			Sistemas 01: preciso para o veículo 2S3 (todas medidas de peso) e G1. Sistema 02 preciso para PBT. Sistema 03: não preciso. Sistemas não precisos no geral
			Veículo classe 3S3	*	NS	*	*	NS	*	NS	NS	*	*	NS	NS	*	*	*	*	*	*	
			Veículo classe 3C	*	*	*	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		Todas as variações de velocidade, temperaturas dos pavimentos e posições laterais nas faixas de rolamento	Veículo classe 2S3	NS	*	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Sistemas 01, 02 e 03: não precisos para as variações consideradas
			Veículo classe 3S3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
			Veículo classe 3C	*	*	*	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Todas variações de temperaturas dos pavimentos, posições laterais nas faixas de rolamento e tipos de veículos	60 km/h	NS	*	NS	*	NS	*	NS	*	NS	*	NS	*	NS	*	NS	*			Sistemas 01, 02 e 03: não precisos para as variações consideradas		
	70 km/h	NS	*	*	*	NS	*	*	*	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	*			
	80 km/h	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			
Todas variações de velocidade, temperaturas dos pavimentos, posições laterais nas faixas de rolamento e tipos de veículos	90 km/h	*	NS	*	*	*	*	NS	*	*	*	*	*	NS	*	*	*	*	*			
		*	*	*	*	NS	*	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Sistemas 01, 02 e 03: não precisos para as variações consideradas		
		*	*	*	*	NS	*	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			
3	COMPARAÇÃO ENTRE PARÂMETROS (resultados decorrentes da ANOVA ou teste de Kruskal-Wallis, a depender do atendimento ao teste de normalidade e/ou igualdade das variâncias)	Veículos		*	*	*	*	*	*	*	*	NS	*	*	*	*	*	*	*	As configurações veiculares parecem influenciar os Sistemas 01, 02 e 03		
			Temperaturas	*	NS	NS	NS	*	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	As variações de temperatura do pavimento parecem influenciar os Sistemas 01 e 02, mas não o 03.	
			Velocidades	*	*	NS	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	As variações de velocidade parecem influenciar os Sistemas 01, 02 e 03
		Temperaturas por tipos de veículos	Veículo classe 3C	*	NS	*	-	NS	NS	NS	-	NS	NS	NS	-							As variações de temperatura do pavimento, a depender das configurações veiculares, parecem influenciar os Sistemas 01 e 02, mas não o 03.
			Veículo classe 2S3	NS	NS	NS	NS	*	*	*	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
			Veículo classe 3S3	*	NS	NS	NS	*	*	*	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
		Velocidades por tipos de veículos	Veículo classe 3C	*	*	*	*	NS	NS	NS	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	As variações de velocidade, a depender das configurações veiculares, parecem influenciar os Sistemas 01, 02 e 03.
			Veículo classe 2S3	NS	*	NS	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
			Veículo classe 3S3	NS	*	*	NS	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
		Veículos por faixa de velocidade	60 km/h	*	*	*	*	NS	NS	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	NS	As configurações veiculares, a depender da faixa de velocidade, parecem influenciar os Sistemas 01, 02 e 03.
70 km/h	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	NS			
80 km/h	*		NS	*	*	NS	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	NS			
90 km/h	*		NS	*	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	*	*	*	*	*	*	*			

G: grupo de eixos/ (*) diferença significativa a 5%/ (NS) diferença não significativa a 5%

7 CONCLUSÃO

A certificação de sistemas de pesagem em alta velocidade pelas entidades metrológicas competentes se configura como um dos principais entraves à sua implementação. No Brasil, ainda não existem requerimentos para a definição de tolerância de tais sistemas, e os sistemas comerciais disponíveis não são capazes de atender às especificações metrológicas estabelecidas pelo INMETRO (Erros Máximos Admissíveis - EMAs), com foco na fiscalização em alta velocidade, no próprio fluxo de tráfego das rodovias; não existindo, portanto, sistemas de pesagem em alta velocidade certificados à fiscalização. Ainda, diante dos diversos fatores de incertezas que podem influenciar à obtenção das medidas de peso, quando da pesagem de um veículo em alta velocidade, os EMAs estabelecidos pelo INMETRO são considerados extremamente rigorosos quanto às precisões requeridas, podendo inviabilizar por completo, para o presente momento, o uso de sistemas de pesagem em alta velocidade para fins legais.

Nesse sentido, tendo em vista as hipóteses estabelecidas, as quais, em princípio, podem ser consideradas triviais, o presente trabalho teve como objetivo geral propor um método para a definição dos limites de tolerâncias de peso de veículos comerciais pesados, a partir do uso de métodos estatísticos de experimentação. Tal proposição visa contribuir para a certificação e uso de sistemas de pesagem em alta velocidade e, por conseguinte, possibilitar a implementação da fiscalização direta dos excessos de cargas transportados, aumentando a eficiência, eficácia e efetividade no combate às práticas de sobrecarregamento de veículos.

Como subsídios à proposição do método, objetivou-se apresentar as características do tráfego e sua interação com pavimentos, haja vista o trabalho ter como foco a utilização de sistemas de pesagem em alta velocidade instalados em estruturas de pavimentos. Tiveram-se como objetivos específicos, também, identificar e apresentar as principais regulamentações brasileiras que tratam da fiscalização dos excessos de carga por meio do uso de tecnologias para a pesagem, identificar e apresentar as principais tecnologias existentes para a pesagem de veículos, identificar as variáveis que podem interferir como fontes de erros (incertezas) para a obtenção das medidas de peso, quando da pesagem de veículos em movimento, e identificar e apresentar os principais documentos internacionais que tratam sobre a avaliação de sistemas WIM.

A partir da aplicação do método proposto, para o qual foram considerados três veículos comerciais pesados, sendo eles articulados e não articulados, com até seis eixos e três grupos de eixos, e com custo médio diário de locação por veículo de cerca de R\$ 1.333,33, identificaram-se os limites de tolerância máximos, mínimos e máximos absolutos relativos às medidas de peso de PBT e peso por grupos de eixos, tendo sido desconsiderados os valores que excederam tais limites (*outliers* ou pontos extremos). São eles: (i) limites máximos: 13% (PBT), 13% (grupo de eixos 1 – G1), 19% (grupo de eixos 2 – G2) e 17% (grupo de eixos 3 – G3); (ii) limites mínimos: -11% (PBT), -20% (grupo de eixos 1 – G1), -20% (grupo de eixos 2 – G2) e -10% (grupo de eixos 3 – G3); (iii) limites máximos absolutos: 13% (PBT), 20% (grupo de eixos 1 – G1), 20% (grupo de eixos 2 – G2) e 17% (grupo de eixos 3 – G3).

Com a finalidade de verificar a situação de precisão dos sistemas empregados quanto à estimativa das medidas de peso, uma vez que sistemas precisos possibilitam minimizar os erros totais (intrínsecos e devido a fatores externos), aumentando a adequabilidade dos limites de tolerância a serem definidos, foi aplicado o teste t de *Student* (paramétrico) e o teste de *Wilcoxon* (teste não paramétrico equivalente ao teste t de *Student*, quando não atendida a suposição de normalidade dos dados). Identificou-se, portanto, que nenhum dos sistemas se encontrava absolutamente preciso com relação a todas as variações dos parâmetros definidos, apontando pela não adequada calibração e pela ocorrência de disfunções possivelmente relacionadas aos erros intrínsecos e/ou devido a fatores externos. Ainda, a situação de precisão dos sistemas foi apontada como possível causa às dispersões verificadas para as diferenças relativas das medidas de peso, com a construção dos diagramas de caixas.

Nesse sentido, tendo em vista os objetivos do trabalho, e considerando as situações gerais de precisão identificadas para os sistemas HS-WIM contemplados, com relação às medidas de PBT e peso por grupos de eixos, bem como considerando exclusivamente o Sistema 01, e exclusivamente as medidas de PBT e pesos por grupos de eixos relativos ao grupo de eixos 2 (G2) (eixo simples de rodas duplas), então correspondentes ao veículo articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 2S3), e para as quais não foram identificadas diferenças significativas ao nível de significância de 5%; permite-se sugerir limites de tolerância para PBT iguais a $\pm 11\%$ e para eixos isolados iguais a $\pm 11\%$. Tais limites, nos quais também estão contempladas as dispersões referentes à balança de precisão utilizada, aproximam-se da classe 10E da Recomendação Internacional OIML R-134-1, de 2006.

