MARIANA BOSSO

Uso da tecnologia *Weigh-in-Motion* para a caracterização do tráfego rodoviário e do excesso de carga em veículos comerciais

São Paulo
2018

MARIANA BOSSO

Uso da tecnologia *Weigh-in-Motion* para a caracterização do tráfego rodoviário e do excesso de carga em veículos comerciais

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

São Paulo
2018

MARIANA BOSSO

Uso da tecnologia *Weigh-in-Motion* para a caracterização do tráfego rodoviário e do excesso de carga em veículos comerciais

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia de Transportes

Orientador: Profa. Dra. Kamilla Vasconcelos

São Paulo
2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Bosso, Mariana

Uso da tecnologia Weigh-in-Motion para a caracterização do tráfego rodoviário e do excesso de carga em veículos comerciais / M. Bosso -- versão corr. -- São Paulo, 2018.

150 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Tráfego rodoviário 2.Pavimentação asfáltica 3.Pesagem veicular
4.Sobrecarga 5.WIM I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

*“Whether you think you can or think you
can’t, you’re right.”*

Henry Ford

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha orientadora, Professora Kamilla Vasconcelos, pela supervisão, apoio, incentivo e parceira durante o desenvolvimento dessa dissertação. O compartilhamento contínuo de conhecimento, a disponibilidade e a paciência foram essenciais para a conclusão desse trabalho. Também gostaria de agradecer às professoras Liedi Bernucci e Linda Lee Ho pelas contribuições de grande valia, assistência e incrível generosidade. Três mulheres incríveis que tanto me inspiram, meu muito obrigada.

Agradeço também aos parceiros do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Universidade de São Paulo. Apesar de não estarem no meu dia a dia, sempre me senti muito acolhida. Agradecimento especial à Diomária pela paciência com nós alunos e ao Iuri e Rafael, sempre muito prestativos e parceiros.

Ao Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais (LEM – USP) pelo suporte com o sistema WIM e no tratamento dos dados, em especial ao Professor Tulio Bittencourt e ao Enson Portela.

Ao Professor Carlos Suzuki pela motivação inicial para eu ingressar no mestrado e por todos os conhecimentos compartilhados durante a minha época de Planservi. Aos meus superiores da Ecorodovias que me permitiram ausentar da empresa quando necessário e que me incentivaram na conclusão desse trabalho.

Agradeço também a Arteris (Centro de Desenvolvimento Tecnológico e Autopista Fernão Dias) e à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) pelos incentivos à pesquisa por meio de Recursos de Desenvolvimento Tecnológico (RDT).

À minha família e amigos pelo constante suporte e estímulo que recebi, bem como pela compreensão por todos os momentos que precisei me ausentar, que não foram poucos.

Finalmente, minha eterna gratidão aos meus amados pais, Marco Bosso e Lia Casacio, e minha irmã Thaís Casacio, por me proverem de suporte e amor durante todos meus anos de estudos. Essa conquista não seria possível sem vocês.

RESUMO

A caracterização do tráfego rodoviário é de grande importância para o dimensionamento de pavimentos, bem como para a garantia de sua vida útil, sendo a carga aplicada pelo tráfego uma das maiores responsáveis pelos danos na estrutura. Com o objetivo de garantir a durabilidade dos pavimentos, sistemas *Weigh-in-Motion* (WIM) podem ser utilizados para coleta de informações sobre os veículos que trafegam em uma rodovia. Propôs-se neste estudo caracterizar o tráfego a partir da avaliação contínua das solicitações de carga na BR-381, sentido Sul, por meio da coleta de dados de Sistema WIM. A partir da análise dos dados coletados entre setembro de 2015 e fevereiro de 2017, observou-se que aproximadamente 85% dos veículos comerciais trafegam na faixa de rolamento mais solicitada (faixa 2). Com relação ao volume de veículos comerciais, pôde-se constatar a presença de uma maior quantidade de veículos durante os dias úteis quando comparados aos finais de semana. Além das variações com relação ao dia da semana, o volume de tráfego também apresenta particularidades com relação às distribuições horárias. Foram obtidas e analisadas as distribuições de carga para cada tipo de eixo das 15 categorias de veículos comerciais mais frequentes (representando 97,3% do tráfego comercial registrado). Com base na Legislação Brasileira vigente, quantificou-se o excesso de carga praticado na rodovia, onde foram identificados 23,7% dos veículos com excesso. Notou-se que a maioria dos excessos se encontram na faixa de até 10% dos respectivos limites legais, indicando que muitos transportadores carregam seus veículos considerando a tolerância como um ganho real de sobrecarga. Um método para identificação de padrões de viagem dos veículos com excesso foi proposto, que se baseia nas árvores de classificação e regressão (*Classification and Regression Tree Analysis – CART*), uma ferramenta analítica. Por fim, os dados de tráfego foram correlacionados com os defeitos observados no trecho experimental construído logo após o sistema WIM, onde se simulou a redução da vida útil de estruturas de pavimentos considerando diferentes cenários de carga, sendo eles: (i) tráfego real; (ii) tráfego na tolerância (considerando a tolerância de 10%); e (iii) tráfego legal, concluindo-se que a prática do excesso de carga nas rodovias penaliza o transporte rodoviário ao acelerar a degradação das rodovias.

Palavras-chave: Tráfego rodoviário, Pavimentação asfáltica, Pesagem veicular, Sobrecarga, WIM.

ABSTRACT

The traffic characterization is of great importance for pavement design, as well as for prediction of its remaining service life. In fact, traffic loading is one of the major contributors for the pavement deterioration. In order to ensure pavement durability, Weigh-in-Motion (WIM) systems can be used to collect traffic data. Therefore, this study was conducted to analyze the effect on the pavements of characterizing the traffic through a Weigh-in-Motion system installed between km 948 and 949 at the Brazilian Federal Highway BR-381. The analysis of the data collected from September 2015 to February 2017 shows that approximately 85% of commercial vehicles travel on the outside slow lane (lane 2). Regarding the volume of commercial vehicles, traffic volume was lower in weekends. In addition to the daily variations, traffic patterns also presented hourly variations. The axle load distributions were obtained and analyzed for the 15 more frequent commercial vehicle categories (representing 97.3% of all the commercial traffic registered). Based on the current Brazilian laws, the results from this study have indicated a significant percentage of violation involving overloaded heavy good vehicles in the highway (23.7%). In general, most axles exceed the legal limits up to 10%, indicating that many vehicles are loaded considering the tolerance as a real gain. A method to identify overloaded truck travel patterns and loading characteristics from available HS-WIM data was proposed. The method is based on Classification and Regression Tree Analysis (CART), an analytical tool. Finally, the traffic data were correlated with the distresses observed in the experimental section constructed closer to the WIM system, where it was simulated the reduction of the useful life of pavement structures considering different load scenarios: (i) real traffic; (ii) traffic in the tolerance (considering the tolerance of 10%); and (iii) legal traffic. It was concluded that the practice of overloading on highways penalizes road transport by accelerating road degradation.

Keywords: Road traffic, Asphalt Pavement, Commercial vehicles weighing; Overweight; WIM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Principais tipos de eixos rodoviários.....	20
Figura 2.2 – Pesagem com balança estática.....	26
Figura 2.3 – Pesagem estática com balança por eixo.....	27
Figura 2.4 – Desenho esquemático de um PPV.....	28
Figura 2.5 – Posto Integrado Automatizado de Fiscalização (PIAF).....	30
Figura 2.6 – Localização dos postos de pesagem: (a) PPVs e (b) PIAFs.....	31
Figura 2.7 – Número observado de veículos 3S2 com pelo menos 15% de excesso de carga... 32	
Figura 2.8 – Eixo padrão.....	36
Figura 2.9 – Sobrecarga por eixo x redução da vida útil.....	38
Figura 2.10 – Análise do dano em diferentes configurações de eixos com o aumento da carga. 39	
Figura 2.11 – Efeito da variação de carga para diferentes tipos de pneus.....	40
Figura 2.12 – Exemplo de sistema LS-WIM (França).....	43
Figura 2.13 – Exemplo de sistema HS-WIM (Brasil).....	43
Figura 2.14 – Tapete capacitivo conectado a equipamento de análise de dados.....	45
Figura 2.15 – Sensores piezelétricos.....	46
Figura 2.16 – Relação do erro relativo da pesagem e o número de sensores.....	48
Figura 2.17 – Distribuição por categoria de veículos em rodovias FC2 (rural arterial – não interestadual) do estado de Mississippi.....	53
Figura 2.18 – Distribuição por categoria de veículos para rodovias TTC 3 (caminhões com reboque único ou múltiplos reboques) para o estado de Mississippi.....	54
Figura 2.19 – Típico Sistema WIM usado em praças de pedágio na China.....	61
Figura 2.20 – Informações enviadas para a área de controle de pesagem (França).....	62
Figura 2.21 – Indicadores para representação de desempenho do HS-WIM.....	63
Figura 3.1 – Rodovia Fernão Dias.....	66
Figura 3.2 – Disposição do Sistema WIM.....	67
Figura 3.3 – Aquisição e processamento de dados.....	68
Figura 3.4: Calibrações: (a) erro PBT na faixa esquerda (17/02/17), (b) erro PBT na faixa direita (17/02/17), (c) erro PBT na faixa esquerda (16/05/17) e (d) erro PBT na faixa direita (16/05/17) 75	
Figura 3.5 – Categorias mais frequentes na BR-381.....	76
Figura 3.6 – Volume médio diário (VDM) na pista sul nos anos de 2014 a 2017.....	79
Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo.....	82
Figura 3.8 – Cargas máximas legais por tipo de eixo.....	97
Figura 3.9 – PBT/PBTC dos veículos analisados.....	98
Figura 3.10 – Porcentagem de veículos com excesso por categoria.....	98
Figura 3.11 – Excesso no(s) eixo(s) vs. Excesso no(s) eixo(s) e PBT.....	99

Figura 3.12 – Faixas de excesso de carga por categoria (ESRS)	102
Figura 3.13 – Faixas de excesso de carga por categoria (ESRD)	105
Figura 3.14 – Faixas de excesso de carga por categoria (ETD)	106
Figura 3.15 – Faixas de excesso de carga por categoria (ETD)	109
Figura 3.16 – Quantidade de veículos infratores e com excesso	111
Figura 3.17 – Veículos analisados e respectivos pesos brutos totais	113
Figura 3.18 – Representação esquemática de uma árvore de regressão	115
Figura 3.19 – Árvore de regressão – Veículos com excesso	117
Figura 3.20 – Árvore de regressão – Eixos simples de rodas simples (ESRS)	121
Figura 3.21 – Árvore de regressão – Eixos simples de rodas duplas (ESRD)	122
Figura 3.22 – Árvore de regressão – Eixo Tandem Duplo (ETD)	123
Figura 3.23 – Árvore de regressão – Eixo Tandem Triplo (ETT)	124
Figura 4.1 – Seção esquemática do trecho experimental – Segmento 1	127
Figura 4.2 – Número N de repetições de carga do eixo padrão acumulado (AASHTO)	129
Figura 4.3 – Número N de repetições de carga do eixo padrão acumulado (USACE)	129
Figura 4.4 – Número N de projeto (AASHTO)	130
Figura 4.5 – Número N de projeto (USACE)	131
Figura 4.6 – Aumento da deformação horizontal conforme carga aplicada	133
Figura 4.7 – Evolução da área trincada em função do número N (USACE)	134
Figura 4.8 – Evolução da área trincada em função do número N (AASHTO)	134
Figura 4.9 – Evolução da área trincada em função do tempo	135
Figura 4.10 – Vida útil estimada do Segmento 1 considerando diferentes cenários de carga (N AASHTO)	138
Figura 4.11 – Vida útil observada do Segmento 1 considerando diferentes cenários de carga (N AASHTO)	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Cargas máximas por eixo preconizadas pelo CONTRAN Resolução nº 210/06	22
Tabela 2.2 – Cargas máximas legais em alguns países europeus	25
Tabela 2.3 – Tipos de sistemas <i>Weigh-in-Motion</i>	42
Tabela 2.4 – Requisitos de desempenho de sistemas WIM	42
Tabela 2.5 – Típicos requisitos de tolerância do Sistema WIM na Europa	50
Tabela 3.1 – Número de veículos excluídos por filtro	70
Tabela 3.2 – Sistema de classificação de veículos	71
Tabela 3.3 – Exemplo de plano executado de calibração do sistema	73
Tabela 3.4 – Quantidade de veículos registrados por categoria x mês	77
Tabela 3.5 – Resumo dos dados analisados	80
Tabela 3.6 – Porcentagem de eixos com excesso	101
Tabela 3.7 – Quantidade de eixos com excesso	110
Tabela 3.8 – Descrição das variáveis	114
Tabela 3.9 – Características dos grupos de veículos com excesso	118
Tabela 4.1 – Cálculo do FEC segundo a AASHTO	127
Tabela 4.2 – Equações para cálculo do FEC segundo a USACE	128
Tabela 4.3 – Estrutura do pavimento adotado no trecho experimental	132
Tabela 4.4 – Coordenadas dos pontos de avaliação do ELSYM5	132
Tabela 4.5 – Deformação horizontal crítica para diferentes cenários de carga	133
Tabela 4.6 – Número N (AASHTO) em função de ϵ_t	137
Tabela 4.7 – Coeficientes de ajuste	137
Tabela 4.8 – Redução de vida útil dos pavimentos	139

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVO	16
1.2	ESTRUTURA DO TEXTO	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	INTRODUÇÃO.....	18
2.2	TRÁFEGO RODOVIÁRIO	19
2.2.1	Classificação da frota de veículos e eixos rodoviários	19
2.2.2	Sistemas de fiscalização e controle de cargas rodoviárias	20
2.2.3	Fiscalização de cargas rodoviárias no Brasil	28
2.2.4	Excesso de carga rodoviária.....	31
2.2.5	Impactos do excesso de carga na durabilidade dos pavimentos.....	36
2.3	SISTEMAS WEIGH-IN-MOTION.....	41
2.3.1	Principais tecnologias existentes	44
2.3.2	Instalação, calibração e precisão dos sistemas WIM	47
2.3.3	Controle de qualidade dos dados	50
2.3.4	Aplicações dos sistemas WIM	52
3	MONITORAMENTO DO TRÁFEGO NA RODOVIA FERNÃO DIAS	66
3.1	APRESENTAÇÃO DO SISTEMA WEIGH-IN-MOTION.....	66
3.2	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA WIM.....	72
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO MONITORADO	75
3.3.1	Identificação das categorias mais frequentes na rodovia	75
3.3.2	Porcentagem de veículos comerciais na rodovia e distribuição nas faixas 1 e 2.....	78
3.3.3	Distribuição do volume de tráfego na BR-381	78
3.4	DISTRIBUIÇÃO DE CARGA POR EIXO	79
3.5	ANÁLISE DO EXCESSO DE CARGA.....	96
3.5.1	Análise do excesso de carga com base na carga máxima legal	97

3.5.2 Análise de sensibilidade dos resultados de veículos infratores frente à variação de tolerância	110
3.5.3 Árvores de classificação e regressão para análise do excesso de carga a partir de dados do sistema WIM	111
4 A INFLUÊNCIA DA SOBRECARGA NAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO.....	126
4.1 ESTIMATIVA DO NÚMERO N A PARTIR DE DADOS DO SISTEMA WIM.....	127
4.2 TRECHO EXPERIMENTAL	131
4.3 SIMULAÇÃO DA REDUÇÃO DA VIDA ÚTIL DE PAVIMENTOS CONSIDERANDO DISTINTOS CENÁRIOS DE CARGA.....	136
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143

1 INTRODUÇÃO

A caracterização do tráfego é de grande importância para o dimensionamento de pavimentos, bem como para a previsão de seu comportamento ao longo do tempo em serviço. A análise dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho dessas estruturas, no entanto, é uma tarefa complexa em virtude principalmente da grande heterogeneidade de tipos de veículos que circulam na via e da ampla variação de cargas aplicadas. Atualmente, a determinação dos volumes de tráfego no Brasil para fins de projeto ainda se baseia em contagens volumétricas classificatórias que ocorrem em uma quantidade limitada de dias e por períodos curtos. Assim, os resultados obtidos usualmente não representam bem a média anual do trecho em análise. Ademais, a ausência ou inoperância de postos de pesagem veicular nos trechos dificulta a obtenção de dados sobre a real carga transportada pelos veículos. Como consequência, a capacidade de suporte da estrutura de pavimento dimensionada resultante pode ser superior ou inferior à necessária para o período de projeto adotado, sendo o sucesso do projeto muitas vezes atrelado à experiência do projetista.

O uso de sistemas *Weigh-in-Motion* (WIM) tem se mostrado uma opção bastante eficiente para a coleta de informações mais precisas sobre os veículos que trafegam em uma rodovia. No geral, com os dados resultantes do WIM, é possível identificar a porcentagem de veículos comerciais, observar a existência de sazonalidades na distribuição do tráfego, monitorar os Pesos Brutos Totais (PBT) e por eixo e identificar a distribuição por categoria de veículos no local. Ademais, com as informações de carga por eixo, é possível aferir a porcentagem de veículos que trafegam com pouca carga, com valores próximos às cargas máximas legais previstas por lei, ou com excesso de carga, além de identificar com quanto de excesso esses veículos circulam.

A partir do exposto acima, afirma-se que o uso da tecnologia *Weigh-in-Motion* para caracterização do tráfego rodoviário é uma alternativa interessante, tendo em vista a possibilidade de se adotar premissas de projeto cada vez mais próximas à realidade. Assim, propõe-se neste estudo analisar os efeitos do tráfego sobre os pavimentos ao caracterizá-lo a partir da avaliação contínua das solicitações de carga

na Rodovia Fernão Dias, sentido Sul, através da coleta de dados de Sistema WIM localizado entre os km 948 e 949.