Da mesma forma, em se considerando exclusivamente o Sistema 02, bem como exclusivamente as medidas de PBT e pesos por grupos de eixos relativos ao grupo de eixos 2 (G2) (eixo simples de rodas duplas e eixo tandem duplo), então correspondentes, conjuntamente, ao veículo não articulado de 3 eixos e 2 grupos de eixos (classe 3C), ao veículo articulado de 5 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3) e ao veículo articulado de 6 eixos e 3 grupos de eixos (classe 3S3), incluindo todas as variações de velocidade, posição lateral e temperaturas do pavimento, e para as quais não foram identificadas diferenças significativas ao nível de significância de 5%; permite-se sugerir limites de tolerância para PBT iguais a $\pm 13\%$ e para eixos isolados ou grupos de eixos iguais a $\pm 20\%$. Tais limites, nos quais também estão contempladas as dispersões referentes à balança de precisão utilizada, aproximam-se da classe 10F da Recomendação Internacional OIML R-134-1, de 2006.

Entretanto, a fim de analisar a possível influência de diferentes parâmetros na estimativa de medidas de peso, a partir do uso de sistemas HS-WIM e, por conseguinte, na definição de limites de tolerância, foi aplicado o teste ANOVA (paramétrico) e o teste *Kruskal-Wallis* (teste não paramétrico equivalente ao teste ANOVA, quando não atendidas as suposições de normalidade e igualdade das variâncias). Identificou-se, portanto, diante das condições de precisão verificadas para os sistemas, que, para a definição de tolerâncias, devem ser observadas as configurações veiculares (dimensões, tipos de eixos, distância entre eixos, tipo de rodado, pressão de enchimento dos pneus, *etc.*), em associação com as variações de velocidade, respeitando-se a adequabilidade necessária à conformação geométrica e de desempenho das estruturas de pavimento, principalmente quanto aos níveis de irregularidade longitudinal. Identificou-se, por fim, que as variações de temperatura devem ser observadas, a depender do tipo de estrutura de pavimento a ser utilizada para a composição do sistema HS-WIM, em associação ao local (condições climáticas e ambientais) em que se pretende instalar determinado sistema HS-WIM.

Dessa forma, diante do exposto, todos os objetivos do trabalho foram atendidos e, também, todas as hipóteses estabelecidas nesta pesquisa foram validadas, tendo sido identificados diversos fatores que podem interferir como fontes de erros para a obtenção das medidas de peso, quando da pesagem em alta velocidade. Ainda, o uso de métodos estatísticos de experimentação se mostrou como um mecanismo capaz de apresentar resultados relevantes, em termos de definição dos limites de tolerância de peso de veículos comerciais pesados, com foco na pesagem em alta velocidade, possibilitando, também, o aperfeiçoamento de algoritmos

destinados à calibração de sistemas HS-WIM, a melhoria dos níveis de exatidão dos dados a serem estimados, e o controle da qualidade dos dados ao longo do tempo em serviço de sistemas HS-WIM.

7.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Primeiramente, a presente pesquisa considerou o uso de dados provenientes de um número limitado de veículos comerciais pesados, os quais se restringiram àqueles representativos ao local de instalação dos sistemas HS-WIM contemplados na pesquisa. O método também se aplicou somente em um local ou região de instalação dos sistemas HS-WIM, não tendo abarcado demais locais e/ou regiões do país. Ainda, os dados decorreram de testes realizados em apenas uma semana de um mês do ano de 2019, não tendo contemplado outros períodos do ano.

Nesse sentido, uma maior abrangência, tanto em termos de tipos de veículos, quanto de locais e/ou regiões consideradas e, também, de períodos de desenvolvimento do teste, se caracteriza como mais indicada, por possibilitar a consideração de uma maior variabilidade de parâmetros de teste, reduzindo incertezas e propiciando uma melhor definição de tolerâncias às medidas de peso de veículos comerciais pesados. Entretanto, uma maior abrangência dos fatores citados pode envolver custos elevados, seja relacionado à construção de trechos de pavimentos, seja em relação à aquisição e calibração de sistemas de pesagem e locação de veículos. Para esta pesquisa, por exemplo, considerando exclusivamente a locação dos veículos empregados, o custo total, sem considerar o carregamento, foi de aproximadamente R\$ 20.000,00.

A presente pesquisa também não contemplou a variação e verificação de parâmetros relacionados às características ou configurações veiculares, como a distância entre eixos, tipos de rodados, tipos de pneus, pressão de enchimento dos pneus, tipos de suspensões, os quais poderiam apresentar influência na estimativa das medidas de peso pelos sistemas HS-WIM. Com relação às estruturas de pavimentos, também não foram contempladas verificações relativas às condições construtivas e/ou geométricas e de desempenho, principalmente, em termos de irregularidade longitudinal. A consideração de tais parâmetros, sejam eles referentes aos veículos ou aos pavimentos, é indicada, a fim de minimizar incertezas relacionadas às precisões dos sistemas e, também, a fim de propiciar um melhor relacionamento dos resultados provenientes das análises estatísticas, contribuindo para uma melhor definição dos limites das tolerâncias de peso.

Especificamente com relação aos sistemas, estes foram identificados como não precisos a maioria das variações dos parâmetros considerados na pesquisa, sendo a precisão indicada para uma adequada definição de tolerâncias. Por último, algumas das pesagens ou passadas realizadas sobre os sensores de peso e, portanto, pelos sistemas HS-WIM, dada a capacidade de percepção do próprio sistema e a consideração somente de medidas válidas, não resultaram em medidas de peso, que pudessem ser avaliadas, e/ou resultaram em um número reduzido de observações, sendo uma quantidade maior delas indicada para a realização dos testes estatísticos.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho abordou a respeito da definição de limites de tolerância às medidas de peso, como foco no uso de sistemas de pesagem em alta velocidade, visando contribuir para a fiscalização direta de veículos comerciais pesados. Para tanto, foi proposto método baseado na experimentação estatística. Entretanto, diversos são os fatores que podem influenciar na definição de tolerâncias das medidas de peso, sendo seu estudo e abordagem importantes, tanto do ponto de vista acadêmico-científico, quanto para a sociedade em geral. Dessa forma, seguem algumas recomendações para trabalhos futuros, que podem ser empregados conforme tema abordado nesta dissertação:

- Avaliar sistemas HS-WIM quanto à influência de outros tipos e/ou configurações veiculares, com relação à estimativa das medidas de peso e/ou diferenças relativas das medidas de peso, contemplando também demais locais e/ou regiões, a fim de verificar a influência de condições climáticas e ambientais diferentes quanto à estimativa das medidas de peso e, ainda, períodos de teste e análise diversos e mais ampliados;
- Avaliar sistemas HS-WIM quanto à estimativa das medidas de peso, referentemente às variações de parâmetros relacionados aos veículos, como tipos de eixos, distância entre eixos, tipo de rodado, tipos de pneus, pressão de enchimento de pneus, tipo de suspensão, *etc.*;
- Avaliar sistemas HS-WIM quanto à estimativa das medidas de peso, referentemente às variações construtivas, geométricas e de desempenho de pavimentos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2007). Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 6067:2007. Veículos rodoviários automotores, seus rebocados e combinados – classificação, terminologia e definições.*
- ABNT (2012). Associação Brasileira De Normas Técnicas. *NBR 9762:2012. Veículos rodoviários de carga – terminologia.*
- AL-QADI, I. L.; WANG, H.; OUYANG, Y. (2004). Characterization of pavement damage due to different tire configurations. *Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists*. v. 84.
- AL-QADI, I. L.; WANG, H.; OUYANG, Y.; GRIMMELSMAN, K.; PURDY, J. (2016). *LTBP Program's Literature Review on Weigh-in-Motion Systems*. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure and Development. Long-Term Bridge Performance Program. FHWA-HRT-16-024, p. 42. Disponível em <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/ltpb/16024/16024.pdf>>. Acesso em 08 de abril de 2020.
- ANDRADE FILHO, G. M. (2016). Fiscalização da Operação do Tráfego Rodoviário. *Notas de Aula. Curso de Especialização em Operações Rodoviárias. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina.*
- ANTT (2020a). Agência Nacional de Transportes Terrestres. *RNTRC em números*. Disponível em <http://www.antt.gov.br/cargas/arquivos_old/Estatisticas.html> Acesso em 12 de março de 2020.
- ANTT (2020b). Agência Nacional de Transportes Terrestres. *RNTRC. Guia do transportador, versão 2.6*. Disponível em <http://www.antt.gov.br/cargas/arquivos_old/RNTRC.html> Acesso em 12 de março de 2020.
- ANTT (2020c). Agência Nacional de Transportes Terrestres. RNTRC. Estrutura da Sufis. Disponível em <http://www.antt.gov.br/fiscalizacao/arquivos/Estrutura_da_SUFIS.html> Acesso em 03 de abril de 2020.
- ARAÚJO, M. P. S.; ALBERGARIA, R. M. B.; CAMPOS, V. B. G. (2014). Custos e fretes praticados no transporte rodoviário de cargas: uma análise comparativa entre autônomos e empresas. *Journal of Transport Literature. JTL/RELIT*, v. 8, n. 4, p. 187-226. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2238-10312014000400009&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em 13 de março de 2020.
- ASTM (2009). American Society for Testing and Materials. *ASTM E1318-09 - Standard specification for highway weigh-in-motion (WIM) systems with user requirements and test methods.*

- BALBO, J. T.; (2007). Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. Editora Oficinas e Textos. São Paulo, SP. 558 p.
- BEXTRA SISTEMAS DE PESAGEM (2020). Disponível em <<http://bextra.com.br/produto/pesagem-por-eixo-de-veiculos-rodoviaros/>>. Acesso em 22 de janeiro de 2020.
- BLAIR, R. C. & HIGGINS J. J. (1985) Comparison of the power of the paired samples t test to that of Wilcoxon's signed-ranks test under various population shapes. *Psycho. Bull.* 97: 119-128.
- BRASIL (1958). Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. *Programa de Metas 1956 – 1960*. Conselho de Desenvolvimento. Rio de Janeiro.
- BRASIL (1965). Lei nº 4.729, de 14 de julho de 1965. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/1950-1969/L4729.htm>. Acesso em 15 de março de 2020.
- BRASIL (1973). Lei nº 5.966, de 11 de dezembro de 1973. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L5966.htm>. Acesso em 03 de abril de 2020.
- BRASIL (1985). Lei nº 7.408, de 25 de novembro de 1985. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7408.htm>. Acesso em 02 de abril de 2020.
- BRASIL (1999). Lei nº 9.933, de 20 de dezembro de 1999. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9933.htm>. Acesso em 03 de abril de 2020.
- BRASIL (2011). Lei nº 12.545, de 14 de dezembro de 2011. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2011/Lei/L12545.htm>. Acesso em 03 de abril de 2020.
- BRASIL (2013). *Pesagem em movimento e análise do pavimento*. Relatório parcial IR04. Termo de Execução Descentralizada – TED – 497/212. DNIT, UFSC e LabTrans. Florianópolis, Santa Catarina.
- BRASIL (2014). *Pesagem em movimento e análise do pavimento*. Relatório parcial IR05. Termo de Execução Descentralizada – TED – 497/212. DNIT, UFSC e LabTrans. Florianópolis, Santa Catarina.
- BRASIL (2015). Lei nº 13.103, de 02 de março de 2015. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/113103.htm>. Acesso em 02 de abril de 2020.
- BRASIL (2015a). Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Laboratório de Transportes e Logística. *Objeto 1: pesagem em movimento e análise do pavimento – Metodologia para projeto*,

construção e implementação da Estação Integrada. Novembro de 2015. Termo de Cooperação – TC nº 497/2012.

- BRASIL (2018). Ministério da Infraestrutura e Empresa de Planejamento e Logística S.A.. *Anuário estatístico de transportes 2010-2018*. Brasília. Disponível em: < <https://www.ontl.epl.gov.br/anoario-estatistico> >. Acesso em 17 ago. 2019.
- BRASIL (2018a). Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Laboratório de Transportes e Logística. *Pesagem em movimento e análise do pavimento – Documentos técnicos: projetos e avaliações da reestruturação da Pista Experimental para sistema de fiscalização direta WIM. Fevereiro de 2018 – TC nº 497/2012.*
- BRASIL (2020). Decreto nº 10.229, de 05 de fevereiro de 2020. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10229.htm >. Acesso em 02 de abril de 2020.
- BURNOS, P.; GAJDA, J.; SROKA, R. (2016). Application of vehicle's Weigh-in-Motion systems to enforcement. *IEEE ICALT'S 2016: 2016 5th IEEE International Conference on Advanced Logistics & Transport*, Krakow, p. 61-66. Disponível em < https://www.researchgate.net/profile/Piotr_Burnos/publication/320831459_Application_of_vehicle's_Weigh-in-motion_systems_to_enforcement/links/59fc60b9aca272347a2105ae/Application-of-vehicles-Weigh-in-Motion-systems-to-enforcement.pdf >. Acesso em 22 de janeiro de 2020.
- BURNOS, P. & RYS, D. (2017). The effect of flexible pavement mechanics on the accuracy of axle load sensors in vehicle weigh-in-motion systems. *Sensors*. Disponível em < <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/9/2053/htm> >. Acesso em 8 de abril de 2020.
- BURNOS, P.; GAJDA, J.; SROKA, R. (2018). Accuracy criteria for evaluation of weigh-in-motion systems. *Metrology and Measurements Systems*. n. 4, v. 25, p. 743-754. Disponível em < https://www.researchgate.net/publication/330082613_Accuracy_criteria_for_evaluation_of_weigh-in-motion_systems >. Acesso em 06 de maio de 2020.
- CAIXETA FILHO, J. V. & MARTINS, R. S. (2001). *Gestão logística do transporte de cargas*. São Paulo: Atlas, 296 p.
- CHAHAD, J. P. Z. & CACCIAMALI, M. C. (2005). As transformações estruturais no setor de transporte rodoviário e a reorganização no mercado de trabalho do motorista de caminhão no Brasil. *Revista da ABET*, v. V, nº 2, jul./dezembro 2005. Disponível em < <https://periodicos.ufpb.br/index.php/abet/article/view/15660/8939> >. Acesso em 13 de março de 2020.
- CONMETRO (1988). Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Resolução nº 11, de 12 de outubro de 1988. Disponível em < <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/> > Acesso em 03 de abril de 2020.

- CONTÁBILARABESCOS (2019). Quais impostos incidem sobre o transporte de passageiros. Disponível em < <https://contabilarabescos.com.br/quais-impostos-incidem-sobre-o-transporte-de-passageiros>>. Acesso em 15 de março de 2020.
- CONTRAN (1998a). Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 12, de 06 de fevereiro de 1998. Disponível em <<https://www.infraestrutura.gov.br/resolucoes-contran.html>>. Acesso em 13 de janeiro de 2020.
- CONTRAN (1998b). Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 68, de 23 de setembro de 1998. Disponível em <<https://www.infraestrutura.gov.br/resolucoes-contran.html>>. Acesso em 13 de janeiro de 2020.
- CONTRAN (1999). Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 102, de 20 de setembro de 1999. Disponível em <<https://www.infraestrutura.gov.br/resolucoes-contran.html>>. Acesso em 02 de abril 2020.
- CONTRAN (2006a). Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 210, de 13 de novembro de 2006. Disponível em < <https://www.infraestrutura.gov.br/resolucoes-contran.html>>. Acesso em 13 de janeiro de 2020.
- CONTRAN (2006b). Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 211, de 13 de novembro de 2006. Disponível em <<https://www.infraestrutura.gov.br/resolucoes-contran.html>>. Acesso em 13 de janeiro de 2020.
- CONTRAN (2007). Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 258, de 30 de novembro de 2007. Disponível em <<https://www.infraestrutura.gov.br/resolucoes-contran.html>>. Acesso em 02 de abril de 2020.
- CONTRAN (2013). Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 459, de 02 de novembro de 2013. Disponível em <<https://www.infraestrutura.gov.br/resolucoes-contran.html>>. Acesso em 02 de abril de 2020.
- CONTRAN (2015a). Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 526, de 29 de abril de 2015. Disponível em <<https://www.infraestrutura.gov.br/resolucoes-contran.html>>. Acesso em 02 de abril de 2020.
- CONTRAN (2015b). Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 547, de 21 de agosto 2015. Disponível em <<https://www.infraestrutura.gov.br/resolucoes-contran.html>>. Acesso em 02 de abril de 2020.
- CONTRAN (2020). Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 803, de 22 de outubro de 2020. Disponível em <<https://www.infraestrutura.gov.br/resolucoes-contran.html>>. Acesso em 31 de out. de 2020.
- CNT (2017). Confederação Nacional do Transporte. *Transporte Rodoviário: Desempenho do setor, infraestrutura e investimento*. Brasília. Disponível em: < http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Estudos%20CNT/estudo_transporte_rodoviario_infraestrutura.pdf>. Acesso em 17 de agosto de 2019.