1.1 OBJETIVO

Essa pesquisa tem por objetivo avaliar a redução da vida útil do pavimento asfáltico rodoviário frente ao tráfego real que o solicita, principalmente com relação a variação de cargas e circulação de veículos com excesso. Como objetivos específicos da presente dissertação têm-se ainda:

- Elaboração de uma rotina de monitoramento detalhada das cargas transportadas na BR-381, sentido Sul, com determinação das características volumétricas, classificatórias e do espectro de cargas circulantes na rodovia;
- Análise dos excessos de carga com base na legislação brasileira vigente, bem como variando-se os valores de tolerância para análise da sensibilidade dos resultados de veículos infratores frente a esse fator.
- Proposição de um método para identificação de padrões de viagem dos veículos com excesso com base nos dados registrados pelo sistema WIM, buscando uma ferramenta analítica que facilite a construção de modelos de previsão a partir de grandes conjuntos de dados.
- Por fim, correlação dos dados de tráfego com os defeitos observados no trecho experimental construído próximo ao local onde o sistema WIM foi instalado, simulando-se a redução da vida útil de estruturas de pavimentos para diferentes cenários de carga.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

Esta dissertação é composta por cinco capítulos e referências bibliográficas. No primeiro capítulo, INTRODUÇÃO, o tema a ser abordado na pesquisa em questão é apresentado, acompanhado pela definição dos principais objetivos a serem alcançados.

No segundo capítulo encontra-se a REVISÃO DE LITERATURA, onde são abordados os assuntos relevantes para o entendimento e desenvolvimento desta pesquisa, com considerações sobre a classificação dos veículos e eixos rodoviários brasileiros, sistemas de fiscalização de cargas e o excesso de carga e sua influência na degradação prematura dos pavimentos asfálticos. Além disso, são abordados

assuntos pertinentes aos sistemas *Weigh-in-Motion* (WIM), no âmbito nacional e internacional.

No terceiro capítulo, MONITORAMENTO DO TRÁFEGO NA RODOVIA FERNÃO DIAS, é apresentado com detalhes o monitoramento do tráfego da rodovia em questão através da análise dos dados registrados pelo equipamento de pesagem dinâmica de alta velocidade.

No quarto capítulo, intitulado A INFLUÊNCIA DA SOBRECARGA NAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO, a partir dos dados obtidos, três cenários distintos de espectro de cargas são identificados e então, a partir de modelos de vida de fadiga, verifica-se a influência do excesso de carga na redução da vida útil da estrutura analisada.

No quinto e último capítulo, CONSIDERAÇÕES FINAIS, são apresentadas as considerações mais relevantes observadas acerca do tema abordado levando em consideração todas as variáveis observadas.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográfica consultadas no desenvolvimento do trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO

Apesar de ser a nona maior economia mundial, o setor de infraestrutura brasileiro ainda enfrenta muitos desafios, sendo um dos principais relacionado ao forte desequilíbrio na sua matriz de transportes. Segundo dados da Confederação Nacional dos Transportes (CNT), mais de 60% do transporte de cargas é realizado por rodovias, seguido por ferrovias (20,7%) e hidrovias (13,6%). O transporte remanescente é realizado por dutos (4,2%) ou por meio aéreo (0,4%). A qualidade da malha rodoviária brasileira acaba sendo diretamente influenciada pelo desequilíbrio entre os modais. O sistema de transportes brasileiro destaca-se por sua extensa matriz rodoviária de 1.735.621 km, onde apenas 12,3% da extensão total é pavimentada e 61,8% apresentam estado de conservação regular, ruim ou péssimo (Pesquisa CNT, 2017).

Os resultados pouco satisfatórios das condições das rodovias são decorrentes principalmente da ausência de investimentos compatíveis com a real demanda de tráfego, visto que o crescente volume de veículos pesados não é acompanhado pelo crescimento em investimentos. Este cenário é agravado ainda pela presença de veículos com sobrecarga, responsáveis por uma redução significativa na vida útil dos pavimentos.

Reconhecendo a importância desse modo de transporte para a sociedade brasileira, é evidente a necessidade de monitoramentos contínuos das condições da infraestrutura existente para direcionamento dos investimentos, bem como do controle da sobrecarga dos veículos e acompanhamento do tráfego para dimensionamento de estruturas de pavimentos rodoviários compatíveis com a realidade.

Na revisão de literatura serão apresentados assuntos relevantes sobre o tráfego rodoviário (caracterização, classificação de veículos e eixos rodoviários) e principais sistemas de fiscalização e controle de cargas, relacionando-os à vida útil dos pavimentos rodoviários.

2.2 TRÁFEGO RODOVIÁRIO

O tráfego é um dos principais responsáveis pelos danos causados nos pavimentos rodoviários. A quantificação e caracterização dos veículos com diferentes configurações e magnitudes de cargas são etapas muito importantes para o estudo do comportamento dos pavimentos, podendo contribuir para a interpretação das causas da deterioração dos mesmos e para a previsão de tendências de propagação de defeitos como trincas e afundamentos em trilha de roda.

A correta avaliação da solicitação do tráfego envolve a definição de elementos que consideram o volume de veículos, a classificação da frota e as cargas por eixo com as quais os veículos solicitam a estrutura. Caso essas informações não sejam adequadamente estimadas, as previsões de solicitações futuras da estrutura do pavimento serão provavelmente imprecisas.

2.2.1 Classificação da frota de veículos e eixos rodoviários

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2005), o tráfego é composto pelas seguintes subclasses de veículos: (i) automóvel; (ii) ônibus; (iii) caminhão leve; (iv) caminhão médio; (v) caminhão pesado; e (vi) reboque/semirreboque.

O sistema de classificação da frota preconizado pelo DNIT (2012) categoriza os veículos de acordo com a distribuição de seus eixos, sendo o primeiro algarismo referente ao número de eixos do veículo simples ou unidade tratora e o segundo a quantidade de eixos do semirreboque. No total, são classificados 105 veículos que não necessitam de Autorização Especial de Trânsito (AET), 21 que necessitam de AET e 30 ônibus.

Os tipos de eixos rodoviários podem ser isolados (eixo simples) ou em conjunto (eixo em tandem), cada eixo podendo variar na quantidade de rodas. Na Figura 2.1 são apresentadas as representações esquemáticas dos principais tipos de eixos.

Figura 2.1 – Principais tipos de eixos rodoviários

Fonte: elaborada pela autora.

2.2.2 Sistemas de fiscalização e controle de cargas rodoviárias

A carga rodoviária pode ser expressa pelo Peso Bruto Total (PBT), valor constituído da soma da tara do veículo mais a lotação e/ou pelo Peso Bruto Total Combinado (PBTC), valor resultante da soma das cargas de um caminhão trator com seu semirreboque ou do caminhão mais o(s) seu(s) reboque(s) ou pela carga por eixo, sendo esses valores limitados segundo a legislação de cada país.

No Brasil, a atual legislação referente às cargas rodoviárias teve sua origem no Código de Trânsito Brasileiro (CTB), sendo esse o documento legal que define as atribuições das diversas autoridades e órgãos ligados ao trânsito, estabelecendo normas de conduta, infrações e penalidades para os diversos usuários. O Artigo 99 do CTB estabelece que “somente poderá transitar pelas vias terrestres os veículos cujo peso e dimensões atenderem aos limites estabelecidos pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN)”.

Considerando o Artigo 99 do CTB, o CONTRAN publicou as resoluções nº 12/98 e nº 68/98, estabelecendo os limites de pesos e dimensões para a circulação de veículos que trafegam em vias terrestres, bem como os requisitos de segurança necessários para a circulação de Combinações de Veículos de Carga (CVC), com permissão na época para transitar apenas com Autorização Especial de Trânsito (AET).

Em 10 de setembro de 2004, a partir da publicação da resolução nº 164/04, a circulação de CVC com Peso Bruto Total Combinado superior a 45 toneladas e limitadas até 57 toneladas foram dispensadas da AET, salvo o atendimento a requisitos específicos dispostos na própria resolução. É importante destacar que com a Autorização Especial de Trânsito, veículos podem conseguir permissão para trafegar em território brasileiro com PBTC de até 74 toneladas, atendendo ao limite de 30 metros de comprimento e respeitando os tipos de combinações previstos no Anexo I da Resolução nº 68/98.

Dois anos após a publicação da resolução nº 164/04, o CONTRAN revogou as resoluções nº 12/98 e nº 68/98 com a publicação das resoluções nº 210/06 e nº 211/06, respectivamente. A principal alteração introduzida pela resolução nº 210/06 foi referente aos limites de PBT e PBTC. Os valores dos limites por eixo ou grupo de eixo permaneceram inalterados. Já na resolução nº 211/06 foram estabelecidos os requisitos necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga (CVC) para o transporte de carga, especificando seus limites de dimensões e peso.

Considerando o disposto nas resoluções nº 210/06 e nº 211/06, o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) homologou a partir da publicação da Portaria nº 63/09 os veículos e as combinações de veículos de transporte de carga e de passageiros com seus respectivos limites de comprimento, PBT e PBTC. As cargas máximas legais por eixo preconizadas pelo CONTRAN, expostas na Resolução nº 210/06 e válidas atualmente são apresentadas na Tabela 2.1.

O limite de PBT/PBTC é obtido pela soma dos valores dos limites por eixo ou grupo de eixos. São considerados eixos em tandem dois ou mais eixos que constituam um conjunto integral de suspensão.

Tabela 2.1 – Cargas máximas por eixo preconizadas pelo CONTRAN
Resolução nº 210/06

Eixo ou conjunto de eixos	Rodagem	Suspensão	Distância (d) entre eixos (m)	Carga máxima (t)
Isolado	Simples	Direcional	-	6,0
Isolado	Dupla	-	-	10,0
Duplo	Simples	Direcional	-	12,0
Duplo	Dupla	Tandem	$1,20 < d \leq 2,40$	17,0
Duplo	Dupla	Não em tandem	$1,20 < d \leq 2,40$	15,0
Duplo	Simples + dupla	Especial	$d \leq 1,20$	9,0
Duplo	Simples + dupla	Especial	$1,20 < d \leq 2,40$	13,5
Triplo	Dupla	Tandem	$1,20 < d \leq 2,40$	25,5

Fonte: adaptado DNIT, 2012.

Sobre o limite de carga legal estabelecido nas resoluções do CONTRAN, vigorava a lei nº 7.408 de 1985, com permissão de tolerância máxima de 5% sobre os limites de PBT/PBTC e peso bruto por eixo. Esta tolerância foi mantida até a publicação da Resolução nº 102/99, onde se estabeleceu como nova tolerância máxima a porcentagem de 7,5% para as cargas por eixo. Porém, em 30 de novembro de 2007, por meio da publicação da Resolução nº 258/07, decidiu-se readotar como tolerância máxima 5% sobre as cargas por eixo, ficando a tolerância máxima de 7,5% permitida até 31 de dezembro de 2008.

A redução da tolerância de 7,5% para 5% no peso bruto por eixo foi adiada seis vezes (vide resoluções nº 301, nº 328, nº 337, nº 353, nº 365 e Deliberação nº 117), sendo o último adiamento feito a partir da Deliberação nº 117, de 19 de dezembro de 2011, onde ficou permitida a tolerância máxima de 7,5% até 31 de maio de 2012. Os adiamentos justificaram-se, segundo publicado na Resolução nº 365/10, pela necessidade de conclusão, pela Câmara Temática de Assuntos Veiculares, dos estudos relativos aos procedimentos para fiscalização de peso bruto transferido por eixo de veículos à superfície das vias públicas.

Em 05 de julho de 2014, a Resolução nº 489/14 foi apresentada, modificando mais uma vez as tolerâncias por eixo para efeito de fiscalização, onde se instituiu as seguintes tolerâncias:

- 5% sobre os limites de pesos regulamentares para o Peso Bruto Total (PBT), Peso Bruto Total Combinado (PBTC) e Capacidade Máxima de Tração (CMT);
- 7,5% sobre os limites regulamentares por eixo para aqueles veículos que excederam os limites estabelecidos acima;
- 10% sobre os limites regulamentares por eixo para aqueles veículos que não excederam os limites de PBT/ PBTC / CMT.

Em 02 de março de 2015, promulgou-se a Lei nº 13.103, onde ficou estabelecido que o Artigo 1º da Lei nº 7.408, de 1964, passaria a vigorar com redação onde se mantém a tolerância máxima de 5% sobre os limites de PBT, mas altera-se a tolerância dos limites de carga por eixo para 10%.

Assim, em acordo com a Lei nº 13.103, atualmente vigora como tolerância o apresentado na Resolução nº 526 de 29 de abril de 2015, sendo mantida a tolerância máxima de 5% sobre os limites de PBT e PBTC e alterada para 10% a tolerância máxima sobre os limites de peso por eixo de veículos, independentemente de o PBT ou PBTC excederem os limites estabelecidos ou não.

É importante destacar que, segundo Albano (2005), não se tem conhecimento de estudos técnicos que embasem as tolerâncias adotadas, sendo exposto apenas que as mesmas existem com o intuito de compensar incertezas de medição nos equipamentos de aferição de peso, conforme exposto nas próprias resoluções da CONTRAN (vide Decisão nº 6 do CONTRAN e Resolução nº 258/07).

A legislação vigente no Brasil não é válida para outros países. Isso é justificável, pois as legislações devem ser coerentes com a realidade da frota de veículos comerciais que circulam em cada país.

Nos Estados Unidos, as cargas máximas legais por eixo e os Pesos Brutos Totais dos respectivos veículos comerciais são determinados a partir da Lei 23 U.S.C. § 127 – *Vehicle Weight Limitations – Interstate System*. Tais limites são válidos nacionalmente e para os veículos que trafegam no Sistema Interestadual de Rodovias e nas rodovias classificadas como rotas primárias. As cargas máximas permitidas neste caso são: (i) 20.000 libras (9,1 toneladas) para eixos simples; (ii) 34.000 libras (15,4 toneladas) para eixos tandem, esses definidos como dois ou mais eixos consecutivos cuja distância entre eles seja de 1,02 m a 2,44 m; e (iii) 80.000

libras (36,3 toneladas) para o Peso Bruto Total, ou o máximo permitido segundo a Fórmula B (*Federal Bridge Formula*), que considera o limite de peso em função das tolerâncias admissíveis, da distância entre grupos de eixos consecutivos e do número de eixos, conforme apresentado na equação 2.1. Os estados podem estabelecer seus próprios limites legais de carga, mas apenas para as rodovias estaduais.

$$W = 500 * \left(\frac{L * N}{N - 1} + 12 * N + 36 \right) \quad (2.1)$$

Sendo:

W: peso total do grupo de dois ou mais eixos consecutivos em libras;

L: distância entre os eixos extremos do grupo de dois ou mais eixos consecutivos em pés;

N: número de eixos.

Para os veículos que trafegam pelo Canadá, segundo Seção 55 do *Roads Act* R.S.P.E.I. 1988, Capítulo R-15 – *Vehicles Weights and Dimensions Regulations*, são definidos os seguintes limites de carga por tipo de eixo: (i) eixo direcional simples com rodas simples: 5,5 toneladas; (ii) eixo direcional duplo com rodas simples: 16 toneladas; (iii) eixo tandem duplo: 18 toneladas; (iv) eixo tandem triplo: 21, 24 ou 26 toneladas, a depender da distância entre os eixos. Os valores admissíveis de PBT são fundamentados na categoria do veículo, classificados como categorias 1 a 9, e na quantidade de eixos. No geral, tem-se que a maior carga admissível é de 62,5 toneladas, sendo para veículos enquadrados na Categoria 3 e contendo oito ou nove eixos. Cabe ressaltar que os veículos comerciais da Categoria 3 podem apresentar comprimentos de até 27,5 m e, portanto, caso trafegassem no Brasil necessitariam obrigatoriamente de uma Autorização Especial de Trânsito (AET).

As cargas máximas legais dos países da Europa são apresentadas na Diretiva 96/53/EC. Um breve resumo sobre os limites em alguns países europeus é apresentado na Tabela 2.2. Os valores apresentados são os máximos observados, podendo haver ressalvas sobre sua validade, essas devendo ser consultadas com maiores detalhes na Diretiva 96/53/EC.

Tabela 2.2 – Cargas máximas legais em alguns países europeus

Países	Carga máxima		Carga máxima PBT/PBTC				
			Caminhão		Rodotrem	Articulado	
	Por eixo <i>truck</i>	Por eixo com tração	2 eixos	3 eixos	4 eixos	≥ 5 eixos	≥ 5 eixos
Alemanha	10,0	11,5	18,0	26,0	36,0	40,0	40,0
Bélgica	10,0	12,0	19,0	26,0	39,0	44,0	44,0
Espanha	10,0	11,5	18,0	26,0	36,0	40,0	44,0
França	13,0	13,0	19,0	26,0	38,0	44,0	44,0
Holanda	10,0	11,5	21,5	30,5	40,0	50,0	50,0
Irlanda	10,0	11,5	18,0	26,0	36,0	46,0	46,0
Itália	12,0	12,0	18,0	26,0	40,0	44,0	44,0
Portugal	12,0	12,0	19,0	26,0	37,0	60,0	44,0
Reino Unido	10,0	11,5	18,0	26,0	38,0	44,0	44,0
Suécia	10,0	11,5	18,0	26,0	36,0	64,0	64,0
Suíça	10,0	11,5	18,0	26,0	36,0	40,0	40,0

O controle de cargas transportadas é um conceito mundialmente relevante frente à quantidade de veículos que circulam ilegalmente nas rodovias. Perante esse fato, muitos países desenvolveram planos estratégicos para fiscalização dos pesos dos veículos comerciais.