- CNT (2018). Confederação Nacional do Transporte. Pesquisa CNT de Rodovias 2018. *Relatório gerencial – CNT: SEST SENAT*. Brasília. Disponível em: <https://cms_pesquisarodovias.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20de%20Rodovias%202018%20-%20web%20-%20alta.pdf>. Acesso em 17 de agosto de 2019.
- CNT (2019a). Confederação Nacional do Transporte. *Boletim Estatístico CNT – fevereiro de 2019*. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/boletins>>. Acesso em 20 de setembro de 2019.
- CNT (2019b). Confederação Nacional do Transporte. *Acidentes rodoviários – Estatísticas envolvendo caminhões*. Disponível em <<https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/34e78e55-5b3e-4355-9ebc-acf1b8e7b4a4.pdf>>. Acesso em 06 de março de 2020.
- CORTÉ, J.F & BENEDETTO, H. Matériaux routiers bitumineux 2: Constitution et propriétés thermomécanique des mélanges. Hermes Science. Paris, 2005, 118 p.
- CSIR (1997). Council for Scientific and Industrial Research. *The damaging effects of overloaded heavy vehicles on roads*. Pretoria, África do Sul. v. 27, p.1-20.
- CTB (1997). Código de Trânsito Brasileiro. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503.htm>. Acesso em 08 de janeiro de 2020.
- DAVEY, D. J.& FREEMAN, E. J. (2011). Improving Road Safety Through Deterrence-Based Initiatives. *A Review of Research. Journal List. Sultan Qaboos University Medical Journal*. v. 11 (1). p. 29-37. Disponível em <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3074684/>>. Acesso em 30 de janeiro de 2020.
- DENATRAN (2009). Departamento Nacional de Trânsito. Portaria nº 63, de 31 de março de 2009. <<https://infraestrutura.gov.br/portarias-denatran.html>>. Acesso em 13 de janeiro de 2020.
- DENATRAN (2018). Departamento Nacional de Trânsito. *Frota de Veículos – 2018*. Brasília. Disponível em <<https://infraestrutura.gov.br/component/content/article/115-portal-denatran/8558-frota-de-veiculos-2018.html>>. Acesso em 17 de agosto 2019.
- DESSOUKY, S. H.; AL-QADI, I. L.; YOO, P. J. (2007). Full-depth flexible pavement response to different truck tire loadings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. TRB 2007 Annual Meeting*. Washington D. C.
- DNER (2000). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *O sistema gerencial de pavimentos do DNER*. Disponível em <www.ipr.dnit.gov.br>. Acesso em 13 de fevereiro de 2020.
- DNIT (2006). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. 2ª Edição. Rio de Janeiro. Disponível em <www.ipr.dnit.gov.br>. Acesso em 13 de fevereiro de 2020.

- DNIT (2012). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. *Quadro de fabricantes de veículos*. Brasília. Disponível em < www.dnit.gov.br>. Acesso em 13 de fevereiro de 2020.
- DNIT (2017). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Editais nº 237/2017*. Disponível em < <http://www1.dnit.gov.br/editais/consulta/resumo.asp?NUMIDEdital=6540> > Acesso em 02 de abril de 2020.
- DNIT (2019). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNI fiscaliza peso de veículos de carga na BR-316/PI. Disponível em < <http://www.dnit.gov.br/noticias/dnit-fiscaliza-peso-de-veiculos-de-carga-na-br-316-pi>> Acesso em 02 de abril de 2020.
- DOLCEMASCOLO, V.; FERNANDEZ, J.; JACOB, B.; KLEIN, E. (2016). French policy to prevent overloading. *7th International Conference on Weigh-in-Motion: ICWIM7*, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. Disponível em < http://www.iswim.org/conf_pap.php?lg=en&conf=7&n_sess=6>. Acesso em 13 de junho de 2017.
- DOUPAL, E.; CORNU, D; KRIZ, I. (2011). Base for enforcement WIM systems. *1º Seminário Internacional de Pesagem em Movimento*. Florianópolis, Santa Catarina. Disponível em < <http://www.is-wim.org> >. Acesso em 15 de abril de 2020.
- DOUPAL, E.; KRIZ, I.; STAMBERG, R.; CORNU, D. (2012). One year “WIM Direct Enforcement” experiences in Czech Republic. *6th International Conference on Weigh-in-Motion: ICWIM6*. Dallas, Estados Unidos. Disponível em <<http://www.is-wim.org/lib6/paper42.pdf>>. Acesso em 02 de abril de 2020.
- DOUPAL, E.; ADAMEOVA, Z.; KRIZ, I. (2016). Start of direct enforcement in the Czech Republic. *7th International Conference on Weigh-in-Motion: ICWIM 7*. Foz do Iguaçu. Paraná. Disponível em < <http://www.is-wim.org/lib7/paper6.pdf> >. Acesso em 02 de abril de 2020.
- DOUPAL, E. & FUCIK, O. (2016). WIM Enforcement Systems – Five Year’s in the Field Experience. *7th International Conference on Weigh-in-Motion: ICWIM 7*. Foz do Iguaçu. Paraná. Disponível em < <http://www.is-wim.org> >. Acesso em 15 de abril de 2020.
- EQUILÍBRIO BALANÇAS E SERVIÇOS (2020). Disponível em < <http://www.equilibriobalancas.com.br/>>. Acesso em 22 de janeiro de 2020.
- FERNANDES JÚNIOR, J. L. (1994). *Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos*. Tese de doutorado. Pós-graduação em Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 293 p.
- FERNANDES JUNIOR, J. L.; FABBRI, G. T. P.; PARREIRA, A. B.; SÓRIA, M. H. A. S.; GIGANTE, A. C. (2002). Efeito dos pneus trelleborg sobre pavimentos asfálticos. *Revista Minerva: Pesquisa e Tecnologia*. São Carlos. n. 2. v. 2. p. 13-24

- FERNANDES JUNIOR, J. L.; PAES, J. C.; PEREIRA, P. A.A. (2006). Effets of traffic loading on portuguese and brazilian pavements performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. TRB 2006 Annual Meeting*. Washington D. C.
- FERNANDES JUNIOR, J. L.; PAES, J. C.; PEREIRA, P. A. A. (2007) Avaliação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos flexíveis portugueses e brasileiros. *Revista Pavimentação*. Associação Brasileira de Pavimentação. Rio de Janeiro. Ano II, n. 5, p. 28-38.
- FEKPE, E. S. K.; CLAYTON, A. M.; HAAS, R. C. G. (1995). Evaluating pavement impacts of truck limits and enforcement levels. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Washington D. C. n. 1508, p. 39-44.
- FERRAZ, A. C. P.; JUNIOR, A. A. R.; BEZERRA, B. S.; BASTOS, J. T.; SILVA, K. C. R. (2012). Segurança Viária. Suprema Gráfica e Editora. São Carlos. ISBN 978-85-98156-69-9. 325 p.
- FONTENELE, H.B. (2011) *Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho dos pavimentos*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 287 p.
- FONTENELE, H.B; ZANUNCIO, C. E. M.; SILVA JUNIOR, C. A. P. (2011). O excesso de peso nos veículos rodoviários de carga e seu efeito. *Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n 18, p. 95-103. Brasil. Disponível em < http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art9_N18.pdf >. Acesso em 05 de janeiro de 2017.
- GILLESPIE, T.D.; KARAMIHAS, S.M.; CEBON, D.; SAYERS, M.W.; NASIM, M.A.; HANSEN, W. e EHSAN, N. (1993). *Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance*. NCHRP Report 353 – National Cooperative Highway Research Program – Transportation Research Board (TRB) – National Research Council, Whashington D.C.
- HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. (1994). *Modern Pavement Management*. Krieger Publishing Company. Malabar, Flórida. 583 p.
- HAIDER, S. W. & HARICHANDRAN, R. S. (2007). Characterizing axle load spectra by using gross vehicle weights and truck traffic volumes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. TRB 2007 Annual Meeting*. Washington, D. C.
- HAN, D. L.; KO, S-S.; GU, Z.; JEONG, K.M. (2012). Adaptive weigh-in-motion algorithms for truck weight enforcement. *Journal of International Association of Traffic and Safety Sciences. Transportation Research – Part C, Elsevier*, v. 24, p. 256-269. Artigo. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X12000125?via%3Dihub> >. Acesso em 05 de janeiro de 2017.