A eficiência no controle da pesagem veicular envolve diversos fatores, entre eles: (i) leis de trânsito coerentes com a realidade da frota de veículos comerciais nacionais; (ii) quantidade de postos de pesagens adequada tendo em vista as características da malha rodoviária em questão; (iii) implantação dos postos em locais estratégicos, impedindo sempre que possível a utilização de rotas de fugas pelos transportadores; (iv) postos de pesagem dimensionados de forma compatível

ao volume de veículos comerciais que utilizam a rodovia; (v) rotinas bem definidas de fiscalização, com uso contínuo dos equipamentos de pesagem; e (vi) padronização dos procedimentos.

Para a aferição de peso de veículos podem ser utilizados instrumentos de pesagem estática e dinâmica, sendo o método mais preciso de pesagem de veículos a pesagem estática. Este é um método amplamente utilizado em postos de carga e descarga para conferência do peso antes de iniciar viagem. A pesagem estática de veículos, como o próprio nome sugere, é feita com o veículo posicionado estaticamente sobre a balança, onde é averiguado o respectivo Peso Bruto Total ou Peso Bruto Total Combinado, bem como a carga por eixo no caso de utilização de balança de pesagem estática por eixo.

Apesar dos erros apresentados pela pesagem estática serem inferiores quando comparados à pesagem dinâmica, em rodovias com alto volume de tráfego e com grande circulação de veículos pesados esse método apresenta limitações. Nesse procedimento, necessita-se de tempo considerável para cada pesagem, o que restringe consideravelmente a quantidade de veículos fiscalizados. Nas figuras 2.2 e 2.3 são apresentados exemplos de pesagem com balanças estáticas.

Figura 2.2 – Pesagem com balança estática

Fonte: Agência Nacional de Transportes Terrestres (2014).

Figura 2.3 – Pesagem estática com balança por eixo

Fonte: Jacob e Beaumelle (2010).

A pesagem dinâmica, diferente da pesagem estática, é realizada com o veículo em movimento. Este é um método que permite que a fiscalização seja feita com pouca intervenção ao tráfego da rodovia, visto que não é necessário que o veículo estacione para pesagem. Internacionalmente, os sistemas de pesagem em movimento são conhecidos como *Weigh-in-Motion* (WIM).

As balanças dinâmicas, equipamentos utilizados neste tipo de pesagem, geralmente são instaladas nos Postos de Pesagem Veicular (PPV) brasileiros. Quando em funcionamento, os veículos pesados são obrigados a adentrarem nas áreas destinadas à pesagem veicular, ficando liberados da pesagem apenas os veículos que por sua composição (largura ou altura), ofereçam riscos às instalações do PPV. Placas de sinalização devem estar dispostas de modo que possam alertar o transportador com a antecedência necessária sobre a existência de Posto de Pesagem Veicular na rodovia.

No geral, ao entrar na área de pesagem, o veículo será conduzido primeiramente à balança seletiva, sendo essa responsável pela seleção dos veículos. Nesta primeira etapa, a pesagem é realizada a uma velocidade de até 60 km/h. Segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (2014), essa balança não precisa ser aferida pelo INMETRO, pois este equipamento não pode ser

utilizado para penalização. A balança seletiva apenas indicará quais veículos serão fiscalizados e quais serão liberados, visto que a fiscalização de todos os veículos pesados não seria viável operacionalmente.

Os veículos que apresentem incerteza quanto à legalidade do PBT/PBTC e carga por eixo são direcionados para a balança de precisão, onde a pesagem ocorrerá a uma velocidade de até 10 km/h. O equipamento precisa ser aferido pelo INMETRO, comprovando sua competência de penalização. É exigida uma precisão de até 2,5% com a balança em teste e até 5,0% com a balança em operação. Caso seja verificada infração, o condutor será direcionado para o estacionamento, onde deverão ser tomadas as devidas providências (remanejamento ou transbordo). A Figura 2.4 apresenta um desenho esquemático de um Posto de Pesagem Veicular (PPV).

Figura 2.4 – Desenho esquemático de um PPV

Fonte: elaborada pela autora.

2.2.3 Fiscalização de cargas rodoviárias no Brasil

O setor rodoviário brasileiro, apesar de sua importância, vem sendo prejudicado pela falta de investimentos compatíveis com sua real demanda. Apenas 12,3% da extensão total rodoviária é pavimentada e 61,8% apresentam estado de conservação regular, ruim ou péssimo. Este cenário é agravado ainda pelo tráfego de veículos com sobrecarga, e pela falta de informação e conscientização por parte dos transportadores sobre seus deveres e eventuais prejuízos ocasionados por essa prática.

Segundo DNIT (2008), a legislação brasileira passou a prever o controle de pesagem de veículos apenas na década de 60. Até o ano de 1974, a fiscalização era realizada apenas com instrumentos de pesagem estática. Em 1975, o Departamento

Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) iniciou o desenvolvimento do Plano Diretor de Pesagem, com a introdução de equipamentos de pesagem dinâmica nos Postos de Pesagem de Veículos (PPV). Foi prevista no Plano Diretor de Pesagem a implantação de 132 postos, mas apenas 73 foram construídos. O primeiro PPV a funcionar com base nessa nova tecnologia localiza-se no Estado do Paraná, na BR-277, e iniciou suas atividades em outubro de 1979.

Com a construção dos 73 postos, o DNER ficou responsável pela fiscalização das rodovias federais sob sua administração até sua extinção, em 2001, transferindo essa responsabilidade para o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), para a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) nas rodovias federais por ela administradas e para a Polícia Rodoviária Federal (PRF), à título de apoio operacional ao DNIT.

Com o objetivo de suprir a crescente necessidade de ampliação e manutenção dos postos de pesagem, em 2006, o DNIT lançou juntamente ao Centro de Excelência em Engenharia de Transportes (CENTRAN) o Plano Nacional de Pesagem (PNP), com o escopo definido de 148 postos de pesagem com funcionamento por equipamentos fixos e 72 com pesagem por equipamentos móveis, totalizando 220 postos. Após alguns ajustes, o PNP foi dividido em duas etapas:

- Primeira etapa: operação de 78 postos de pesagem, sendo 45 fixos e 33 móveis;
- Segunda etapa: operação de 157 novos postos, sendo 97 fixos e 60 móveis.

A primeira etapa iniciou-se apenas em julho de 2008, devido à inúmeras dificuldades de ordem regulamentares com o Conselho Nacional de Trânsito (Contran), técnico-metroológica com o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), revisões no projeto básico, entre outras.

Em 2011, o DNIT lançou o edital prevendo a execução da segunda etapa. No entanto, a Controladoria Geral da União (CGU) e o Tribunal de Contas da União (TCU) apontaram diversos problemas no certame licitatório, o que resultou na revogação do edital.

Do total de 220 postos de pesagem inicialmente previstos, apenas 74 entraram em efetiva operação, visto que quatro postos da primeira fase não

iniciaram suas atividades por problemas metrológicos e de infraestrutura e a segunda fase sofreu várias alterações de cronograma e até hoje não foi concluída.

No entanto, apesar de não concluída, a segunda etapa não foi paralisada. O DNIT, em parceria com o Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), entendeu ser necessário substituir o modelo usual de pesagem e desenvolveu o modelo do Posto Integrado Automatizado de Fiscalização (PIAF), conforme apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Posto Integrado Automatizado de Fiscalização (PIAF)

Fonte: DNIT (2016).

Este novo modelo de pesagem difere em diversos aspectos do antigo modelo de PPV implantado pelo DNER, com alterações na geometria do posto e com o uso de novas tecnologias de pesagem e pavimentação, com destaque para o uso de sistema de pesagem em movimento, Weigh-in-Motion (WIM), capaz de registrar pesos por eixos e pesos brutos do veículo de carga à medida que os mesmos trafegam pela própria rodovia, sendo pesados na velocidade que estiverem transitando, tornando o processo de pesagem mais eficiente. Esse sistema será detalhado na Seção 2.3 – Sistemas Weigh-in-Motion.

Segundo informações obtidas em apresentação realizada pelo DNIT na audiência pública realizada no dia 23 de novembro de 2017 e intitulada “Fiscalização de transporte de cargas minerais, agrícolas e perigosas nas rodovias brasileiras”, em 2017 haviam 29 PPVs fixos, sendo 15 em operação e 14 em reativação, 26 PPVs móveis em operação e 35 PIAFs contratados, em fase de elaboração de projeto. Os postos de pesagem estão distribuídos conforme Figura 2.6. Atualmente, há apenas

um PIAF construído que operará inicialmente para fins de pesquisa, sendo esse localizado na BR-101 Sul, em Araranguá.

Em consulta ao site da ANTT, observou-se em mapa disponibilizado pela agência a ocorrência de um total de 21 postos de pesagem veicular. No entanto, não há informações sobre data de atualização das informações, bem como sobre se os mesmos estão ou não em operação.

Figura 2.6 – Localização dos postos de pesagem: (a) PPVs e (b) PIAFs

Fonte: DNIT (2017).

Em consulta ao site do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP), observou-se em listagem disponibilizada a existência de 53 postos de pesagem fixo e 177 postos de pesagem móveis. Novamente, não há informações sobre data de atualização das informações, bem como sobre funcionamento.

2.2.4 Excesso de carga rodoviária

Atualmente, os dados sobre o excesso de carga nas rodovias brasileiras são escassos, fato justificado não apenas pela limitada quantidade de postos de pesagem ativos, mas também pela inadequada localização dos postos já

implantados, possibilitando a utilização de rotas de fuga pelos transportadores, além de seus horários de funcionamento restritos e previsíveis, induzindo a passagem dos veículos com sobrecarga nos horários em que os postos de pesagem não estão funcionando.

A ocorrência de fuga de veículos possivelmente sobrecarregados dos postos de pesagem fixos foi comprovada por Cunagin, Mickler e Wright (1997) na Flórida, Estados Unidos. Neste estudo, dois postos de pesagem fixos e quatro possíveis rotas de fugas foram monitorados. Quatro diferentes cenários foram analisados: (i) Estratégia A: postos de pesagem abertos, sem emissão de multas, e sem fiscalização nas rotas de fuga; (ii) Estratégia B: postos de pesagem abertos, com autuação para os veículos infratores, e sem fiscalização nas rotas de fuga; (iii) Estratégia C: postos de pesagem abertos e fiscalização nas principais rotas de fuga, com autuação em ambas localidades; e (iv) Estratégia D: postos de pesagem abertos e intensa fiscalização nas rotas de fuga principais e secundárias, com autuação nas balanças fixas e móveis. Os resultados indicaram que o número de veículos com excesso de carga diminuiu consideravelmente com o aumento da fiscalização, conforme pode ser observado na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Número observado de veículos 3S2 com pelo menos 15% de excesso de carga

Fonte: Cunagin, Mickler e Wright (1997).

Sobre a questão do excesso de carga, segundo Fernandes Júnior (1994), na Pesquisa sobre o Inter-relacionamento dos Custos Rodoviários (PICR), desenvolvida entre 1976 e 1981, foram levantados um dos primeiros dados sobre excesso de carga no Brasil. De acordo com o autor, naquela época, o percentual de excesso observado em cada tipo de eixo foi: (i) eixos dianteiros: 3% dos eixos com sobrecarga na ordem de 5% acima do limite de 6 t; (ii) eixos simples com rodas duplas: 25% dos eixos com sobrecarga na ordem de 20% acima do limite de 10 t; (iii) tandem duplo: 15% dos eixos com sobrecarga na ordem de 50% acima do limite de 17 t; e (iv) tandem triplo: 30% dos eixos com sobrecarga na ordem de 45% acima do limite de 25,5 t.

Em um estudo realizado no estado do Paraná por Peterlini (2006), com base em dados de três Postos de Pesagem Veicular (PPV), constatou-se que os eixos direcionais dos caminhões das categorias 2S3, 3C, 3D4 e 3S3, essas de maior frequência, não apresentaram grandes excessos de carga, mesmo sem considerar a tolerância admitida na época do estudo de 7,5%. No entanto, os eixos de tração apresentaram valores de sobrecarga consideráveis, principalmente nos caminhões 2S3 e 3D4. Foi também observado que os transportadores carregavam seus veículos considerando a tolerância de 7,5% como ganho real de sobrecarga, e não como tolerância do próprio equipamento de medição.

Fontenele, Zanuncio e Silva Junior (2011) avaliaram o carregamento de veículos em dois postos de pesagem veicular também no estado do Paraná, durante o período de janeiro a dezembro de 2009. No posto de pesagem localizado na BR-153, observou-se uma média de excesso de carga no ano de 2009 de 0,9 t nos eixos simples e duplo, com valores médios mais acentuados de 1,5 t entre os meses de setembro e outubro do mesmo ano. Para os eixos triplos, no mês de setembro de 2009 foi observada a maior média de sobrecarga, com 2,6 t de peso excedente. Já na BR-369, um fato importante mostrou novamente a relação da presença de fiscalização e a quantidade de veículos com sobrecarga. Nos seis primeiros meses de 2009, os veículos com excesso de carga na rodovia foram autuados e os excessos médios de peso registrados foram inferiores a 30 kg. Em contrapartida, nos demais meses do ano onde as pesagens tiveram caráter apenas estatístico, os excessos médios chegaram a 1,1 t.

Brito *et al.* (2013), a partir da determinação do espectro de cargas comerciais rodantes na Rodovia BR-290/RS, definiram um panorama referente ao sobrepeso dos veículos comerciais monitorados. Durante o período de coleta de dados de cinco semanas (00h00 do dia 13/03/2013 até as 16h00 do dia 15/04/2013), 9,63% dos veículos apresentaram alguma sobrecarga em algum eixo, sendo o segundo eixo o mais sobrecarregado, com percentual médio de excesso de 14,71%. Continuando o monitoramento do tráfego na Rodovia BR-290/RS, em estudo mais recente, Bock (2016) verificou a partir da análise de dados registrados por sistema WIM durante todo o ano de 2014 que 13% do total de veículos analisados trafegavam acima dos limites legais permitidos.

A sobrecarga de veículos é um problema internacional, não se limitando apenas aos países em desenvolvimento. Segundo Jacob e Loo (2008), alguns países europeus relatam que aproximadamente 15% de seus veículos comerciais estão com sobrecarga. Resultados da análise de pesagens estáticas realizadas na França em 2002 indicaram que do total de 41.000 veículos fiscalizados, 36,1% estavam sobrecarregados e desses, 16,8% apresentaram um excesso de carga superior a 8% do permitido. Porém, um ponto importante levantado pelos pesquisadores é que o controle de carga em pesagens estáticas é usualmente realizado em veículos previamente julgados com excesso, e, portanto, a porcentagem de sobrecarga esperada para o tráfego total seria inferior aos valores encontrados.

Chan (2008) avaliou uma amostra de veículos comerciais na Província de Anhui, na China, para estimar a porcentagem de sobrecarga em países em desenvolvimento. A coleta de dados ocorreu em 2004 e foram avaliados veículos aleatórios a partir do uso de balança estática e sistemas de pesagem em movimento. Dados foram coletados durante cinco dias no total, sendo três dias úteis e o final de semana. O resultado das análises mostrou que 50% a 70% dos veículos pesados trafegavam sobrecarregados.

Karim *et al.* (2014) analisaram os dados de janeiro de 2010 provenientes de um sistema de pesagem em movimento instalado em uma rodovia rural (*Route Federal 54*) na Malásia. O volume de veículos comerciais na rodovia, na época, apresentou variações entre 900 e 1.100 veículos por dia, de segunda a sábado. Nos domingos, os valores reduziam para cerca de 300 veículos por dia. Do total de

veículos analisados, 21,5% estavam com o Peso Bruto Total acima do permitido. Foi observado também que a grande maioria dos infratores utilizava a rodovia durante o dia (93,8%).

Em estudo realizado por Ghosh *et al.* (2015), a partir de dados de 2011 originários de 21 estações de sistemas de pesagem em movimento instaladas no estado de Nova York, notou-se que a quantidade de veículos com sobrecarga variou dependendo da localidade e do tipo de veículo. No geral, a partir da análise dos dados foi possível estimar que 18% dos veículos trafegaram com excesso de carga. Uma análise mais detalhada por categorias, no entanto, mostrou que desse total 6% poderiam estar trafegando ilegalmente pelas rodovias nova iorquinas, enquanto 12% possivelmente possuíam permissão para trafegar com excesso e, portanto, não haveria uma infração. Essa permissão pode ser obtida para diferentes casos a partir do pagamento de uma taxa.

No mesmo ano, Nichols, Chou e Dayan (2015) analisaram dados de sistemas de pesagem em movimentos do estado de Virgínia Ocidental, também nos Estados Unidos. No total, foram analisados 848.925 dados de 109 sistemas de pesagem em movimento em 40 localidades diferentes. Considerando uma tolerância de 10%, as porcentagens de veículos que apresentaram excesso de carga variaram entre 2% até 46%, dependendo da localização. Nesta pesquisa, não foi possível identificar veículos que trafegavam ilegalmente, pois não foram associados, durante o período analisado, os dados com as respectivas permissões emitidas para trafegar com excesso.

Pillay e Bosman (2001) descrevem em seu estudo a situação de sobrecarga na África do Sul. Em 1995, aproximadamente 20% dos veículos comerciais trafegavam com excesso de carga nas rodovias nacionais do país. Adicionalmente, dados estatísticos de 1999 mostraram que 52% de 14.700 veículos que foram fiscalizados nos 41 postos de pesagens da Província de Gauteng apresentaram excessos.

No geral, os excessos de carga em países desenvolvidos tendem a ser menores quando comparados aos países em desenvolvimento. Isso se justifica principalmente pela fiscalização ineficaz e a falta de informação e conscientização por parte dos transportadores, características acentuadas nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento.