- HIJJAR, M. F. (2008). Preços de frete rodoviário no Brasil. *Artigo publicado na ILOS - Especialistas em logística e supply chain*. Disponível em <<https://www.ilos.com.br/web/artigos-precos-de-frete-rodoviario-no-brasil/>>. Acesso em 13 de março de 2020.
- HORTA, G. T. L. & GIAMBIAGI, F. (2018). Perspectivas DPEC 2018: o crescimento da economia brasileira 2018-2023. Banco Nacional do Desenvolvimento. Rio de Janeiro, RJ, 60 p.. Disponível em <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/14760>>. Acesso em 21 de março de 2020.
- IBPT (2018). Instituto Brasileiro de Planejamento e Tributação. *Sonegação fiscal das empresas brasileiras*. Disponível em <<https://ibpt.com.br/noticia/2697/SONEGACAO-FISCAL-DA-EMPRESAS-BRASILEIRAS>>. Acesso em 15 de março de 2020.
- INMET (2020). Instituto Nacional de Meteorologia. *Estações automáticas – gráficos*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso em 29 de maio de 2020.
- INMETRO (1994). Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. *Portaria nº 236, de 22 de dezembro de 1994*. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/>> Acesso em 03 de abril de 2020.
- INMETRO (2013). Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. *Portaria nº 375, de 24 de julho de 2013*. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/>> Acesso em 03 de abril de 2020.
- INMETRO (2016). Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. *Portaria nº 47, 22 de janeiro de 2015*. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/>> Acesso em 03 de abril de 2020.
- INMETRO (2017). Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. *Norma n. NIT-SEMAS-002 – verificação de instrumentos automáticos de pesagem de veículos rodoviários*. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/metlegal/docDisponiveis.asp#normas>>. Acesso em 13 de maio de 2020.
- INTERCOMP (2020a). Weigh-in-Motion strip sensors – axle & gross weighing up to mainline speeds. Disponível em <<https://www.intercompcompany.com/documents/Literature/700722-Strip-Sensors-ITS.pdf>>. Acesso em 10 de abril de 2020.
- INTERCOMP (2020b). OIML certificate n R134/2006-B-GB1-19.02 – Revision 1 – OIML certificate issued under scheme B. Disponível em <<https://www.intercompcompany.com/documents/Certifications/Intercomp-Strip-Sensors-OIML-R134-2006-B-GB1-19-02.pdf>>. Acesso em 10 de abril de 2020.
- ISLAM, S. Md. & BUTTLAR, W. G. (2012). Effect of pavement roughness on user costs. *Transportation Research Board. TRB 2012 Annual Meeting*. Washington, D. C.

- JACOB, B. (2000). Assessment of the accuracy and classification of Weigh-in-Motion systems. Statistical Background. *International Journal of Vehicle Design – Heavy Vehicle Systems*. v. 7, n. 2/3, p. 136-152. Disponível em <http://www.is-wim.org/doc/ijhd_hvs_jacob.pdf>. Acesso em 15 de abril 2020.
- JACOB, B.; O'BRIEN, E.; JEHAES, S. (2002). *COST 323 – Weigh-in-Motion of road vehicles. Final Report (1993-1998)*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Transport Research Board. Paris. Disponível em <<https://trid.trb.org/view/723581>>. Acesso em 22 de janeiro 2020.
- JACOB, B. (2007). Overview of WIM technologies and sensors. Apresentação em *slides* para a equipe DNIT/UFSC. LCPC. França. Disponível em <<http://www.is-wim.org>>. Acesso em 17 de abril de 2017.
- JACOB, B. & BEAUMELLE, F., V. (2010). Improving Truck Safety: Potential of Weigh-In Motion Technology. *Journal of International Association of Traffic and Safety Sciences - IATSS Research*, Elsevier, v. 34, issue 1, p. 9 – 15
- JACOB, B. & LOO, H. (2011) Standardization of Weigh in Motion in Europe. *1º Seminário Internacional de Pesagem em Movimento*. Brasil. Disponível em: <http://www.labtrans.ufsc.br/media/42946/s2pt04_bernard_hans.pdf>. Acesso em 27 de abril de 2017.
- JACOB, B. & COTTINEAU. L-M. (2016). Weigh in Motion for direct enforcement of overloaded commercial vehicles. *Transportation Research Procedia - Science Direct*, Elsevier, v. 14, issue 1, p. 1413 – 1421. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516302162>>. Acesso em 17 de agosto de 2019.
- KARIM, R. M.; IBRAHIM, I. N.; SAIFIZUL, A. A.; YAMANAKA, H. (2014). Effectiveness of vehicle weight enforcement in a developing country using weigh-in-motion sorting system considering vehicle by-pass and enforcement capability. *IATSS Research – Science Direct*, Elsevier, v. 37, issue 2, p. 124-129. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0386111213000174>>. Acesso em 17 de Agosto de 2019.
- KISTLER (2020a). Weigh-in-Motion. Disponível em <<https://www.kistler.com/?type=669&fid=682&model=download&callee=frontend>>. Acesso em 09 de abril de 2020.
- KISTLER (2020b). Test & Measurement Pressure – Measurement equipment for demanding T&M applications. Disponível em <<https://www.kistler.com/?type=669&fid=541&model=download&callee=frontend>>. Acesso em 09 de abril de 2020.
- LEE, J. *Sistema de Administração de Multas de Trânsito – DSV*. Companhia de Engenharia de Tráfego – CET. Boletim Técnico nº 28. São Paulo, 1982. Disponível em: <www.cetsp.com.br>. Acesso em 30 de janeiro de 2020.

- LOO, H. & ZNIDARIC, A. (2019). *Guide for users of Weigh-in-Motion. An introduction to Weigh-in-Motion*. International Society for Weigh-in-Motion (ISWIM). Versão 1.1, 2ª Edição. Disponível em < http://www.iswim.org/doc/ISWIM_Guide%20for%20users_press.pdf>. Acesso em 15 abril 2020.
- MARTINS, R. & SERRA VALE, A. (2007). Gerenciamento do controle de pesagem dos veículos de carga nas rodovias estaduais do estado da Bahia: o futuro de nossas rodovias. *Anais da 38ª Reunião Anual de Pavimentação/ 12º Encontro Nacional de Conservação de Rodovias (ABPv)*. Manaus.
- MEDINA, J. & MOTTA G. L. M. (2015a). *Mecânica dos Pavimentos*. Editora Interciência. 3ª Edição. Rio de Janeiro. pp 5-15.
- MEDINA, J. & MOTTA G. L. M. (2015b). *Mecânica dos Pavimentos*. Editora Interciência. 3ª Edição. Rio de Janeiro. pp 288-325.
- MENDES, V. (2020). Pesagem de veículos de cargas na BR-163 é suspensa para facilitar abastecimento no país. Página de Internet – Olhar Agro e Negócios. Disponível em < <https://www.agroolhar.com.br/noticias/exibir.asp?id=27370¬icia=pesagem-de-veiculos-de-cargas-na-br-163-e-suspensa-para-facilitar-abastecimento-no-pais>> Acesso em 02 de abril de 2020.
- MOMM, L.; BARRA, B. S.; OTTO, G. G.; PÉREZ, Y. A. G. (2011). Pesagem em movimento e o pavimento em concreto asfáltico. *7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. Foz do Iguaçu. 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. São Paulo: ABCR Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias*. v. 1. p. 1-12
- NETO, C. A. S. C.; SOARES, R. P.; FERREIRA, I. M.; POMPERMAYER, F. M.; ROMMINGER, A. E. (2011). *Gargalos e Demandas da Infraestrutura Rodoviária e os Investimentos do PAC: Mapeamento IPEA de Obras Rodoviárias*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília. Disponível em < http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1637/1/TD_1592.pdf>. Acesso em 05 de janeiro de 2017.
- NCHRP (2004). National Cooperative Highway Research Program. *Guide for Mechanistic-Empirical design of new and rehabilitated pavement structures*. Final Report NCHRP 1-37 A. Champaign, Illinois.
- NMi (2019). NMi International WIM standard – specification and test procedures for weigh-in-motion systems. Disponível em < <https://nmi.nl/wp-content/uploads/2020/03/NMi-International-WIM-Standard-V1.1.pdf>>. Acesso em 14 de maio de 2020.
- NMi (2020). Progressive weighing in motion. Disponível em < <https://www.nmi.nl/markets/wim/>>. Acesso em 06 de maio de 2020.
- OICA (2020). Organisation Internationale des Constructeurs D'automobiles. Disponível em < <http://oica.net/wp-content/uploads/stats-definition1.pdf>>. Acesso em 8 de janeiro de 2020.

- OIML (2008). Organisation Internationale Métrologie Légale. International Recommendation OIML R134-1. Edição 2006 (E). Disponível em < https://www.oiml.org/en/publications/recommendations/publication_view?p_type=1&p_status=1>. Acesso em 03 de abril de 2020.
- OIML (2019). Organisation Internationale Métrologie Légale. Disponível em < https://www.oiml.org/en/tc-sc-pg/projectedit_view?idproject=448>. Acesso em 03 de abril de 2020.
- ONSV (2017). Observatório Nacional de Segurança Viária. 20 anos do CTB – Acidentes de trânsito custaram 36 bilhões por ano. Disponível em < https://www.onsv.org.br/20-anos-do-ctb-acidentes-de-transito-custaram-r-36-bilhoes-por-ano/#_ftn1>. Acesso em 06 de março de 2020.
- OPAS (2018). Organização Pan-Americana da Saúde. 10 principais causas de morte no mundo. Disponível em < https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=5638:10-principais-causas-de-morte-no-mundo&Itemid=0>. Acesso em 05 de março de 2020.
- OPAS (2019). Organização Pan-Americana da Saúde. Folha informativa – Acidentes de trânsito. Disponível em < https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=5147:acidentes-de-transito-folha-informativa&Itemid=779>. Acesso em 05 de março de 2020.
- OST & VIPAL (2020). Estrutura dos pneus. Disponível em < <http://www.ost.ind.br/portal/institucional/conheca-seu-pneu>>. Acesso em 13 de fevereiro de 2020.
- OTTO, G.G.; MOMM, L.; VALENTE, A.M. (2012) Pavement damage due to dynamic load – Brazilian road deterioration test with MS/WIM. *6th International Conference on Weigh-in-Motion*. Dallas.
- OTTO, G. G.; SIMONIN, J-M.; PIAU, J-M.; COTTINEAU, L-M.; CHUPIN, O.; MONN, L.; VALENTE, A. M. (2017). Weigh-in-motion (WIM) sensor response model using pavement stress and deflection. *Construction and Building Materials*. Elsevier. v. 156. p. 83-90.
- OTTO, G. G. (2018). *Estudo da relação sensor-pavimento para aumento da precisão de sistemas de pesagem em movimento*. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis. 321 p.
- OTTO, G. G. (2018b). Application and developments of WIM in Brazil. *South African Transportation Conference*. Apresentação. Pretoria. África do Sul.
- OTTO, G. G.; SHINOHARA, K. J.; ALMEIDA, A. J.; MOMM, L.; VALENTE, A. M. (2019). Pavement damage – Brazilian road deterioration test using WIM. *8th International*

Conference on Weigh-in-Motion. Praga. Disponível em < <http://www.is-wim.org/>>. Acesso em 15 de janeiro de 2020.

PELLIZZON, J. C. D. (2017). *Modelo conceitual de sistema de informação unificado de infrações de trânsito*. Dissertação de mestrado, Publicação T.DM – 001A/2017. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 185 p.

PEREIRA, G. L. A. & LESSA, N. S. (2011). O processo de planejamento e desenvolvimento do transporte rodoviário no Brasil. *Revista on-line: Caminhos de Geografia*, v. 12, n. 40, p. 26-46. Uberlândia. Disponível em < <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16414> >. Acesso em 13 de janeiro de 2020.

PETERLINI, P. S. (2006) *Cargas por eixo e fatores de veículos obtidos em rodovias federais concessionadas do Estado do Paraná*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis. 192 p.

ROOKE, A. (2006). *Project Remove*. Final Report. Disponível em < http://iswim.free.fr/doc/remove_final_report.pdf>. Acesso em 03 de abril de 2020.

ROZESTRATEN, R. J. A. (1988). *Psicologia do Trânsito: conceitos e processos básicos*. Editora da USP. São Paulo. 154 p.

SIMPLESCTE (2019). A tributação no transporte de cargas e como a elisão fiscal pode ajudar. Disponível em < <https://simplescte.com.br/blog/tributacao-no-transporte-de-cargas/>>. Acesso em 15 de março de 2020.

SOARES, M. G. & CAIXETA FILHO, J. V. (1997). Caracterização do mercado de fretes rodoviários para produtos agrícolas. *Gestão e Produção*, v. 4, n. 2, p. 186-204. Disponível em < <http://www.scielo.br/pdf/gp/v4n2/a07v4n2.pdf>>. Acesso em 13 de março de 2020.

SOUZA, B. C. & ROCHA; W. (2010). Modelo de análise de lucro na logística: conceitos importantes para as decisões. *Revista Mundo Logística*. Curitiba, n. 17, jul./ago. 2010, ISBN 1982-1832, p. 8-15.

SOUZA, T.P.; OTTO, G. G.; ALMEIDA, A. J.; SOUZA, R. A.; MORI, F. De; VALENTE, A. M. (2019). Efeito da condição climática na temperatura de pavimento de concreto asfáltico espesso. *33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*. Balneário, Santa Catarina. Disponível em: < <http://www.anpet.org.br>>. Acesso em 29 de maio de 2020.

SCHUETER, F. (1998). *Evaluation of factors affecting WIM system accuracy*. Disponível em <<https://pdfs.semanticscholar.org/31cb/0f75e04144c8c353a9f9576ada31d734c0f7.pdf>>. Acesso em 10 de abril de 2020.

- TE CONNECTIVITY (2020). Piezoelectric Traffic Sensor. Disponível em < <https://www.te.com/global-en/product-CAT-TRA0001.datasheet.pdf>> Acesso em 08 de abril de 2020.
- TRB (1990). Transportation Research Board. New trucks for greater productivity and less road wear: an evaluation of the turner proposal. *National Research Council. Special Report 227*. Washington D. C.
- VALENTE, A. M.; NOVAES, A. G.; PASSAGLIA, E.; VIEIRA, H. (2008). Gerenciamento de transporte e frotas. 2ª ed. Editora CENGAGE Learning. ISBN 978-85-221-0613-4. 339 p.
- WANG, M.C. & ANDERSON, R.P. (1981). Load equivalency factors of triaxle loading for flexible pavements. *Transportation Research Record 810*. Disponível em < <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1981/810/810-006.pdf> >. Acesso em 13 de fevereiro de 2020.
- WERMESKERKEN, B. (2005). Project Remove. *Work package 4 final report*. Disponível em < http://iswim.free.fr/doc/remove_final_report.pdf>. Acesso em 13 de fevereiro de 2020.
- WHO (2018). World Health Organization. *World Health Statistics 2018 – Monitoring Health for the SDGs (Sustainable Development Goals)*. Disponível em < https://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/2018/en/>. Acesso em 05 de março de 2020.
- XUE, W. & WEAVER, E. (2011). Pavement shear strain response to dual and wide-based tires. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. TRB 2011 Annual Meeting*. Washington D.C.
- ZHANG, Z.; HUANG, Y.; BRIDGELALL, R.; PALEK, L.; STROMMEN, R. (2015). Sampling optimization for high-speed weigh-in-motion measurements using in-pavement strain-based sensors. *Measurement Science and Technology*, v. 26, n. 6. Disponível em <<https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/6/065003>> Acesso em 22 de janeiro de 2020.

ANEXO I

A partir da seção 3.1.3, apresenta-se a seguir o Quadro I.1, extraído de Araújo *et al.* (2014). No referido Quadro constam apresentados, de forma sintética, os itens de custos considerados em diferentes metodologias para cálculo do frete rodoviário de carga, conforme análise realizada pelos autores.

Quadro I.1: Metodologias para o cálculo do frete rodoviário de carga

Itens de Custos Considerados	Coopead	Geipot	NTC	Cooperativa	Guia do Transportador
<i>1. Despesas Diretas</i>					
1.1 Custos Variáveis					
Peças, acessórios e material de manutenção	x	x	x		
Pedágios - Trecho			x		
Óleo diesel, de carter e de câmbio/diferencial	x	x	x	x	x
Pneumáticos (pneus)	x		x	x	x
Manutenção (reparos no veículo)	x	x	x	x	x
Lavagem e engraxamento			x	x	x
1.2 Custos Fixos					
Remuneração de Capital	x		x	x	x
Reposição do Veículo	x	x	x	x	x
Reposição do Equipamento		x	x		
Custo da Apólice	x	x	x	x	x
Seguro do veículo (Incêndio/colisão/roubo)		x		x	x
Responsabilidade Civil Facultativa - DM/DP	x	x	x	x	x
Seguro do equipamento			x		
IPVA/DPVAT	x	x	x	x	x
Licenciamento anual	x	x	x	x	x
Salários e encargos (motorista)	x	x	x	x	x
Salários e encargos (oficina)		x	x		
Padronização (pinturas, adesivos, logomarca)			x		
<i>2. Despesas Indiretas</i>					


Itens de Custos Considerados	Coopead	Geipot	NTC	Cooperativa	Guia do Transportador
2.1 Salários, Ordenados e honorários de diretoria		X	X		
2.2 Salários Profissionais de Escritório e oper. de CD					
2.3 Aluguéis			X		
2.4 Tarifas de Serviços Públicos					
Água			X		
Energia Elétrica			X		
Correios e Couriers			X		
Telefone (fixo, celular e rádios) e Internet			X		
Custos de Serviços Públicos			X		
2.5 Serviços Profissionais Terceirizados					
Serviço de manutenção, conservação e limpeza			X		
Serviços profissionais de terceiros			X		
Serviços de processamento de dados			X		
Serviços de atendimento ao cliente (SAC)			X		
Serviço de Rastreamento por satélite					
Serviço de Escolta Armada e Gerenciamento de Risco					
Serviço de Oficina Mecânica (mão de obra)					
Agenciador de frete					
2.6 Impostos e taxas					
PIS - Programa de Integração Social			X		
COFINS- Contribuição p/ financiamento e seguridade social			X		
CSLL - Contribuição Social sobre o lucro			X		
ICMS - Imp. s/ circul.de mercadorias e prestação de serviço			X		
IR - Imposto de renda			X		