2.2.5 Impactos do excesso de carga na durabilidade dos pavimentos

Um dos principais cuidados ao se dimensionar uma estrutura de pavimento é garantir que essa resista às ações do tráfego ao longo de sua vida útil, evitando que os valores admissíveis de qualquer índice que estime o dano acumulado ou suas condições de serventia sejam atingidos prematuramente. Segundo Franco (2007), os danos nas estruturas de pavimentos ocorrem principalmente devido à aplicação de cargas elevadas ou devido ao grande número de solicitações de passagem dos eixos dos veículos, sendo essencial estimar corretamente o dano causado pelos diversos tipos de veículos, eixos e magnitudes de cargas transportadas. No método de dimensionamento de pavimentos asfálticos adotado no Brasil, um pavimento é dimensionado para resistir a um determinado número N equivalente de solicitações do eixo padrão (Figura 2.8) ao longo de sua vida útil.

Figura 2.8 – Eixo padrão

Fonte: elaborada pela autora.

O número N é calculado pela seguinte equação:

$$N = V_t * FV * FR$$

Sendo:

- V_t = volume total de veículos para determinado período de projeto;
- FV = fator de veículo, sendo esse o número que converte todos os tipos de veículos em eixos padrões;
- FR = fator regional relacionado ao regime de chuvas e usualmente adotado como 1.

No cálculo do número N são considerados fatores relacionados à composição do tráfego, sendo eles:

- Representatividade e volume das categorias de veículos: a partir de contagem de campo ou avaliação do volume de tráfego nas praças de pedágio, é possível quantificar o volume de veículos correspondente às diferentes categorias. Essa informação serve de subsídio para a obtenção dos fatores de distribuições diárias, semanais e mensais utilizadas para cálculo do volume diário médio (VDM) utilizado no cálculo do número N. Deve-se lembrar que esse número não será constante ao longo dos anos e, portanto, uma taxa de crescimento anual deve ser considerada para o fluxo de veículos a fim de se obter o volume médio diário ao final do período de projeto (V_t);
- Cargas transportadas e distribuições dos diferentes tipos de eixos: são consideradas a partir da obtenção do fator de veículo (FV), sendo esse resultado do produto do fator de eixo (FE) pelo fator de carga (FC). O FV representa a diversidade de veículos e cargas que trafegam pela via convertidos em um número de solicitações equivalentes do eixo padrão que causaria o mesmo dano no pavimento. O FE determina o número médio de eixos por veículos que circula na rodovia. Já o FC é o coeficiente que, multiplicado pelo número de eixos resulta no número equivalente de eixos padrões. Para obtenção do FC, deve-se calcular o fator de equivalência de carga (FEC), transformando assim as cargas transportadas em um número equivalente de solicitações do eixo padrão, considerando-se os diferentes tipos de eixo. Esta conversão é realizada a partir de relações empíricas da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) (baseadas na perda de serventia) ou do *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) (baseadas nos efeitos do carregamento na deformação permanente).

Segundo Balbo (2007), no dimensionamento de pavimentos é comum se adotar a hipótese de atendimento às cargas máximas legais previstas e, deste modo, a presença de veículos que trafegam com excesso de carga acaba não sendo considerada. Como resultado, a capacidade de suporte da estrutura de pavimento dimensionada é inferior à necessária para o período de projeto adotado, o que resulta na necessidade de manutenções e reabilitações antes do previsto.

O dano causado pelo carregamento não é uma função linear da carga por eixo, havendo uma relação exponencial entre esses dois fatores, conforme

demonstrado pelos resultados da *AASHO Road Test* que indicaram um valor próximo a 4 para esse expoente (FERNANDES JÚNIOR, 1994). Estudos sobre o reflexo do excesso de carga por eixos na vida útil do pavimento também confirmaram que as variações entre acréscimos de carga por eixo e os correspondentes efeitos de dano ao pavimento ocorrem de forma exponencial (PINTO E PREUSSLER, 2002; ALBANO 1998; FONTELENE, 2011). A Figura 2.9 mostra, por exemplo, que um eixo com sobrecarga de 10% pode reduzir a vida útil de um pavimento de 10 anos para 5 anos, evidenciando a importância de se evitar o tráfego de veículos com sobrecarga nas rodovias (PINTO E PREUSSLER, 2002). Cabe ressaltar que esse estudo foi realizado para uma determinada frota de veículos em condições específicas e, portanto, não pode ser generalizado.

Figura 2.9 – Sobrecarga por eixo x redução da vida útil

Fonte: Pinto e Preussler (2002).

Ainda sobre a deterioração do pavimento, estudos enfatizam a importância da análise desse dano frente à carga por eixo e não ao peso bruto total, visto que veículos pesados podem ser pouco danosos aos pavimentos, desde que sua carga total seja distribuída por um número suficiente de eixos, o que condiz com os resultados apresentados por Sadeghi e Fathali (2007) ao comparar o dano causado por veículos de dois, três e cinco eixos. Caminhões com dois eixos apresentaram

danos consideravelmente maiores no pavimento, fato justificado pela distribuição da carga em um número menor de eixos quando comparados aos outros dois tipos de veículos.

O mesmo foi observado em estudo realizado por Deen, Southgate e Mayes (1980), onde três veículos diferentes foram simulados em uma versão modificada do programa Chevron N-layer e os respectivos danos ao pavimento foram determinados a partir da comparação das respostas do pavimento frente à solicitação de uma carga adotada como padrão (eixo simples de rodas duplas, 80kN), conforme apresentado na Figura 2.10. Foi possível verificar que o acréscimo de dano relacionado ao acréscimo de carga para o veículo de três eixos apresentou-se significativamente maior que o dano dos veículos com cinco e seis eixos.

Figura 2.10 – Análise do dano em diferentes configurações de eixos com o aumento da carga

Fonte: Deen, Southgate e Mayes (1980).

Características do pneu, especialmente sua largura, também são fatores relevantes. O efeito dos diferentes pneus, juntamente com a variação da carga, foi observado a partir de medições em campo das tensões no pavimento de uma rodovia na Finlândia (Figura 2.11). Os resultados foram comparados ao efeito observado no eixo simples de rodas duplas (275/70R 22,5) com 10 toneladas, denominado nesse estudo como eixo padrão. Nota-se que os pneus extralargos

385/65R 22,5 e 425/65R 22,5 com 8 e 10 toneladas por eixo são os mais agressivos considerando a condição estrutural do pavimento, sendo o efeito da carga para o pneu 425/65R 22,5 com 10 toneladas quase quatro vezes maior que o do eixo padrão (ROADEX NETWORK, 2014). O aumento das tensões no pavimento quando utilizadas rodas simples em substituição às rodas duplas pode ser justificado pela concentração de carga em apenas um ponto em vez de dois.

Figura 2.11 – Efeito da variação de carga para diferentes tipos de pneus

Fonte: ROADEX Network (2014).

Outro prejuízo que pode ser citado se refere aos custos operacionais adicionais dos veículos. Ao trafegar com sobrecarga, os pneus são danificados mais rapidamente, o que diminui a vida útil dos mesmos. Isso se justifica, pois, para aumentar a capacidade de carga, os transportadores usualmente aumentam a pressão dos pneus acima dos limites recomendados pelos fabricantes, comprometendo sua estrutura e aumentando o risco de estouro. O aumento do consumo de combustível e óleo também será consideravelmente maior, visto que o motor será mais solicitado por conta do peso adicional. Os freios e a suspensão também serão mais exigidos, principalmente em declives, onde a carga atua como indutor do aumento da velocidade.

Por fim, o excesso de carga aumenta o risco de acidentes nas estradas de forma indireta, com o desgaste prematuro dos componentes mecânicos citados acima e essenciais para a estabilidade dos veículos, ou de forma direta, visto que os

veículos são fabricados para trafegarem em segurança com uma carga limite que garanta estabilidade e controle sobre o caminhão. Dessa forma, ao trafegar com excesso de carga, há um aumento na distância de frenagem quando os freios são acionados, com superaquecimento do sistema, e redução da estabilidade ao tombamento, principalmente em curvas, comprometendo a dirigibilidade e segurança. ERVIN (1983, *apud* NAVIN, 1992) constatou a partir da análise de dados de acidentes que a ocorrência do tombamento está diretamente relacionada com a lotação do caminhão, visto que aproximadamente 40% dos acidentes com caminhões carregados são devidos ao tombamento lateral, sendo esse número reduzido para valores abaixo de 5% para caminhões vazios. Estudos realizados por Gutiérrez e Canale (2009) também comprovaram que o aumento da carga interfere negativamente na estabilidade direcional dos veículos, tendo em vista a redução do valor da velocidade a partir da qual o movimento do veículo se torna instável.

2.3 SISTEMAS WEIGH-IN-MOTION

Segundo a Austroads (2000), um sistema *Weigh-in-Motion* (WIM) é um dispositivo capaz de medir o peso dinâmico do eixo de um veículo em movimento para então estimar seu respectivo peso estático por eixo. Embora tenha um alto custo inicial, a utilização do WIM contribui positivamente para aquisição de dados e monitoramento do tráfego.

Um dos primeiros sistemas WIM foi desenvolvido em 1952 pelos pesquisadores Norman e Hopkins da *United States Bureau of Public Roads* (atual *Federal Highway Administration*). Era composto por uma plataforma de concreto armado instrumentada com medidores de deformação (*strain gauges*), sensores esses que variam sua resistência elétrica a partir da aplicação de uma força. Os pesos dos veículos eram calculados manualmente a partir da análise dos sinais de saída de um osciloscópio conectado aos medidores de deformação (STEPHENS *et al.*, 2013).

Segundo a ASTM E1318-09 (2009), os sistemas *Weigh-in-Motion*, com base nos tipos de dados coletados, velocidades do veículo aconselhadas para aferição das cargas e precisão das medidas, podem ser dispostos em quatro tipos, conforme apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Tipos de sistemas *Weigh-in-Motion*

Descrição	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Velocidade	16 a 130 km/h	24 a 130 km/h	16 a 130 km/h	3 a 16 km/h
Aplicação	Contagem e classificação de veículos	Contagem e classificação de veículos	Pré-seleção de veículos	Fiscalização de carga
Carga por roda	•		•	•
Carga por eixo	•	•		•
Carga por grupo de eixo	•	•	•	•
Peso bruto	•	•	•	•
Velocidade	•	•	•	•
Espaçamento entre eixos	•	•	•	•
Classe do veículo	•	•		
Identificação do local	•	•	•	•
Faixa e direção de tráfego	•	•	•	
Data e horário	•	•	•	•
Sequencial do veículo detectado	•	•	•	•
Comprimento total do veículo	•	•		
Fator de equivalência de carga	•	•		
Código da infração	•	•	•	•
Aceleração			•	•

Fonte: ASTM E1318-09 (2009).

Na Tabela 2.4 estão listados os requisitos de desempenho funcional dos sistemas WIM preconizados pela ASTM.

Tabela 2.4 – Requisitos de desempenho de sistemas WIM

Funcionalidade / Tolerância para 95% de confiança				
Tipo	Carga por roda	Carga por eixo	Carga por grupo de eixo	PBT
I	± 25%	± 20%	± 15%	± 10%
II	-	± 30%	± 20%	± 15%
III	± 20%	± 15%	± 10%	± 6%
IV	≥2.300±100 kg	≥5.400±200 kg	≥11.300±500 kg	≥27.200±1100 kg

Fonte: ASTM E1318-09 (2009).

A velocidade do veículo recomendada para a adequada aferição das cargas permite também dividir os sistemas em pesagem em movimento como de alta

velocidade (HS-WIM), composto por equipamentos capazes de apurar as cargas dos veículos que trafegam com velocidade de até 130 km/h, e pesagem em movimento de baixa velocidade (LS-WIM), equipamentos apropriados para aferição de cargas com velocidade de operação de até 16 km/h. Em resumo, sistemas de alta velocidade são equipamentos mais eficientes, enquanto sistemas de baixa velocidade são equipamentos mais precisos. Os sistemas LS-WIM já são amplamente utilizados no controle de cargas rodoviárias no Brasil. Já a quantidade de sistemas HS-WIM é mais escassa, sendo uma tecnologia ainda em fase de implantação nos novos postos integrados automatizados de fiscalização, para triagem de veículos com excesso realizada na faixa de rolamento da rodovia. Nas figuras 2.12 e 2.13 a seguir são apresentados exemplos de sistemas de pesagem em movimento de baixa e alta velocidade, respectivamente.

Figura 2.12 – Exemplo de sistema LS-WIM (França)

Fonte: Jacob e Beaumelle (2010).

Figura 2.13 – Exemplo de sistema HS-WIM (Brasil)

Fonte: Agência Nacional de Transportes Terrestres (2016).

É possível também classificar os sistemas conforme o tipo de instalação realizada, sendo esses sistemas portáteis ou permanentes. Os equipamentos portáteis são indicados para quando há a necessidade de conhecer o tráfego em diferentes pontos da rodovia e o orçamento é restrito. Já os equipamentos permanentes são recomendados para quando se deseja monitorar o tráfego de um local específico por um longo período, sendo possível assim verificar possíveis variações sazonais do tráfego em termos diários, semanais e mensais.

Segundo Albano e Lindau (2006), atualmente observa-se uma maior utilização de sistemas *Weigh-in-Motion* devido as seguintes vantagens:

- Possibilidade de controle das cargas e dimensões de todos os veículos que trafegam no local;
- Informações sobre o comprimento total do veículo e distância entre eixos, sendo possível categorizá-los e, conseqüentemente, conhecer os limites legais aplicáveis, permitindo assim o controle desses limites;
- Ganho de tempo do usuário que não está com excesso de peso, visto que os veículos podem retornar à rodovia rapidamente, sem paradas e outros inconvenientes;
- Monitoramento diário e mensal de todos os veículos que passam pelo local, referindo-se a pesos e também às velocidades e classificação dos veículos.

2.3.1 Principais tecnologias existentes

A escolha do tipo de tecnologia utilizado é uma decisão muito importante, devendo ser embasada nas condições físicas do local, bem como nas necessidades das agências rodoviárias e intenções de aplicações dos dados. Alguns exemplos de sistemas WIM que podem ser citados são: (i) tapete capacitivo (*capacitance mats*); (ii) sensores piezelétricos (*piezoelectric sensor*) de quartzo, cerâmica ou polímero; (iii) sensores de fibra ótica (*fiber-optic cables*); (vii) *bending plates*; e (viii) célula de carga (*load cells*).

Os tapetes capacitivos são geralmente utilizados como sistemas portáteis. São formados por duas chapas metálicas sobrepostas separadas por um material dielétrico. Uma diferença de potencial é aplicada sobre as chapas e, com a passagem do veículo, a distância entre as mesmas diminui, resultando em um

aumento na capacitância. A Figura 2.14 apresenta um exemplo de tapete capacitivo em operação.

Figura 2.14 – Tapete capacitivo conectado a equipamento de análise de dados

Fonte: Mimbela e Klein (2007).

Os sensores piezelétricos, também usualmente utilizados como sistemas portáteis, são formados por chapas estreitas posicionadas perpendicularmente à faixa de rolamento. Com a passagem do veículo sobre as chapas, gera-se uma voltagem elétrica, sendo essa proporcional ao peso de uma roda ou conjunto de rodas. Tanto os tapetes capacitivos, quanto os sensores piezelétricos envolvem o posicionamento dos sensores sobre o pavimento existente, o que acaba prejudicando a precisão do sistema. Isso ocorre porque o movimento direto da roda sobre os sensores gera impactos físicos nos mesmos, interferindo na estimativa do peso estático aplicado por cada eixo. A Figura 2.15 apresenta um exemplo de sensor piezelétrico em operação.

Figura 2.15 – Sensores piezelétricos

Fonte: Albano e Lindau (2006).

Os sistemas de pesagem em movimento permanentes, por outro lado, são dimensionados para instalação sob a faixa de rolamento ou embutida à estrutura do pavimento, garantindo assim, caso corretamente instalados, uma menor influência de eventuais forças de impactos geradas pela passagem do veículo e, conseqüentemente, melhor precisão nas medidas.

Cada tipo de tecnologia de pesagem WIM permanente possui suas vantagens e desvantagens. Alguns sistemas WIM, por exemplo, são sensíveis à temperatura, como os piezelétricos de cerâmica e polímero. Para correção dessa influência, determinados fabricantes desenvolveram algoritmos que consideram a sensibilidade à temperatura do sistema. Essas tecnologias não são indicadas para regiões com grande variação térmica. Como vantagem, os sensores piezelétricos de cerâmica e polímero são relativamente fáceis de serem instalados quando comparados a outros tipos de tecnologia, além de mais acessíveis financeiramente. Os piezelétricos de quartzo, apesar de possuir um maior custo de aquisição, apresenta como vantagens importantes sua maior precisão e menor sensibilidade às variações de temperatura. Cada sensor tem o comprimento de um metro e pode ser acomodado em corte geralmente menor do que cinco centímetros de largura no pavimento.

Os sensores de fibra ótica, tecnologia sensível à pressão e que defletem com a passagem do veículo, requerem um corte relativamente pequeno para inserção no pavimento, o que resulta em menores custos e tempo de instalação. No entanto, esse tipo de sensor é tão pequeno de forma que nunca o pneu encontra-se totalmente sobre o equipamento e, portanto, uma parte do peso acaba sendo

suportado pelo próprio pavimento, fato que compromete as medições e deve ser considerado (HALLENBECK E WEINBLATT, 2004).