Itens de Custos Considerados	Coopead	Geipot	NTC	Cooperativa	Guia do Transportador
IPTU - Imposto predial territorial urbano			x		
2.7 Depreciações					
Depreciação de máquinas e equipamentos			x		
Depreciação de móveis e utensílios			x		
2.8 Outros Custos					
Material de escritório e limpeza		x	x		
Viagens, estadia e condução			x		
Despesas legais e judiciais			x		
Contribuições e doações			x		
Uniformes			x		
Despesas com promoções, brindes e propaganda			x		
Despesas com conservação de bens e instalações			x		
Despesas diversas			x		
Refeições e lanches			x		
Cópias Xerox			x		
Paletização de cargas			x		

Fonte: Araújo *et al.* (2014)

ANEXO II

Tendo em vista a seção 6.2.2, apresenta-se a seguir o laudo emitido pelo INMETRO, em decorrência da verificação do instrumento de pesagem em baixa velocidade (*bending plate*) localizado no PPV 16.08. A verificação foi realizada, em 20 de dezembro de 2018, tendo sido o instrumento aprovado com validade de verificação de um ano, para classe de exatidão das medidas de PBT ($\pm 2,5\%$) e peso por eixo ($\pm 4,0\%$), com medições desenvolvidas em até 6 km/h.

LAUDO DE EXAME DE BALANÇA RODOVIÁRIA DE PESAGEM DINÂMICA		LAUDO Nº	81-0505476-2218-014
		PÁGINA	1 de 5
1- PROPRIETÁRIO			
RAZÃO SOCIAL	DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes Superintendência Regional no Estado de Santa Catarina		
CNPJ	04.892.707/0008-15		
ENDEREÇO			
LOGRADOURO:	Rua Álvaro Millen de Silveira, número 104		
COMPLEMENTO			
BAIRRO	Centro	MUNICÍPIO:	Florianópolis
		CEP	88020-150
		UF	SC
2 - LOCAL DE INSTALAÇÃO			
ENDEREÇO INSTALAÇÃO			
LOGRADOURO:	Rodovia BR 101, KM 418,5		Sentido: Norte/Sul
COMPLEMENTO	PPV Araranguá		CEP 88914000
BAIRRO	Pólice Rodoviária	MUNICÍPIO:	Araranguá
		UF	SC
3- CARACTERÍSTICAS DO INSTRUMENTO			
TIPO	Balança de Pesagem Dinâmica para Veículos Rodoviários		
MARCA	PAT	MODELO	DAV50PCALS
		NUMERO DE SÉRIE	DAV5BR1605
CARGA MÁXIMA	30000kg	PAM	167/2005
MENOR DIVISÃO DE LEITURA	10 kg	VELOCIDADE MÁXIMA DE OPERAÇÃO	6 km/h
4- CONTROLE METROLÓGICO			
NUMERO DO INMETRO	12466712		
MARCA DE VERIFICAÇÃO	01.070.059-6	MARCAS DE SELAGEM	G6378995-1 / G6378996-4
DATA DA VERIFICAÇÃO	20/12/2018	RESULTADO	APROVADO
PARÂMETROS	EM ANEXO ASSINADO PELO RESPONSÁVEL		
OBSERVAÇÕES	<ul style="list-style-type: none"> - A alteração dos valores dos parâmetros implicara numa comunicação imediata ao Inmetro. - Instrumento interdito para pesagem de carga líquida a granel. - Uso vedado para medições de massa em transações comerciais. 		
TÉCNICO EXECUTOR	 Danilo Melo Mendonça - Matr. 0585-046 INMETRO/SC - Diretoria Técnica Rua Do Iva, 1791 - Nossa Senhora do Rosário - São José/SC CEP: 88.110-400 Fone: 948 - 3361 5255 Fax: 048 - 3261 8228		



Serviço Público Federal
 MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS - MDIC
 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO

Verificação inicial, subsequente e inspeção em serviço de instrumento de pesagem automáticos para veículos rodoviários em movimento

Planilhas de ensaios - Dados e instruções

- Nota:
- 1 - Preencher os campos em cinza claro
 - 2 - As colunas eixos podem ser preenchidas por conjunto de eixos
 - 3 - Os erros percentuais aparecem na coluna ao lado de cada medida
 - 4 - Massa do veículo (MV)
 - 5 - Os parâmetros de ajuste podem estar em anexo

Instrumento de pesagem:	DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes		
Local de instalação:	PPV - Araranguá/SC		
Parâmetros de ajuste:	Documento Anexo ao Laudo		
Atividade do CML*:			
EMA (Massa do veículo):	2,5%		
EMA (Por eixo):	4%		
Técnico executor:	Danilo Melo Mendonça - Matrícula 656547-6		


Veículos utilizados	Massa do veículo de referência	Tipo de veículo	Placa do veículo
Truck	19.537 kg	3C	JKN2408
Carreta	34.113 kg	2S3	MAJ9449
Trucado	42.287 kg	3S3	MKH7667
Eixo espaçado	- kg	3i3	
Bitrem	- kg	3T4	

Para determinação da carga do veículo de referência:

Tipo de veículo	Faixa de carregamento (kg)
3C Truck	18.400 a 23.000
2S3 Carreta	32.800 a 41.000
3S3 Trucado	38.400 a 48.000
3i3 Vandejeia	42.400 a 53.000
3T4 Bitrem	45.800 a 57.000

*CML - Controle Metrológico Legal

Laudo nº:	01-6565476-2018-614	Página 2/5
-----------	---------------------	------------


Danilo Melo Mendonça
 Tec. em Atividades de Fiscalização
 Matr. 656547-6 - INMETRO/SC



Serviço Público Federal
 MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS - MDIC
 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO

Verificação inicial, subsequente e inspeção em serviço de instrumento de pesagem automáticos para veículos rodoviários em movimento

Planilha de ensaio - Truck

Página 3/5

Massa do veículo de referência 19537 kg	EMA (MV):	2,6%	Tipo de veículo:	3C
	EMA (por eixo):	4,0%	Placa do veículo:	JKN2408

Medição n°	Velocidade (km/h)	Eixo 1 (kg)	Erro Eixo 1	Conj. Eixos 2-3 (kg)	Erro Conj. Eixos 2-3	MV (kg)	Erro MV (%)	
1	1	2,4	4.490	-0,9%	14.530	-1,1%	19.320	-1,1%
	2	2,4	4.470	-1,4%	14.830	-1,1%	19.350	-1,2%
	3	2,3	4.460	-2,0%	14.820	-1,1%	19.250	-1,4%
	4	2,1	4.450	-1,8%	14.850	-0,9%	19.310	-1,2%
	5	2,4	4.520	-0,3%	14.790	-1,3%	19.310	-1,2%
2	1	4	4.530	0,0%	14.810	-1,2%	19.340	-1,0%
	2	4	4.480	-1,8%	14.830	-1,1%	19.290	-1,3%
	3	3,9	4.430	-2,2%	14.850	-0,9%	19.280	-1,3%
	4	3,9	4.510	-0,5%	14.880	-0,7%	19.390	-0,8%
	5	4,1	4.590	1,3%	14.890	-0,7%	19.470	-0,3%
3	1	5,6	4.500	-0,7%	14.820	-1,1%	19.510	-0,1%
	2	5,8	4.480	-1,1%	14.840	-1,0%	19.320	-1,1%
	3	5,7	4.820	1,9%	14.870	-0,9%	19.490	-0,2%
	4	5,7	4.440	-2,0%	14.930	-0,4%	19.370	-0,9%
	5	5,9	4.400	-2,8%	14.940	-0,3%	19.340	-1,0%
Médias:		4.489		14.851		19.353		
Médias corrigidas:		4.532		14.992	F. Correção:	1,095		

Valor superior:	1,9%	-0,3%	-0,1%
Valor inferior:	-2,9%	-1,3%	-1,4%
Resultados parciais:	APROVADO	APROVADO	APROVADO

RESULTADO FINAL:

APROVADO

Lauda n°:	01-8565476-2018-614
Instrumento de pesagem:	DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Local de instalação:	PPV - Araranguá/SC
Parâmetros de ajuste:	Documento Anexo ao Laudo
Técnico executor:	Danilo Melo Mendonça - Matrícula 656547-6
Data:	20/12/2018

Danilo Melo Mendonça
 Matrícula 656547-6
 Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO/SC

Observações:





Verificação inicial, subsequente e inspeção em serviço de instrumento de pesagem automática para veículos rodoviários em movimento

Planilha de ensaio - Carreta

Página 4/5

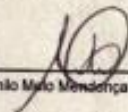
Massa do veículo de referência 34113 kg	EMA (MV): 2,5%	Tipo de veículo: 253 Placa do veículo: MAJ9449
	EMA (por eixo): 4,0%	

Medição n°	Velocidade (km/h)	Eixo 1 (kg)	Erro Eixo 1	Eixo 2 (kg)	Erro Eixo 2	Conj. Eixos 3-4-5 (kg)	Erro Conj. Eixos 3-4-5	MV (kg)	Erro MV (%)
1	1	4.310	0,3%	7.890	0,3%	21.350	0,1%	34.140	0,1%
	2	4.930	0,7%	7.890	0,1%	21.360	-0,5%	34.050	-0,2%
	3	4.890	-0,1%	7.870	0,2%	21.350	0,1%	34.110	0,0%
	4	4.920	0,5%	7.870	0,2%	21.340	-0,1%	34.130	0,0%
	5	4.900	0,7%	7.900	0,6%	21.390	0,1%	34.220	0,3%
2	1	4.890	-0,1%	7.880	0,3%	21.330	-0,2%	34.100	0,0%
	2	4.930	0,7%	7.850	-0,1%	21.490	0,6%	34.170	0,5%
	3	4.920	0,5%	7.870	-0,4%	21.430	0,3%	34.170	0,2%
	4	4.850	-0,7%	7.830	-0,3%	21.440	0,4%	34.190	0,0%
	5	4.850	-0,9%	7.840	-0,2%	21.290	-0,4%	33.970	-0,4%
3	1	4.920	0,5%	7.840	-0,2%	21.410	0,2%	34.170	0,2%
	2	4.880	-0,3%	7.850	-0,1%	21.320	-0,2%	34.050	-0,2%
	3	4.890	-0,1%	7.840	-0,2%	21.360	0,0%	34.080	-0,1%
	4	4.830	-1,3%	7.830	-0,3%	21.360	0,0%	34.020	-0,3%
	5	4.850	-0,7%	7.820	-0,4%	21.250	-0,5%	33.940	-0,5%
Médias		4.894		7.852		21.358		34.104	
Médias corrigidas		4.895		7.854		21.364	F. Correção:	1.0503	

Valor superior:	0,7%	0,6%	0,6%	0,6%
Valor inferior:	-1,3%	-0,4%	-0,5%	-0,5%
Resultados parciais:	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO

RESULTADO FINAL: APROVADO

Lauda n°:	01-6565476-2018-614
Instrumento de pesagem:	DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Local de instalação:	PPV - Araranguá/SC
Parâmetros de ajuste:	Documento Anexo ao Laudo
Técnico executor:	Daniilo Melo Mendonça - Matrícula 656547-6
Data:	20/12/2018


 Daniilo Melo Mendonça - Matrícula 656547-6
 Tec. em Ajudades de Fiscalização
 Matr. 656547-6 - INMETRO/SC

Observações:



Serviço Público Federal
 MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS - MDIC
 INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO

Verificação inicial, subsequente e inspeção em serviço de instrumento de pesagem automáticos para veículos rodoviários em movimento

Planilha de ensaio - Trucado

Página 5/8

Massa do veículo de referência
42287 kg

EMA (MV): 2,5%
EMA (por eixo): 4,8%

Tipo de veículo: 353
Placa do veículo: MKH7887

Medição n°	Velocidade (km/h)	Eixo 1 (kg)	Erro Eixo 1	Conj. Eixos 2-3 (kg)	Erro Conj. Eixos 2-3	Conj. Eixos 4-5-6 (kg)	Erro Conj. Eixos 4-5-6	MV (kg)	Erro MV (%)	
1	1	2,8	6.480	0,1%	15.310	0,1%	20.380	-0,7%	42.170	-0,3%
	2	2,7	6.460	-0,2%	15.230	-0,4%	20.400	-0,6%	42.090	-0,5%
	3	2,8	6.450	-0,4%	15.230	-0,4%	20.420	-0,5%	42.100	-0,4%
	4	2,7	6.440	-0,5%	15.170	-0,8%	20.400	-0,6%	42.010	-0,7%
	5	2,7	6.470	0,0%	15.170	-0,8%	20.440	-0,4%	42.080	-0,5%
2	1	3,6	6.480	-0,2%	15.220	-0,4%	20.490	-0,2%	42.170	-0,3%
	2	3,6	6.450	-0,4%	15.190	-0,6%	20.440	-0,4%	42.080	-0,5%
	3	3,8	6.480	0,1%	15.180	-0,7%	20.420	-0,5%	42.080	-0,5%
	4	3,8	6.490	0,2%	15.170	-0,8%	20.600	-0,1%	42.160	-0,3%
	5	3,8	6.480	0,1%	15.160	-0,8%	20.570	0,2%	42.210	-0,2%
3	1	5	6.410	-1,0%	15.270	-0,1%	20.440	-0,4%	42.120	-0,4%
	2	5,6	6.500	0,4%	15.370	0,5%	20.520	0,0%	42.380	0,2%
	3	5,6	6.410	-1,0%	15.360	0,5%	20.560	0,2%	42.330	0,1%
	4	5,8	6.410	-1,0%	15.410	0,8%	20.830	0,5%	42.450	0,4%
	5	5,8	6.490	0,3%	15.380	0,7%	20.610	0,4%	42.400	0,5%
Médias		6.459		15.255		20.481		42.185		
Médias corrigidas		6.473		15.288		20.528	F. Correção:	1,0222		

Valor superior:	0,4%	0,8%	0,5%	0,5%
Valor inferior:	-1,0%	-0,8%	-0,7%	-0,7%
Resultados parciais:	APROVADO	APROVADO	APROVADO	APROVADO

RESULTADO FINAL:

APROVADO

Laudo n°:	01-6565478-2018-614
Instrumento de pesagem:	DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Local de instalação:	PPV - Araranguá/SC
Parâmetros de ajuste:	Documento Anexo ao Laudo
Técnico executor:	Danilo Melo Mendonça - Matrícula 656547-6
Data:	20/12/2018

Danilo Melo Mendonça - Matrícula 656547-6
 Assessor de Fiscalização
 Matr. 656547-6 - INMETRO/SC

Observações:

[Redacted area for observations]



Relatório de Calibração de Posto de Pesagem

Equipamento - Posto DAWBR1906-ARARANGUA
 Técnico da PAT 00000000
 Número do INMETRO

Fatores gerais (todos os veículos)

Balança 9410
 Velocidade 8200
 Distância 10000
 Estática Esq 10000
 Estática Dir 10000

Fatores gerais para velocidades

02 km/h 10000
 04 km/h 10000
 06 km/h 10000
 08 km/h 10000
 10 km/h 10000
 12 km/h 10000

Fatores por grupos de eixos

Pesados

Leves

02 km/h 9900
 04 km/h 9900
 06 km/h 9900
 08 km/h 10050
 10 km/h 10000
 12 km/h 10000

Dirigional

02 Km/h 10000
 04 Km/h 9970
 06 Km/h 9980
 08 Km/h 10050
 10 Km/h 10000
 12 Km/h 10000

Dirigional

02 km/h 9840
 04 km/h 9840
 06 km/h 9850
 08 km/h 10000
 10 km/h 10000
 12 km/h 10000

Duplo

02 Km/h 10048
 04 Km/h 10000
 06 Km/h 10020
 08 Km/h 10000
 10 Km/h 10000
 12 Km/h 10000

Duplo

02 km/h 9970
 04 km/h 9990
 06 km/h 9980
 08 km/h 10000
 10 km/h 10000
 12 km/h 10000

Tripla

02 Km/h 10000
 04 Km/h 10000
 06 Km/h 10000
 08 Km/h 10000
 10 Km/h 10000
 12 Km/h 10000

Tripla

02 km/h 10119
 04 km/h 10090
 06 km/h 10100
 08 km/h 10000
 10 km/h 10000
 12 km/h 10000

Isolado

02 Km/h 10000
 04 Km/h 10000
 06 Km/h 10000
 08 Km/h 10000
 10 Km/h 10000
 12 Km/h 10000

Isolado


 Danilo Melo Mendonça
 Tec. em Automação de F. Aplicação
 Matr. 026547-6 - INMETRO/SC

Impressão em :
 quinta-feira, 20 de dezembro de 2018