Em contrapartida, os *bending plates* possuem dimensões suficientes para que a roda seja posicionada por completo sobre o equipamento e não são sensíveis à temperatura. Contudo, o preço desse tipo de tecnologia pode ser considerado moderado e o tempo de instalação é superior ao dos sistemas piezelétricos.

Segundo Albano e Lindau (2006), as células de carga são o sistema mais utilizado nos Estados Unidos no âmbito das tecnologias de pesagem em movimento de alta velocidade. A versão mais comum opera transferindo a carga da roda aplicada sobre a plataforma de pesagem sobre um ou mais cilindros hidráulicos contendo óleo. As alterações na pressão hidráulica são correlacionadas com a carga por eixo. O sistema é pouco sensível às variações de temperatura e funciona bem para pesagem de veículos também em baixas velocidades. Essa tecnologia é, no entanto, a tecnologia de sistema *Weigh-in-Motion* mais cara, tanto para aquisição, quanto para instalação.

2.3.2 Instalação, calibração e precisão dos sistemas WIM

Antecedendo o processo de instalação e calibração, a primeira etapa para o sucesso de um sistema de pesagem em movimento é a escolha do local onde o mesmo será instalado. Isso ocorre, conforme mencionado anteriormente, porque a dinâmica do veículo é um componente importante da força resultante que solicitará o pavimento. Sendo assim, o correto posicionamento do sensor pode ser um fator preponderante frente à própria escolha da tecnologia que será utilizada. Como exemplo, caso o sensor seja instalado em um pavimento irregular ou muito flexível, a qualidade dos dados de pesagem será comprometida, independentemente do tipo de tecnologia.

A escolha do posicionamento do sensor com relação à superfície do pavimento também é relevante. Segundo Hallenbeck e Weinblatt (2004), testes em campo demonstraram que os sistemas WIM mais precisos estão embutidos no pavimento, porém não profundamente. Sensores localizados acima do pavimento, como no caso dos sistemas temporários, são submetidos ao movimento direto da roda, o que aumenta a dinâmica do veículo e, conseqüentemente diminui a precisão dos sensores. Já os sensores que estão completamente acoplados no pavimento

são afetados pelas forças de tração e compressão as quais os pavimentos são submetidos e pelas alterações ambientais. Modificações no perfil do pavimento, como deformação permanente, também resultam em forças de impacto que aumentam a dinâmica do veículo, diminuindo a precisão do sistema.

A quantidade de sensores instalados também é um fator relevante. O interessante é que sejam instalados pelo menos dois sensores, visto que quanto maior a quantidade de sensores posicionados em série, melhor será a análise da dinâmica do veículo e, conseqüentemente, as estimativas das cargas por eixo. No entanto, estudos relatam que essa afirmação será válida para os casos em que os sensores possuem precisões idênticas (caso 1), mas não necessariamente para o caso de haver uma diferença de 10% (caso 2) ou até 20% (caso 3) entre as precisões, como pode ser observado na Figura 2.16. No entanto, é importante citar também que a existência de múltiplos sensores permite a falha de um sensor sem grandes perdas ao sistema de pesagem.

Figura 2.16 – Relação do erro relativo da pesagem e o número de sensores

Fonte: Gajda, Burnos e Sroka (2016).

De maneira sucinta, o procedimento de instalação consiste das seguintes etapas: (i) adequada escolha do local para instalação do sistema; (ii) elaboração de projeto do *layout*, considerando todos os equipamentos do sistema; (iii) execução de cortes superficiais no revestimento em dimensões compatíveis com o tipo de sensor, de acordo com a especificação do produto; (iv) instalação dos sensores e verificação dos sinais obtidos, com realização dos devidos acertos; (v) ajustes e validação do sistema de aquisição de dados; e (vi) instalação de câmeras de monitoramento.

Um dos diferenciais da tecnologia *Weigh-in-Motion* é que, diferente da pesagem estática, onde se mede apenas a força gravitacional, a resultante das forças medidas considera também outros elementos relevantes, como a vibração proveniente da oscilação da suspensão dos veículos e a força de atrito entre o pneu e o pavimento, por exemplo.

Entretanto, a consideração dessas variáveis, apesar de representar a situação mais próxima à realidade para compreensão do processo de degradação de pavimentos, também torna a estimativa do valor do peso uma tarefa mais complexa. A determinação do peso com precisão e confiabilidade será influenciada por características como o perfil e estado de conservação do pavimento, características da suspensão do veículo, velocidade de operação, entre outros. Por conta da quantidade de variáveis envolvidas, os sistemas de pesagem em movimento dificilmente são mais precisos que balanças estáticas.

Além dos fatores acima mencionados, a precisão também será função do processo de calibração do sistema. Essa etapa é de suma importância, objetivando garantir que o peso estimado pelo WIM seja o mais próximo possível do peso estático real. Enquanto muitos equipamentos podem ser calibrados em laboratório, isso não é possível para os sensores do WIM, vide a dificuldade de considerar os efeitos dinâmicos dos caminhões de uma rodovia específica sem conhecer essas forças em campo e no local específico onde o sensor será instalado.

Sendo assim, o indicado para uma calibração inicial é a comparação direta dos dados de saída do sistema com informações de carga por eixo conhecidas. A FHWA (1998) recomenda o uso de, no mínimo, dois caminhões de categorias diferentes, ou ao menos suspensões diferentes, com pesos conhecidos para a calibração do sistema de pesagem em movimento.

Várias passagens são feitas para aferir o peso e o espaçamento entre eixos em cada veículo com os sensores do sistema WIM. É conveniente que sejam reproduzidas situações semelhantes às esperadas durante a fase de operação real do sistema, incluindo o trajeto provável do veículo e a respectiva velocidade de operação. Caso o sensor seja sensível à temperatura, é importante também realizar a pesagem durante diferentes horários do dia, para entender a influência desse fator nas medições. Por fim, esses dados são empregados no cálculo dos fatores de peso

que convertem as medidas dinâmicas em estáticas. Quando esta fase é concluída, o sistema está apto para operação.

Visitas periódicas no local de instalação do Sistema WIM devem ser previstas para verificação da calibração. Caso alterações sejam observadas, o sistema deve ser investigado para determinar se características do tráfego estão mudando, ou se existe uma alteração na sensibilidade do sensor que pode ter afetado a calibração.

As condições do pavimento no local de instalação do Sistema WIM também devem ser verificadas periodicamente, pois mesmo que o sistema tenha sido instalado em local com condições iniciais apropriadas, é possível que ocorra deteriorações ou anomalias na superfície e/ou estrutura que irão interferir na precisão do sistema.

A precisão dos sistemas de pesagem em movimento poderá limitar sua aplicabilidade. Segundo a Austroads (2000), na Europa é estabelecida precisão para cada atividade, conforme apresentado Tabela 2.5 a seguir.

Tabela 2.5 – Típicos requisitos de tolerância do Sistema WIM na Europa

Aplicabilidade	Atividades típicas	Acurácia (para 95% de Confiança)
Estatística	<ul style="list-style-type: none"> •Análises econômicas •Estudos de transporte •Classificação de veículos 	< 20%
Infraestrutura	<ul style="list-style-type: none"> •Gestão de rodovias e pontes •Alertas para excesso de carga •Pré-seleção para pesagem estática •Segurança rodoviária 	< 15%
Controle	<ul style="list-style-type: none"> •Fiscalização •Necessidades da Indústria e Comércio 	< 5%

Fonte: Austroads (2000).

2.3.3 Controle de qualidade dos dados

Apesar de ser uma tecnologia bem desenvolvida, sistemas de pesagem em movimento, mesmo que calibrados, podem gerar dados incoerentes. Como

exemplos, tem-se a identificação errônea de veículos com amplo espaçamento entre eixos como dois veículos distintos, veículos muito próximos interpretados como um único veículo, ou até mesmo valores de carga com magnitudes muito distantes do peso estático real. Incoerências como essas, adicionadas a outros possíveis erros do próprio sistema, provavelmente resultarão em interpretações equivocadas dos dados, afetando a qualidade da caracterização do tráfego. Diante da quantidade considerável de dados de tráfego que são gerados todos os dias, a definição de filtros condizentes com o tipo de análise que se deseja realizar é imprescindível.

Mai, Turochy e Timm (2013) realizaram um estudo sobre o assunto, propondo uma metodologia para o controle de qualidade dos dados WIM no Alabama, nos Estados Unidos, composta por dois tipos de abordagens: verificações a partir de limites e verificações racionais. Limites podem ser aplicáveis, por exemplo, no tamanho dos arquivos de dados de saída do sistema WIM. Caso os arquivos apresentem tamanhos muito baixos ou altos, esses podem ser facilmente identificados e filtros podem ser criados para eliminá-los. Essa, segundo os autores, é uma prática recomendada pela FHWA no *Data Analyst's Manual*, porém sem muitos detalhes sobre os procedimentos a serem seguidos. Com embasamento estatístico, é razoável supor que os volumes de caminhões mensais não variam dramaticamente em circunstâncias normais e, assim, sugeriu-se que tamanhos de arquivos com valores limites de 1,5 vezes a amplitude interquartil deveriam também ser rejeitados.

Outros tipos de erros são mais difíceis de serem identificados, sendo as verificações racionais aplicadas nestas situações. Intervalos de valores aceitáveis foram especificados para diferentes variáveis, como número de eixos, valores de carga por eixo, velocidade, categoria do veículo, entre outros, e dados fora desses intervalos foram filtrados. Atenta-se a importância de conhecimento local para adoção de intervalos de valores coerentes. A escolha do intervalo de carga para os diferentes tipos de eixo é a etapa mais importante dessa verificação, visto que no caso da opção por intervalos muito pequenos, veículos com excesso de carga podem ser descartados.

2.3.4 Aplicações dos sistemas WIM

2.3.4.1 Caracterização e monitoramento do tráfego

Informações sobre o tráfego rodoviário são geralmente utilizadas pelos órgãos rodoviários como dados de entrada para diversas atividades, como o dimensionamento de projetos geométricos, de pavimentos e obras de artes, desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho de pavimentos, análises ambientais, análises financeiras, fiscalização, entre outras. Dessa forma, o processo de caracterização do tráfego é de suma importância, bem como o monitoramento das variações que ocorrem com o passar do tempo devido, por exemplo, ao crescimento do tráfego. Os tipos de dados coletados dependerão do tipo de equipamento e tecnologia utilizado para esta finalidade. As escolhas deverão ser embasadas na necessidade de detalhamento dos dados devido à atividade que será realizada.

De todas as tecnologias utilizadas para monitoramento de tráfego, os sistemas WIM possuem normalmente os sensores mais sofisticados, possibilitando a aquisição de dados de tráfego de todos os veículos que trafegam pela rodovia, o que pode ser muito vantajoso para os órgãos rodoviários, apesar de exigir elevado conhecimento da tecnologia e adequado controle operacional. No geral, com os dados resultantes do WIM, é possível: identificar a porcentagem de veículos comerciais na rodovia, observar a existência de sazonalidades, monitorar os Pesos Brutos Totais e por eixo, além de identificar a distribuição por categoria de veículos no local.

Devido à grande quantidade de informações coletadas, é usual que as mesmas sejam sintetizadas. Para dados de pesagem, por exemplo, três tipos de sínteses são as mais utilizadas:

- Separação por intervalos de valores de Peso Bruto Total (PBT), usualmente por categorias de veículos;
- Espectro de carga, sendo apresentada a distribuição de carga por eixo para várias configurações (eixos simples de roda simples, eixos simples de rodas duplas, tandem duplos e tandem triplos) para cada tipo de veículo;

- Fator de equivalência de carga (FEC), valores esses obtidos a partir dos espectros de cargas e muito úteis para comparação do potencial de dano ao pavimento de diferentes espectros de carga.

Buchanan (2004) auxiliou o *Mississippi Department of Transportation* (MDOT) no desenvolvimento de espectros de carga a partir de dados de tráfego de 22 sistemas WIM localizados em diferentes regiões do estado de Mississippi. A partir da análise dos dados de tráfego de 1992 a 1998, Buchanan obteve informações importantes sobre a porcentagem de veículos comerciais e a distribuição por categoria de cada local. Os veículos comerciais representaram porcentagens que variaram entre 4% a 40% do tráfego total. Com relação à distribuição por categoria, o autor realizou essa análise por classe de rodovia, observando que rodovias da mesma classe poderiam ou não apresentar distribuições por categorias semelhantes, conforme pode ser observado na Figura 2.17. A classe de veículos utilizada foi a preconizada pela *Federal Highway Administration* (FHWA).

Figura 2.17 – Distribuição por categoria de veículos em rodovias FC2 (rural arterial – não interestadual) do estado de Mississippi

Fonte: Buchanan (2004).

Neste estudo também foi analisada a distribuição por categoria de veículos baseada em um sistema de classificação do tráfego de caminhões em grupos, conhecido como *Truck Traffic Classification* (TTC). Para isso, primeiramente a distribuição por categoria foi analisada para um determinado período (diário,

semanal, mensal ou anual). Em seguida, uma distribuição por categoria normalizada foi obtida a partir da divisão do total de veículos de cada categoria pelo total de veículos comerciais na rodovia. A partir da análise dessas distribuições, foi possível a identificação do TTC de cada local, agrupando-se assim as distribuições por categoria de veículos dos locais com o mesmo TTC. Observou-se que as distribuições apresentaram melhores relações entre si quando analisadas por este método, conforme apresentado na Figura 2.18.

Figura 2.18 – Distribuição por categoria de veículos para rodovias TTC 3 (caminhões com reboque único ou múltiplos reboques) para o estado de Mississippi

Fonte: Buchanan (2004).

As distribuições mensais por categoria de caminhão foram analisadas e comparadas com base na distribuição normalizada da respectiva categoria de caminhão relativa à média anual. O conhecimento das distribuições mensais é importante para caracterização de possíveis sazonalidades. As distribuições horárias também foram analisadas para conhecimento do volume de veículos durante o dia.

Outras informações importantes que foram obtidas nesse estudo foram as porcentagens de veículos por faixa e por direção e as taxas de crescimento do tráfego para cada local. Por fim, o espectro de carga por eixo para cada ano foi analisado e ponderado. Buchanan (2004) mostrou em seu trabalho que os espectros de carga por eixo e a caracterização do tráfego podem ser elaborados com elevada precisão para locais com dados provenientes de um Sistema WIM.

Nos Estados Unidos, todos os Departamentos de Transportes (DOT) se baseiam nos procedimentos preconizados pelo *Statewide Traffic Analysis and Reporting System* para desenvolvimento, criação e operação de sistemas de monitoramento de tráfego. Como exemplo, pode-se citar o *Texas Department of Transportation* (TxDOT) que, segundo a FHWA (2013), possui um programa de monitoramento que consiste na coleta de informações de tráfego a partir de operações contínuas de contagem e monitoramento de tráfego de curto prazo, onde informações sobre volume, classificação de veículos, velocidade, quantidade de eixos e peso são obtidas. O TxDOT possui e mantém, aproximadamente, 350 postos de monitoramento de tráfego, sendo que em muitos deles a tecnologia *Weigh-in-Motion* é utilizada.

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), com o objetivo de coletar dados de tráfego nos trechos mais representativos da Rede Rodoviária Federal, implantou o Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT). O processo de implantação teve início em 1975, ocorrendo de forma lenta e gradativa. Em 2001, o PNCT foi paralisado por contingenciamentos orçamentários, retomando suas atividades somente em 2013. Como consequência, o banco de dados de informações de tráfego nas rodovias brasileiras ainda está em desenvolvimento. A partir da retomada do PNCT, frentes de ações foram estabelecidas, essas baseadas em contagens de tráfego permanentes e pesquisas de origem destino. A partir das informações consultadas, não foi possível identificar as tecnologias adotadas para as contagens de tráfego, no entanto, sabe-se que a tecnologia *Weigh-in-Motion* ainda é pouco utilizada para caracterização e monitoramento de tráfego no Brasil.

2.3.4.2 Dimensionamento e sistema de gerência de pavimentos rodoviários

O conhecimento do tráfego rodoviário, essencial para a elaboração de projetos de dimensionamento de pavimentos e quantificação do desempenho para fins de gerência da malha rodoviária, é uma tarefa complexa devido, além de outros fatores, à heterogeneidade de tipos de veículos, configurações de eixos e magnitudes de carga que o compõem. No entanto, conforme já mencionado, o uso de sistemas *Weigh-in-Motion* possibilita a caracterização do tráfego de forma rápida

e eficiente, sendo seu uso muito benéfico tanto para projetistas quanto para os órgãos rodoviários.

Em um projeto de pavimento, a etapa do estudo de tráfego contempla a obtenção dos parâmetros necessários para o dimensionamento da estrutura. No Brasil, o tráfego é caracterizado pelo número “N” de solicitações equivalentes a um eixo padrão, que consiste em um eixo simples de rodas duplas com carga de 8,2 toneladas, acumuladas ao longo do período de projeto. Atualmente, devido à ausência de informações concisas sobre o tráfego, muitas suposições são feitas, principalmente com relação à magnitude das cargas transportadas. Como consequência, a capacidade de suporte da estrutura de pavimento dimensionada resultante pode ser superior ou inferior à necessária para o período de projeto adotado, sendo o sucesso do projeto muitas vezes atrelado à experiência do projetista.

Com a análise dos dados do sistema WIM é possível, primeiramente, identificar o volume diário de veículos que utilizam a rodovia e determinar a distribuição do número de solicitações de cada tipo de eixo. Adicionalmente, com as informações de carga por eixo, é possível aferir a porcentagem de veículos que trafegam com pouca carga, com valores próximos às cargas máximas legais previstas por lei, ou com excesso de carga, além de identificar com quanto excesso esses veículos circulam, possibilitando adotar hipóteses de projeto mais coerentes com a realidade. Com o uso dos dados do WIM é possível também verificar a porcentagem de veículos comerciais que trafegam na faixa mais solicitada, informação utilizada nas premissas de dimensionamento de pavimentos brasileiros.

Lee e Garner (1996) utilizaram dados de um sistema WIM instalado na Rodovia 59 no Texas, Estados Unidos, para calcular os Fatores de Equivalência de Cargas (FEC) dos veículos, com o objetivo principal de desenvolver um método para prever os FECs a partir de procedimentos tradicionais de contagem e classificação do tráfego e, assim, aprimorar os dimensionamentos realizados a partir do método tradicional utilizado na época (preconizado pela AASHTO). A justificativa principal do estudo baseou-se no fato de a instalação e a operação de sistemas WIM serem relativamente caros quando comparados com as metodologias tradicionais. Assim sendo, o método indicado poderia ser utilizado para estimar os FECs em rodovias

com características de carga semelhantes, mas onde o volume de tráfego fosse diferente.

No método proposto, o FEC médio por tipo de eixo de uma determinada classe de veículo foi utilizado como um fator para conversão de veículos por dia para FECs por dia. O fator para conversão foi relacionado com o dia da semana, bem como com o mês analisado. Foram utilizados os dados da classe mais frequente na Rodovia 59 para o cálculo dos fatores de conversão. Para estimativa dos FECs futuros, uma taxa de crescimento foi aplicada. Lee e Garner (1996) sugerem que sejam coletadas amostras representativas de dados de sistemas WIM já em operação em diferentes localidades e em diferentes épocas do ano, a fim de disponibilizar uma grande variedade de fatores para conversão.

Os dados de sistemas WIM podem também ser muito úteis tratando-se do mais recente método mecanístico-empírico de dimensionamento preconizado pela AASHTO e apresentado no guia AASHTO 2008, denominado *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG). A necessidade de revisão do método tradicional empírico (AASHTO, 1993) foi observada pela constatação de que o volume de tráfego nas rodovias americanas estava crescendo exponencialmente, bem como a evolução das configurações dos veículos e pressões aplicadas pelos pneus nos pavimentos (FONTENELE, 2011). Os dados para caracterização do tráfego requeridos vão além da informação dos Fatores de Equivalência de Carga, conforme apresentado por Sridhar (2008) e listados a seguir:

- Fatores de distribuição de carga por eixo: representa a porcentagem do número de aplicações de um determinado tipo de eixo em um intervalo de carga para uma classe de veículo com relação ao total de aplicações;
- Fator de crescimento de caminhões: representa o volume futuro de tráfego de caminhões para uma respectiva idade do pavimento;
- Distribuição por classe de veículos: representa a distribuição do volume diário médio anual em cada classe de caminhão;
- Volume de tráfego de caminhões no ano base: tráfego diário médio anual de caminhões nos dois sentidos do tráfego, número de faixas na direção de projeto, porcentagem de caminhões na faixa de tráfego do projeto e velocidade operacional dos veículos;

- Configuração de eixos e distância entre eixos: informações que podem ser obtidas em catálogos de fabricante ou medidas diretamente em campo;
- Características do pneu e pressão de enchimento: informações importantes para elaboração de modelos de desempenho.

Desde a criação do método de dimensionamento de pavimentos rodoviários MEPDG, muitos estudos surgiram com o objetivo de relatar as experiências de implantação da nova metodologia nos diversos setores rodoviários, expondo também métodos para aquisição dos dados de entrada necessários, especialmente tratando-se do desenvolvimento de espectros de cargas. Buchanan (2004), Sridhar (2008), Papagiannakis *et al.* (2006), Stephens *et al.* (2013), Selezneva *et al.* (2016) são alguns exemplos desses estudos.

De acordo com Timm, Tisdale e Turochy (2005 *apud* Fontenele, 2011), alguns estados americanos possuem sistemas de aquisição de dados adequados para a montagem de espectros de cargas, o que inclui estações WIM, ou o uso de balanças portáteis, mas não são todos. Por conta disso, é comum o desenvolvimento de espectros de cargas padrões ou representativos que possam ser utilizados com algum nível de confiança no projeto de pavimentação. Adicionalmente, há também trabalhos voltados para o desenvolvimento de equações matemáticas para modelar o espectro de carga com o intuito de preencher essa lacuna.

Turochy, Timm e Tisdale (2005), com o uso de dados de 13 estações *Weigh-in-Motion* localizadas no estado de Alabama, compararam fatores de distribuição de carga por eixo para diferentes dias, meses, direções de tráfego e locais. Esses fatores também foram utilizados para elaboração de modelos estatísticos para uso no dimensionamento mecanístico-empírico. Os autores concluíram que não há a necessidade de utilizar fatores separados por dia ou mês, contando que os dados coletados pelo sistema WIM sejam representativos e, para isso, as seguintes recomendações para a coleta de dados WIM são feitas:

- Os dados devem ser coletados, no mínimo, na sexta-feira, no sábado ou no domingo e na segunda, terça, quarta ou quinta-feira;
- Os dados devem ser coletados, pelo menos, em novembro, dezembro ou janeiro para considerar a redução do tráfego por conta do inverno, bem como

em abril, maio ou junho para considerar o aumento do tráfego de caminhões no verão.

Na Austrália, segundo a Austroads (2000), ao utilizar dados de sistemas WIM para o dimensionamento de pavimentos, principalmente os HS-WIM, são apresentados projetos mais realistas e, conseqüentemente, benefícios financeiros são observados. Por exemplo, segundo Koniditsiotis (1994 *apud* Austroads, 2000), análises de dados de sistemas WIM localizados em ligações específicas da cidade de Canberra indicaram valores de Fatores de Equivalência de Carga significativamente inferiores aos usualmente utilizados em projeto de dimensionamento e reabilitação de pavimentos, o que, segundo o autor, indicaria uma redução de custos de aproximadamente \$12.000 para a reabilitação de um trecho de extensão de 600 metros composto por duas faixas.

Com relação ao Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), que segundo DNIT (2011) abrange as atividades de planejamento, projeto, construção e manutenção da malha rodoviária, informações sobre o tráfego das rodovias são igualmente importantes para o seu desenvolvimento, sendo que o uso do sistema WIM garante elevado nível de detalhes sobre o tráfego das rodovias monitoradas, coletas contínuas e dados sempre atualizados.

Basicamente, o SGP consiste na adoção, desenvolvimento e previsão de intervenções que garantam a melhor aplicação dos recursos financeiros disponíveis para manutenção e reabilitação de pavimentos de forma eficaz e adequada. Para isso, o banco de dados, onde ficam armazenadas todas as informações relevantes de cada segmento rodoviário, necessita ser constantemente atualizado e consolidado, devido à dinâmica de variação das condições dos pavimentos. Assim, a utilização de dados com qualidade adequada contribui com o desenvolvimento de modelos de caracterização do tráfego precisos, possibilitando: (i) adequadas previsões das condições futuras do pavimento; (ii) avaliação de conseqüências de adoção ou retardamento de intervenções; (iii) estabelecimento de estratégias de manutenção e de programas otimizados de investimentos; e (iv) formulação de programas de monitoramento.

2.3.4.3 Fiscalização de carga rodoviária

O tráfego de veículos comerciais com excesso de carga é um problema crítico em muitos países, visto que a carga aplicada pelo tráfego é uma das maiores responsáveis pelos danos no pavimento. Com o objetivo de garantir a integridade do pavimento pelo período previsto em projeto, sistemas WIM podem ser instalados em locais estratégicos da malha rodoviária para controle e fiscalização da carga transportada.

Os sistemas de pesagem em movimento são uma alternativa interessante para monitoramento e fiscalização de veículos pesados, visto que esse tipo de sistema permite a coleta contínua de dados, fornecendo informações sobre classificação do veículo, velocidade de operação e peso. O uso do WIM para fiscalização da carga rodoviária elimina as filas nas estações de pesagem estática, possibilitando um aumento considerável no número de veículos fiscalizados, resultando em economias tanto para os órgãos rodoviários quanto para as transportadoras.

Existe uma grande quantidade de estudos internacionais relatando o uso da tecnologia *Weigh-in-Motion* para monitoramento do excesso de carga nas rodovias. Jacob e Loo (2008) apresentaram em seu trabalho um resumo do uso dessa tecnologia para essa finalidade na Europa, onde a prática foi incentivada a partir da criação do Projeto REMOVE – *Requirements for Enforcement of Overloaded Vehicles in Europe*, no início dos anos 2000. O objetivo do projeto foi apresentar para todos os países da União Europeia os requerimentos operacionais, legais e técnicos, bem como as estratégias para a implantação de sistemas WIM para fiscalização da lei.

A Holanda, por exemplo, com a instalação de oito sistemas WIM na época, utilizou as informações de carga como uma ferramenta para pré-selecionar os veículos que seriam parados e fiscalizados nas balanças estáticas. Os dados de pesagem também foram utilizados para planejamento e controle da polícia rodoviária. Com informações sobre todos os veículos que trafegam com excesso, as transportadoras que mais cometem infrações são identificadas e a fiscalização torna-se mais rigorosa para as mesmas.

Semelhante à prática adotada na Holanda, o departamento policial da Eslovênia utiliza os dados de sistemas WIM para pré-selecionar os veículos que serão fiscalizados nos postos de pesagem. Adicionalmente, essas informações também são utilizadas para escolha de quais áreas e em quais horários as fiscalizações ocorrerão.

Hang, Xie e He (2013) apresentam uma alternativa interessante para localização da tecnologia WIM para controle do excesso de carga: nas praças de pedágio. Como os pedágios possuem pontos de acesso restritos e condições controladas de tráfego, sistemas WIM podem ser utilizados para fiscalização nesses pontos. Na China já existem sistemas de pesagem em movimento de baixa velocidade (LS-WIM) instalados em alguns pedágios, conforme esquemático apresentado na Figura 2.19. Nas estações de fiscalização de carga do país, normalmente o WIM é utilizado para uma pré-seleção dos veículos que serão fiscalizados. Os veículos que apresentarem algum indício de ilegalidade são então direcionados para uma balança estática de maior precisão.

Figura 2.19 – Típico Sistema WIM usado em praças de pedágio na China

Fonte: Hang, Xie e He (2013).

Na França, segundo Stanczyk e Klein (2012), o controle de pesagem nas rodovias consiste do envio de dados de carga de veículos supostamente ilegais, apresentando excessos acima de 5% do valor estabelecido como limite, para a área de controle de pesagem estática, localizada a poucos quilômetros de distância do equipamento WIM. Os parâmetros avaliados são velocidade de tráfego, Peso Bruto Total e comprimento do veículo. Com isso, o operador possui uma lista de possíveis infratores e o horário previsto de chegada dos mesmos ao posto de controle. O tipo de infração pode ser rapidamente identificado pelas cores que aparecem no relatório

de dados gerado: (i) vermelho para sobrecarga; (ii) amarelo para excesso de velocidade; e (iii) azul para excesso de comprimento. Na Figura 2.20 é apresentado um exemplo das informações enviadas para a área de controle de pesagem estática.

Figura 2.20 – Informações enviadas para a área de controle de pesagem (França)

Fonte: Stanczyk e Klein (2012).

Atualmente, o sistema de pesagem em movimento de baixa velocidade (LS-WIM) é o tipo mais utilizado para fiscalização. No entanto, há um grande interesse para que a fiscalização ocorra diretamente e de forma automática, no fluxo de tráfego, com o uso de sistemas de alta velocidade (HS-WIM), o que ainda não é comum devido à ausência de precisão adequada para o uso do equipamento para fiscalização da lei.

Chou (2011) elaborou um algoritmo para determinar a precisão mínima necessária e os limites ideais para utilização de sistemas HS-WIM na fiscalização de excesso de carga. Neste estudo foram elaborados três indicadores para representar o desempenho do HS-WIM, sendo eles:

- Taxa de inspeção incorreta (α): razão entre os veículos que são registrados com sobrecarga, mas na verdade estão abaixo do limite legal, sobre o número total de veículos que são registrados com sobrecarga;
- Taxa de inspeção correta (δ): razão entre os veículos que estão com peso acima do limite estabelecido com a tolerância, sobre o número total de veículos que estão realmente sobrecarregados;

- Taxa de sobrecarga mal interpretada (γ): razão entre os veículos que são registrados com sobrecarga pelo sistema WIM, mas na verdade estão abaixo do limite de peso legal, sobre o número total de veículos que apresentam valores de carga menores que o limite estabelecido por lei.

Figura 2.21 – Indicadores para representação de desempenho do HS-WIM

Fonte: Chou (2011).

A área retangular da Figura 2.21 representa os dados de pesagem para uma determinada categoria de veículo. A linha cheia separa os veículos com excesso e os veículos sem excesso e a linha tracejada representa o limite estabelecido com a tolerância. A Parte A representa os veículos com valores de PBT menores que o limite estabelecido por lei e a Parte B representa os veículos que excederam os limites legais de carga. A área preenchida compreendida por C, D e E representam o número total de veículos que foram identificados como infratores pelo Sistema WIM. Contudo, em C são indicados os veículos que na verdade estão com cargas inferiores ao limite legal, em D são indicados os veículos que apresentam pesos entre o limite legal e o limite estabelecido com a tolerância e E representa os veículos que estão com peso acima do limite estabelecido com a tolerância.

Um sistema HS-WIM com alta precisão apresenta valores de Taxa de Inspeção Incorreta (α) e Taxa de Sobrecarga Mal Interpretada (γ) baixos. Por outro lado, valores altos de Taxa de Inspeção Correta (δ) indicam um bom desempenho do sistema. Para definição de valores limites para os índices elaborados, são avaliadas as relações entre a Taxa de Inspeção Correta (δ) e a porcentagem de redução da vida útil do pavimento, a precisão do sistema, Taxa de Sobrecarga Mal Interpretada (γ) e o valor limite de sobrecarga com a tolerância, bem como entre o

valor limite de sobrecarga com a tolerância e a Taxa de Sobrecarga Mal Interpretada (γ). Ao controlar a taxa de erro máxima permissível e a percentagem de redução na vida de serviço do pavimento, pode-se determinar a precisão mínima necessária e os limites ideais para utilização dos sistemas de pesagem em movimento como equipamentos para fiscalização da lei.

Entretanto, o grande desafio está em garantir que o sistema tenha a precisão necessária para ser utilizado para fiscalização direta. Em 2014, a República Tcheca foi o primeiro país europeu a utilizar a tecnologia HS-WIM para fiscalização direta com a operação de três sistemas instalados no país. Segundo Doupal, Adameova e Kriz (2016), após anos de uso da tecnologia HS-WIM para pré-seleção é que foram emitidos os primeiros certificados para validação das medições realizadas com a balança de pesagem em movimento. Em seu trabalho, é apresentado uma breve análise estatística do teste realizado antes do início das operações para fins de fiscalização direta em uma rodovia secundária com duas faixas de rolamento. O teste durou um mês e foram verificados os desvios padrões do peso bruto total e cargas por eixo de veículos com 2 eixos rígidos, 4 eixos articulados e 5 eixos articulados para veículos cheios e com metade da carga. É importante ressaltar que veículos com possível sobrecarga, mas que não possuem todas as medições validadas, são desconsiderados.

Na Polônia, a implantação da fiscalização direta ainda está em estudo, com definição dos procedimentos para legalização e controle metrológico dos sistemas WIM, bem como especificação dos requerimentos tecnológicos. Segundo Gajda, Burnos e Sroka (2016), as principais dificuldades para definir os procedimentos são consequência das propriedades específicas do local de instalação do WIM, onde a seção do pavimento se torna um componente do sistema, e das propriedades dos sensores de carga que não podem ser calibrados de modo estático.

Na França, um projeto foi iniciado pelo Ministério do Transporte em 2014 com o objetivo viabilizar a fiscalização de sobrecarga automatizada com adaptações de sistemas WIM já existentes. Espera-se que os HS-WIM apresentem precisão de 5% para o Peso Bruto Total e 10% para a carga por eixo para 100% dos veículos. Testes estão sendo realizados, tanto em laboratórios quanto na pista experimental do *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR), localizada em Nantes. O projeto é

desafiador e requer uma série de etapas significativas para seu sucesso, tanto na evolução da tecnologia WIM, como na sua implantação, operação e certificação. Este projeto aborda principalmente questões tecnológicas e científicas, mas também aspectos metrológicos de certificação e homologação (COTTINEAU *et al.*, 2016).

No geral, é possível observar que o uso do sistema de pesagem em movimento em alta velocidade para fiscalização direta, apesar de já ser uma realidade em alguns poucos países, é um desafio e ainda requer uma série de evoluções tecnológicas, de implantação, operação e principalmente certificação desses sistemas para se difundir.

3 MONITORAMENTO DO TRÁFEGO NA RODOVIA FERNÃO DIAS

A Rodovia Fernão Dias (BR-381), com extensão total de 570 quilômetros, liga as cidades de Contagem (MG) e Guarulhos (SP). Sua relevância na rede rodoviária brasileira se justifica, principalmente, por interligar São Paulo e Belo Horizonte, duas importantes capitais da Região Sudeste do Brasil, atendendo a fluxos inter-regionais de cargas, bem como a exportações de produtos através do Porto de Santos, ou mesmo por vias internas em direção aos outros países do MERCOSUL. Na Figura 3.1 é apresentada uma vista aérea da rodovia, bem como indicação de local de instalação do Sistema WIM.

Figura 3.1 – Rodovia Fernão Dias

Fonte: www.arteris.com.br (acesso em junho de 2017).

Neste capítulo é apresentado um estudo do tráfego real da Rodovia Fernão Dias, contemplando a classificação detalhada e a quantificação dos carregamentos que solicitam um trecho experimental que vem sendo monitorado desde 2014 (ANDRADE, 2016; BESSA, 2017). Os dados analisados pertencem ao banco de dados resultante da operacionalização do sistema *Weigh-in-Motion* implantado nas duas faixas de rolamento do km 948 da rodovia, sentido sul.

3.1 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA WEIGH-IN-MOTION

O sistema *Weigh-in-Motion* instalado na Rodovia Fernão Dias é composto por duas linhas de sensores piezoelétricos de fluoreto de polivinilideno (PVDF) com 2,73

m de comprimento, dois laços indutivos para identificação de presença de veículos, registro da velocidade de tráfego e medição da distância entre eixos, dois sensores de temperatura do tipo *termocouple* PT-100 posicionados a 1,5 cm de profundidade e equipamento para coleta e análise de dados. Em cada faixa, a configuração adotada foi a L-P-L-P (Loop-Piezo-Loop-Piezo), conforme apresentado na Figura 3.2, excluindo-se o sensor de posição.

Figura 3.2 – Disposição do Sistema WIM

Fonte: Agência Nacional de Transportes Terrestres (2016).

A utilização de sistemas *Weigh-in-Motion* permite analisar de forma mais apurada as características de tráfego de uma rodovia, visto que o sistema de aquisição de dados registra continuamente os veículos que trafegam diretamente no fluxo da via, armazenando um conjunto de informações sobre suas características. O esquema de aquisição e processamento de dados está apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Aquisição e processamento de dados

Fonte: elaborada pela autora.

Após o processamento dos dados, com o objetivo de identificar informações erroneamente registradas e excluir da análise os caminhões leves e veículos de passeio, sendo os mesmos pouco danosos ao pavimento, verificações racionais foram aplicadas aos dados registrados pelo sistema WIM, ou seja, intervalos considerados aceitáveis foram especificados para diferentes variáveis, sendo esses estabelecidos, principalmente, com base na limitação física dos veículos. Para definição desses limites, foram consultados diversos catálogos e sites de montadoras. Cabe ressaltar que dados não usuais, ou em não conformidade com a legislação brasileira, não significam dados de baixa qualidade ou errôneos. Veículos com características que se enquadram em pelo menos um dos filtros descritos abaixo foram descartados.

- **PBT $\leq$ 6,2 toneladas:** valor limite tem como base o veículo semi leve mais pesado rodante. Ressalta-se que este valor representa a soma da máxima capacidade de carga do eixo dianteiro (2,2 toneladas) e o traseiro (4,0 toneladas);
- **Eixo simples $\leq$ 2,2 toneladas:** valor limite representa a carga por eixo dianteiro do veículo semi leve mais pesado adotado como veículo limite para o critério de PBT mínimo;
- **Tandem duplo $>$ 32 toneladas:** valor limite definido com base na maior capacidade técnica estabelecida pelas montadoras de caminhão;
- **Espaçamento entre eixos $\leq$ 0,92 metros:** no Brasil, os menores aros de roda para tandens em caminhões são da ordem de 22 polegadas que

somados ao pneu, resulta-se em um diâmetro final próximo a 0,87 metros. Considerando-se uma folga mínima entre pneus de 0,05 metros, tem-se como distância mínima entre eixos de rodas 0,92 metros;

- **Comprimento total > 36 metros;**
- **Comprimento total > 15,4 metros e PBT $\leq$ 10,43 toneladas:** o comprimento representa 10% a mais que o veículo de 14 metros e 10,43 toneladas é a soma do eixo de menor tara para caminhões desse porte (4,23 toneladas) e menor PBT admitido (6,2 toneladas);
- **Peso de eixo individual > 18 toneladas:** valor máximo observado dentre todos os veículos pesquisados nos catálogos das montadoras;
- **Peso total do caminhão $\neq$ 10% da soma dos pesos dos eixos:** definição do percentual de 10% com base no NCHRP 12-76 Relatório 683 (SIVAKUMAR et al., 2011);
- **Somatória da distância entre eixos > comprimento total;**
- **Comprimento total < 5 metros;**
- **Velocidade do veículo > 170 km/h;**
- **Peso do primeiro eixo > 10 toneladas;**
- **PBT > 93 toneladas:** valor estabelecido com base na capacidade técnica de um caminhão tronado mais reboque de nove eixos (romeu e julieta). O valor também se aplica ao treminhão de nove eixos e ao tritrem (caminhão tratos + três semirreboques).

Veículos descartados após as verificações citadas acima são reunidos em um único arquivo, separado do arquivo final com os dados diários válidos. Na Tabela 3.1 é apresentada a quantidade de veículos excluídos, por tipo de filtro, a partir dos dados processados de 1º de setembro de 2015 a 28 de fevereiro de 2017, período adotado para a análise dessa dissertação.

Tabela 3.1 – Número de veículos excluídos por filtro

Filtros	Quantidade de veículos excluídos
01	3.536.450
02	186.208
03	104
04	4.496
05	1.236
06	969
07	454
08	0
09	29.797
10	310
11	16
12	60
13	362
Total	3.760.462

É importante destacar que os filtros 1 e 2, relacionados aos veículos considerados leves, são responsáveis pela exclusão de mais de 70% de todos os dados.

Com relação à classificação dos veículos, a mesma é realizada segundo diretrizes apresentadas pelo DNIT (2012) no Quadro de Fabricantes de Veículos, considerando o número e a distância entre os eixos registrados. Devido a limitações do sistema, não é possível diferenciar eixos com rodas simples de eixos com rodas duplas e, portanto, para alguns veículos é atribuído um conjunto de possíveis classes. A Tabela 3.2 apresenta, de forma esquemática, o sistema de classificação implantado.

Tabela 3.2 – Sistema de classificação de veículos

Nº de eixos	Distância entre eixos (d) (m)							Classificação DNIT
	d12	d23	d34	d45	d56	d67	d78	
2	≤ 3,5	-	-	-	-	-	-	2CC ou 2BC
	> 3,5	-	-	-	-	-	-	2C ou 2CB
3	-	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	- -	- -	- -	3C, 3CD, 3DC, 3BB, 3BC ou 3CB 2S1 ou 2B1
4	1,2 < d ≤ 2,4	-	-	-	-	-	-	4DD, 4DC, 4CD, 4DB, 4CB ou 4BD
	d > 2,4	1,2 < d ≤ 2,4	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	- -	- -	4C 3S1, 3D1, 3B1, 31B ou 3BD
		d > 2,4	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	- -	- -	2S2, 2B2, 2BD ou 2DB
								2I2, 2C2, 2DL 2BI, 2BR, 2RB ou 2BB
5	1,2 < d ≤ 2,4	-	-	-	-	-	-	4D1 ou 41C
	d > 2,4	1,2 < d ≤ 2,4	-	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	- -	32D ou 3S2
			1,2 < d ≤ 2,4	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	- -	3D2, 3DD, 3DJ, 3I2, 3DL, 3C2 ou 3IB
		d > 2,4	d > 2,4	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	- -	2S3 2LD
				1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	- -	2I1, 2C3 ou 2JD
					-	-	-	2I3 ou 2N3
6	1,2 < d ≤ 2,4	-	-	-	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	4D2 ou 42C
	d > 2,4	1,2 < d ≤ 2,4	d > 2,4	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	4ID, 42D, 4I2 ou 4R2
					1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	3D3 ou 3S3
					1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	3DT ou 3LD
					1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	3DI, 33D, 3I1, 3C3 ou 3JD
					1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	3ID, 3DN, 3I3 ou 3N3
		d > 2,4	d > 2,4	x	x	-	-	2R4 ou 2D4
	x	d > 2,4	d > 2,4	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	2N4 2L4 2J4
7	1,2 < d ≤ 2,4	-	-	-	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	4D3 ou 4DT
	d > 2,4			1,2 < d ≤ 2,4	-	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	4DI, 4R3 ou 43D
		-	-	d > 2,4	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	34D, 3TD, 3D4 ou 3T4
						1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	3ND, 3N4 ou 3QD
8	1,2 < d ≤ 2,4	-	-	-	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	4D3 ou 4DT
	d > 2,4				1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	4DI, 4R3 ou 43D
						1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	34D, 3TD, 3D4 ou 3T4
							-	3ND, 3N4 ou 3QD
							-	3DQ
							-	3IJ ou 3SD
							-	3Q4
							-	44D
							-	4D4
9	1,2 < d ≤ 2,4	-	-	-	-	-	-	4R4
	d > 2,4							3V5
								3P5
								3D5
								3J5 ou 3DS
								35D
9	1,2 < d ≤ 2,4	-	-	-	-	-	-	3M5
	d > 2,4							4D5
								3D6
								3M6 ou 3Q6
9	1,2 < d ≤ 2,4	-	-	-	-	-	-	3T6 ou 3R6
	d > 2,4	-	-	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	1,2 < d ≤ 2,4 d > 2,4	- -	- -	

3.2 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA WIM

Importante etapa do projeto, a calibração do Sistema WIM deve ser executada por meio de uma metodologia consistente. De acordo com Davis (2007), vários fatores podem influenciar na relação entre os sinais gerados pelos sensores e as cargas reais, sendo eles o módulo dinâmico do pavimento, a temperatura, a velocidade de tráfego e as características dos condutores do sistema. O procedimento de calibração consiste em aferir as respostas dos sensores quando um veículo de carga, em velocidade conhecida, passa sobre eles. Fatores de calibração (FC) são determinados a partir de curvas que correlacionam a resposta linear de cada sensor à carga/eixo conhecida, sendo o FC de cada sensor a média dos fatores obtidos durante diferentes passagens do veículo teste.

O método adotado para calibração do Sistema WIM nesse estudo envolveu a passagem de um caminhão carregado com pedras britadas, com peso aproximado de 32 toneladas, nas faixas 1 e 2. As atividades executadas durante as calibrações são descritas abaixo:

- Visitas ao local;
- Verificação do funcionamento dos sensores e da instalação;
- Pesagem estática do caminhão, incluindo certificação documentada, seguindo a seguinte sequência: (1) Pesagem do eixo 1, demais eixos posicionados fora da balança; (2) Pesagem dos eixos 1 e 3, eixo 3 posicionado fora da balança; (3) Pesagem dos eixos 2 e 3, eixo 1 posicionado fora da balança; (4) Pesagem do eixo 3, demais eixos posicionados fora da balança; (5) pesagem dos eixos 3 e 2, eixo 1 posicionado fora da balança; (6) Pesagem dos eixos 2 e 1, eixo 3 posicionado fora da balança; (7) Pesagem do eixo 1, demais eixos posicionados fora da balança; (8) Cálculo dos valores de cada eixo, adotando-se um valor médio para os eixos 1 e 3 e definindo indiretamente o valor do eixo 2;
- Passagem do caminhão em diferentes velocidades operacionais e monitoramento do sistema durante as operações de calibração;
- Coleta e análise dos dados. Os fatores de calibração são calculados pela razão entre a leitura medida e o peso bruto conhecido em cada eixo;

- Aplicação dos resultados das calibrações nos dados de pesagens de veículos registrados.

Na Tabela 3.3 é apresentado um exemplo de plano de passagem do caminhão carregado, sendo importante a passagem do veículo em diferentes velocidades e horários do dia, cobrindo assim diversas temperaturas do pavimento.

Tabela 3.3 – Exemplo de plano executado de calibração do sistema

Ciclo de passagem	Nº	Faixa	Velocidade	Horário	Data
1	1	1	55	10:57:01	02/02/2016
	2	1	83	11:10:50	
	3	2	54	11:24:52	
	4	2	82	11:38:39	
2	5	1	55	11:52:38	02/02/2016
	6	1	83	12:06:23	
	7	2	54	12:19:47	
	8	2	84	12:33:09	
3	9	2	54	14:35:46	02/02/2016
	10	2	83	14:49:36	
	11	1	54	15:03:34	
	12	1	85	15:17:05	
4	13	2	56	15:33:36	02/02/2016
	14	2	69	15:47:20	
	15	1	56	16:00:57	
	16	1	83	16:15:06	
5	17	2	52	16:36:29	02/02/2016
	18	2	77	17:14:42	
	19	1	57	17:29:13	
	20	1	83	17:43:14	
6	21	2	54	17:56:29	02/02/2016
	22	2	84	18:10:11	
	23	1	56	18:24:01	
	24	1	73	18:58:16	
7	25	2	54	09:49:34	03/02/2016
	26	2	80	10:04:17	
	27	1	55	10:18:54	
	28	1	79	10:33:00	
8	29	2	55	10:46:02	03/02/2016
	30	2	84	10:59:20	
	31	1	54	11:12:52	
	32	1	84	11:27:30	
9	33	2	54	13:28:37	03/02/2016
	34	2	82	13:43:01	
	35	1	53	13:56:22	
	36	1	84	14:09:47	
10	37	2	82	14:51:23	03/02/2016
	38	1	73	14:36:51	

Foram realizadas cinco calibrações no sistema instalado na BR-381. Estas calibrações foram realizadas com o intuito de determinar os fatores de calibração e a correlação entre a temperatura do pavimento e o erro na estimativa do peso bruto total dos veículos. Estes eventos são brevemente descritos a seguir:

- Primeira calibração: ocorreu nos dias 14 e 15 de julho de 2015. As faixas de temperatura registradas variaram entre 15,6°C e 32,6°C. Os testes de calibração foram realizados de manhã e a tarde, objetivando cobrir uma gama maior de temperatura durante a estação de inverno;
- Segunda calibração: ocorreu nos dias 29 de setembro de 09 de outubro. As faixas de temperatura registradas foram entre 31,4°C e 42,7°C. Os testes foram realizados próximos ao meio dia para registro de temperaturas mais elevadas;
- Terceira calibração: ocorreu nos dias 2 e 3 de fevereiro de 2016. As faixas de temperatura registradas variaram entre 25,5°C e 46,3°C, sendo essa temperatura registrada durante o verão;
- Quarta calibração: ocorreu no dia 17 de fevereiro de 2017. As temperaturas variaram em uma faixa de valores próximos a 30°C e 40°C;
- Quinta calibração: ocorreu no dia 16 de maio de 2017. As temperaturas variaram entre valores de aproximadamente 15°C e 25°C.

O primeiro passo no tratamento dos dados gerados pela passagem do caminhão com carga e velocidades conhecidas é averiguar os erros gerados pelo sistema considerando os fatores de calibração definidos no período de instalação do sistema e validados/revisados em cada calibração. À título de exemplo, na Figura 3.4 são apresentados os valores gerados pela passagem do caminhão e os respectivos erros observados. Nota-se que nem todos os valores gerados pela passagem do caminhão encontram-se dentro do erro aceitável de 10%, no entanto, uma nova correção dos dados com base nos resultados dessas calibrações resultam em melhores resultados.

Figura 3.4: Calibrações: (a) erro PBT na faixa esquerda (17/02/17), (b) erro PBT na faixa direita (17/02/17), (c) erro PBT na faixa esquerda (16/05/17) e (d) erro PBT na faixa direita (16/05/17)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO MONITORADO

3.3.1 Identificação das categorias mais frequentes na rodovia

O conhecimento das categorias mais frequentes em uma rodovia é de grande relevância. A classificação dos veículos permite identificar características importantes para atividades como a elaboração de projetos de dimensionamento de pavimentos, quantificação do desempenho para fins de gerência da malha rodoviária, entre outras. A partir da análise de dados do sistema WIM instalado na BR-381, foi possível identificar as categorias que trafegaram pela rodovia entre 1º de setembro de 2015 e 28 de fevereiro de 2017. Do total de 47 categorias de veículos de carga adotadas no sistema de classificação implantado na etapa de processamento dos dados, 40 foram registradas no período analisado. Cabe ressaltar que os dados de fevereiro a junho de 2016 não serão apresentados, visto que durante esse período os sensores de temperatura apresentaram problemas técnicos que afetaram a qualidade dos registros. Observou-se que as 15 categorias

mais frequentes na rodovia representam 97,3% do total de veículos passantes. Na Figura 3.5 são apresentadas as figuras esquemáticas dessas categorias.

Figura 3.5 – Categorias mais frequentes na BR-381

Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 3.4 são apresentadas as quantidades de veículos registrados por categoria e mês. Uma classe adicional, que reúne os casos que não se enquadram em nenhuma das categorias definidas pelo DNIT, foi também implementada e identificada como NC (Não Classificados).

Tabela 3.4 – Quantidade de veículos registrados por categoria x mês

Categoria	set/15	out/15	nov/15	dez/15	jan/16	jul/16	ago/16	set/16	out/16	nov/16	dez/16	jan/17	fev/17	Total	%	% acum.
3C/3CD/3DC/3BB/3BC/3CB	25.836	28.696	26.425	22.778	25.831	24.489	28.676	28.567	28.416	28.322	27.090	24.120	22.892	342.138	23,9%	23,9%
2C/2CB	16.694	18.181	15.959	14.902	15.768	14.694	18.277	18.032	16.614	17.742	17.575	14.731	14.794	213.963	14,9%	38,8%
3S3/3D3	15.101	18.035	16.219	13.105	14.404	14.949	18.574	17.984	18.165	17.446	16.182	14.776	14.763	209.703	14,6%	53,4%
2S2/2B2/2BD/2DB	13.831	15.835	14.334	13.420	12.817	12.333	15.639	15.598	15.433	15.752	16.399	12.877	12.980	187.248	13,1%	66,5%
2S3	10.837	12.276	11.544	9.206	9.612	9.942	12.301	11.730	11.899	11.525	10.702	9.134	9.439	140.147	9,8%	76,3%
3D4/34D/3T4/3TD	3.901	4.766	4.337	3.285	3.863	5.131	6.594	6.003	5.625	5.213	4.699	4.100	4.322	61.839	4,3%	80,6%
3I3/3ID/3DN/3N3	3.051	3.733	3.426	2.743	3.141	3.168	3.892	3.743	3.952	3.679	3.549	3.209	3.285	44.571	3,1%	83,7%
4DD/4DC/4CD/4DB/4CB/4BD	2.652	3.126	2.858	2.415	2.543	2.933	3.515	3.353	3.501	3.422	3.200	2.664	2.485	38.667	2,7%	86,4%
3M6/3Q6	2.388	2.938	2.907	2.379	2.568	2.512	3.262	3.185	3.293	3.267	2.946	2.947	2.864	37.456	2,6%	89,0%
2I2/2C2/2DL/2BI/2BR/2RB/2BB	1.669	2.101	1.999	1.765	1.862	1.555	2.224	2.353	2.573	3.054	3.048	2.407	1.837	28.447	2,0%	91,0%
3S2/32D	1.925	2.234	2.032	1.998	1.830	1.799	2.243	2.130	2.125	2.336	2.578	1.889	2.043	27.162	1,9%	92,9%
2S1/2B1	1.638	1.988	1.726	1.530	1.741	1.796	2.218	2.217	2.226	2.404	2.579	2.164	1.919	26.146	1,8%	94,7%
3I2/3DL/3D2/3DD/3DJ/3C2/3IB	920	1.103	1.072	870	953	801	1.065	1.179	1.237	1.422	1.407	1.365	990	14.384	1,0%	95,7%
3LD/3DT	882	956	928	725	917	963	1.185	1.229	1.132	1.111	1.031	1.060	974	13.093	0,9%	96,6%
3I1/3DI/33D/3C3/3JD	652	761	722	576	685	682	870	871	856	838	811	730	709	9.763	0,7%	97,3%
3T6/3R6	489	608	538	485	528	649	782	716	791	701	671	660	624	8.242	0,6%	97,9%
NC	393	449	431	367	391	509	552	530	513	560	529	513	628	6.365	0,4%	98,3%
2LD	295	306	320	323	313	292	373	359	336	358	363	262	301	4.201	0,3%	98,6%
2I3/2N3	291	302	344	300	301	321	345	353	350	292	296	280	292	4.067	0,3%	98,9%
2R4/2D4	197	231	233	237	253	270	356	413	360	412	378	248	279	3.867	0,3%	99,2%
2CC/2BC	219	252	226	189	189	231	250	274	182	184	213	160	159	2.728	0,2%	99,3%
2N4	233	206	198	194	106	200	218	251	260	199	185	180	154	2.584	0,2%	99,5%
2H/2C3/2JD	171	227	198	171	151	161	168	164	156	179	153	119	171	2.189	0,2%	99,7%
3V5	159	195	159	144	146	77	126	117	144	120	119	111	96	1.713	0,1%	99,8%
3S1/3D1/3B1/31B/3BD	73	53	64	56	74	56	96	100	98	71	106	59	86	992	0,1%	99,9%
3P5	101	113	111	105	95	32	61	40	34	32	25	25	21	795	0,1%	99,9%
4C	53	46	42	31	32	52	50	52	45	38	35	18	28	522	0,0%	100,0%
3DQ	8	24	23	25	19	7	12	16	13	12	13	14	13	199	0,0%	100,0%
3ND/3N4/3QD	3	6	5	6	6	10	9	10	9	5	3	9	11	92	0,0%	100,0%
4DI/4R3/43D	0	8	1	5	3	6	6	8	3	1	8	12	4	65	0,0%	100,0%
4I2/4ID/4R2/42D	2	2	4	4	11	5	8	8	1	4	4	7	4	64	0,0%	100,0%
4D3/4DT	4	2	4	1	6	2	2	6	8	4	7	5	4	55	0,0%	100,0%
3Q4	0	1	0	0	0	10	10	3	1	1	0	0	2	28	0,0%	100,0%
3D5	2	0	2	1	2	1	3	5	2	1	2	3	1	25	0,0%	100,0%
3IJ/3SD	0	0	1	3	2	0	3	0	6	4	3	1	1	24	0,0%	100,0%
2J4	1	0	0	0	0	1	0	1	1	2	1	3	3	13	0,0%	100,0%
3J5/3DS	3	2	1	2	1	1	2	0	0	0	0	0	0	12	0,0%	100,0%
35D	1	0	0	0	1	0	0	1	3	0	0	1	0	7	0,0%	100,0%
41C/4D1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4	0,0%	100,0%
44D	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	4	0,0%	100,0%
42C/4D2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0,0%	100,0%

A não classificação de veículos, observada para 0,4% dos veículos registrados pelo sistema WIM durante o período analisado, pode estar relacionada com possíveis medições incoerentes resultantes, por exemplo, da interpretação de proximidade entre caminhões em fila como um único veículo, caminhões com longo espaçamento entre eixos interpretados como dois veículos, possível troca de faixa, entre outros eventos.

3.3.2 Porcentagem de veículos comerciais na rodovia e distribuição nas faixas 1 e 2

Em um projeto de pavimento, a etapa do estudo de tráfego contempla a obtenção dos parâmetros necessários para o dimensionamento da estrutura. Devido à ausência de informações precisas, muitas suposições são feitas, incluindo a porcentagem de veículos comerciais que trafegam na faixa mais solicitada, informação utilizada nas premissas de dimensionamento de pavimentos brasileiros. Com a análise dos dados do sistema WIM é possível identificar a distribuição de veículos comerciais por faixa, possibilitando a adoção de hipóteses de projeto mais próximas à realidade.

A partir da análise de dados do sistema WIM instalado na BR-381, foi possível identificar a distribuição de veículos comerciais pelas faixas 1 e 2 no período de análise. Conforme esperado, a Faixa 2 é a faixa mais solicitada, onde trafegam, em média, 85,4% dos veículos comerciais, com um desvio padrão de 2%.

3.3.3 Distribuição do volume de tráfego na BR-381

O volume de tráfego de uma rodovia, embora oscile em torno de um valor médio, varia ao longo do tempo. Essa variação pode ser observada ao longo do dia, das semanas, dos meses e até dos anos. Diferentes fatores podem ser associados a esse fenômeno, tais como período de férias, feriados, escoamento de safras, crises econômicas, entre outros.

Na Figura 3.6 são apresentados os volumes médios diários (VMD) referentes aos meses dos anos de 2014 a 2017, obtidos a partir da análise dos dados do pedágio localizado a menos de 10 km do sistema WIM. Constata-se na análise do gráfico o efeito da sazonalidade ao longo do ano, sendo os maiores volumes observados, no geral, nos meses de janeiro e julho. No entanto, ao separar os volumes médios diários de veículos leves (VMD_{VL}) dos comerciais, nota-se que o

volume médio diário comercial (VMD_c) se mantém durante os meses. A média do VMD_c durante o período analisado é de 5.463 caminhões no sentido sul da BR-381, com desvio padrão de 308 e coeficiente de variação de 5,6%.

Figura 3.6 – Volume médio diário (VDM) na pista sul nos anos de 2014 a 2017

Fonte: Praça de pedágio de Vargem/SP.

3.4 DISTRIBUIÇÃO DE CARGA POR EIXO

Para caracterização do tráfego, a partir dos dados do sistema WIM, são apresentadas nessa seção um resumo com a participação de cada categoria durante o período analisado, 1º quartil (Q1), mediana (M) e 3º quartil (Q3) das cargas por eixo (Tabela 3.5), bem como as distribuições de carga por eixo das quinze categorias mais frequentes que trafegaram na BR-381 entre 1º de setembro de 2015 e 28 de fevereiro de 2017.

Tabela 3.5 – Resumo dos dados analisados

Categoria	Part.	Eixo dianteiro (t)			ESRD (t)			ETD (t)			ETT (t)		
		Q1	M	Q3	Q1	M	Q3	Q1	M	Q3	Q1	M	Q3
3C/3CD/3DC/3BB/3BC/3CB	23,9%	3,9	4,6	5,5				7,9	11,8	14,8			
2C/2CB	14,9%	3,1	3,8	4,8	4,4	5,6	7,2						
3S3/3D3	14,6%	4,7	5,5	6,0				12,2	14,1	15,7	18,9	21,9	24,5
2S2/2B2/2BD/2DB	13,1%	4,2	4,8	5,3	4,3	5,5	6,9	6,3	7,3	9,2			
2S3	9,8%	4,5	5,1	5,7	6,8	8,2	9,5				14,2	19,5	23,1
								13,4	15,0	16,5			
3D4/34D/3T4/3TD	4,3%	5,0	5,7	6,2				13,5	15,3	16,9			
								13,2	15,1	16,7			
					7,3	8,5	9,6						
3I3/3ID/3DN/3N3	3,1%	5,1	5,7	6,2	7,3	8,7	9,8	12,6	14,5	16,1			
					6,9	8,3	9,3						
4DD/4DC/4CD/4DB/4CB/4BD*	2,7%	7,9	9,7	11,2				11,4	14,3	16,7			
3M6/3Q6	2,6%	5,2	5,7	6,2				13,5	15,1	16,7	20,6	23,1	25,4
											19,2	21,8	24,3
					5,7	6,6	7,6						
2I2/2C2/2DL/2BI/2BR/2RB/2BB	2,0%	3,9	4,4	4,9	3,2	3,9	4,9						
					3,0	3,5	4,2						
3S2/32D	1,9%	4,6	5,2	5,7				7,3	9,2	11,1			
								7,7	10,7	13,5			
2S1/2B1	1,8%	3,8	4,4	5,0	3,8	4,6	6,0						
					4,9	5,6	6,6						
3I2/3DL/3D2/3DD/3DJ/3C2/3IB	1,0%	4,8	5,3	5,8	3,9	4,7	5,8	6,2	7,2	10,1			
					3,3	3,9	5,1						
3LD/3DT	0,9%	5,0	5,6	6,1	7,3	8,5	9,7	12,7	14,5	16,2			
								14,6	16,9	19,0			
3I1/3DI/33D/3C3/3JD	0,7%	5,1	5,7	6,2	7,2	8,5	9,6	13,0	14,8	16,4			
								13,5	16,4	18,6			

* Eixo dianteiro, diferente das outras categorias, corresponde a um Eixo Duplo de Rodas Simples.

Algumas observações podem ser feitas a partir da análise da Tabela 3.5:

- Os pesos dos eixos dianteiros, no geral, possuem pouca dispersão quando comparados aos outros tipos de eixo. Isso é justificável, pois o eixo dianteiro não suporta diretamente a carga transportada, essa localizada nas carrocerias, mas sim o conjunto composto pela cabine, o motor e as rodas de tração. Pelo mesmo motivo, esses eixos usualmente não apresentam excesso de carga, fato observado por Chou (1996) em seus estudos;
- Os pesos dos eixos simples de rodas duplas são, em sua maioria, positivamente assimétricos, ou seja, apresentam a mediana mais próxima do Q1. Observa-se maior criticidade na carga transportada pelo ESRD das categorias 2S3, 3I3/3ID/3DN/3N3, 3LD/3DT e 3I1/3DI/33D/3C3/3JD, onde os eixos apresentam valores mais próximos do limite de carga (10 toneladas);

- Os pesos dos eixos tandem duplo são, em sua maioria, negativamente assimétricos, ou seja, apresentam a mediana mais próxima do Q3. Nota-se que os ETDs mais carregados correspondem ao pertencentes à categoria 3DL/3DT (3º grupo de eixos);
- Os dados observados referentes aos pesos dos eixos tandem triplo são em sua totalidade positivamente assimétricos. Destaca-se a dispersão dos pesos dos ETTs da categoria 2S3.

Na Figura 3.7 são apresentadas as distribuições de carga por tipo de eixo das categorias mais frequentes na BR-381. Optou-se por representar esses valores em histogramas para melhor visualização da forma de distribuição desses dados. Nas figuras foram ainda inseridos os limites legais e os limites legais com a tolerância, para observação dos eixos com excesso e com infração.

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo

Categoria 1º Grupo de eixo

3C/3CD/
3DC/3BB/
3BC/3CB

2º Grupo de eixo

2C/2CB

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categoria 1º Grupo de eixo **2º Grupo de eixo** **3º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categoria 1º Grupo de eixo **2º Grupo de eixo** **3º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categoria 1º Grupo de eixo **2º Grupo de eixo** **3º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categoria 1º Grupo de eixo3D4/34D/
3T4/3TD **2º Grupo de eixo** **3º Grupo de eixo** **4º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categoria 1º Grupo de eixo3I3/3ID/
3DN/3N3 **2º Grupo de eixo** **3º Grupo de eixo** **4º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categoria 5º Grupo de eixo3I3/3ID/
3DN/3N3 **1º Grupo de eixo** **2º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categorias 1º Grupo de eixo**3M6/3Q6** **2º Grupo de eixo** **3º Grupo de eixo** **4º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categorias 1º Grupo de eixo

2I2/2C2/
2DL/2BI/
2BR/2RB/
2BB

2º Grupo de eixo **3º Grupo de eixo** **4º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categorias 1º Grupo de eixo

3S2/32D

2º Grupo de eixo **3º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categorias 1º Grupo de eixo

2S1/2B1

2º Grupo de eixo **3º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categorias 1º Grupo de eixo

3I2/3DL/
3D2/3DD/
3DJ/3C2/
3IB

2º Grupo de eixo **3º Grupo de eixo** **4º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categorias 1º Grupo de eixo

3LD/3DT

2º Grupo de eixo **3º Grupo de eixo** **4º Grupo de eixo**

Figura 3.7 – Distribuição de carga por tipo de eixo (continuação)

Categorias 1º Grupo de eixo3I1/3DI/
33D/3C3/
3JD **2º Grupo de eixo** **3º Grupo de eixo** **4º Grupo de eixo**

A partir da análise dos histogramas apresentados na Figura 3.7. observa-se que os ESRS são unimodais e apresentam certa similaridade entre as categorias de veículos, com exceção da Categoria 2C/2CB, onde se observa cargas inferiores justificadas pelo menor porte do veículo. Tal similaridade é esperada, visto que o eixo dianteiro não suporta diretamente a carga transportada. No geral, os ESRD apresentaram histogramas também unimodais, mas com formas variadas entre as categorias e até mesmo dentro da própria categoria, fato que pode ser explicado pela posição do eixo no veículo. Já para os eixos em tandem, observou-se histogramas unimodais e bimodais, indicando a existência de até dois grupos mais frequentes de carga, podendo ser, por exemplo, de veículos trafegando sem carga e com carga.

3.5 ANÁLISE DO EXCESSO DE CARGA

O tráfego de veículos comerciais com excesso de carga é um problema crítico, possuindo um impacto negativo na segurança viária e nível de serviço nas rodovias, bem como afetando a vida útil dos pavimentos e pontes. Dessa forma, com o objetivo de garantir a integridade das estruturas pelo período previsto em projeto, desde a década de 60 foram estabelecidos limites de pesos e dimensões para a circulação de veículos nas vias terrestres brasileiras. De modo complementar, uma tolerância máxima foi adotada com o intuito de equalizar possíveis discrepâncias de aferição dos equipamentos de pesagem. Essa tolerância para o peso bruto total é 5% e para os eixos foi modificada algumas vezes, variando entre 5% e 10%.

Os sistemas de pesagem em movimento são uma alternativa para monitoramento das cargas reais aplicadas no pavimento, permitindo identificar a presença de veículos com excesso. Neste capítulo, a partir da análise de dados do sistema *Weigh-in-Motion* é analisado o excesso de carga praticado na Rodovia Fernão Dias, admitindo-se que os dados da balança representem os dados reais e não possuem erros de aferição (análise determinística). Adicionalmente, um método para identificação de padrões de viagem dos veículos com excesso de carga é proposto.

Devido à grande quantidade de dados, são analisadas apenas as quinze categorias mais frequentes, que representam 97,3% do total de veículos de carga que trafegaram na BR-381 entre 1º de setembro de 2015 a 28 de fevereiro de 2017.

Conforme já mencionado, devido à limitação do sistema em distinguir eixos de roda simples e roda dupla, e na impossibilidade de se fazê-la por outros meios, no caso de dúvida sobre o tipo de eixo, a carga será sempre comparada ao limite admissível do eixo com rodas duplas, adotando-se assim uma medida conservadora na análise dos excessos. Os eixos dianteiros, por outro lado, são sempre considerados como eixos simples de rodas simples, sendo essa a configuração mais comum. Cabe ressaltar também que o sistema não identifica eixos suspensos e, portanto, os eixos identificados como ESRD ou ETD podem ser na realidade ETD ou ETT, respectivamente, com 1 eixo suspenso. No entanto, nesse estudo os mesmos serão tratados como foram registrados pelo WIM, visto ser essa configuração que se encontra em contato com a superfície do pavimento e o solicita diretamente.

3.5.1 Análise do excesso de carga com base na carga máxima legal

As cargas máximas legais por eixo preconizadas pelo CONTRAN, expostas na Resolução nº 210/06 e válidas atualmente são apresentadas na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Cargas máximas legais por tipo de eixo

Fonte: Elaborada pela autora.

O limite de PBT/PBTC é obtido pela soma dos valores dos limites por eixo ou grupo de eixos. A Figura 3.9 apresenta as categorias analisadas e seus respectivos pesos máximos legais.

Figura 3.9 – PBT/PBTC dos veículos analisados

Fonte: Elaborada pela autora.

No total, 1.394.725 veículos foram analisados, sendo que 330.779 veículos apresentaram excesso no peso bruto total e eixos, ou apenas nos eixos. A categoria 3I1/3DI/33D/3C3/3JD é a mais crítica, com 62% dos veículos analisados extrapolando os limites legais, seguida pelas categorias 3LD/3DT e 3M6/3Q6, com 60% e 50% dos veículos com excesso, respectivamente. Na Figura 3.10 são apresentadas, de uma forma geral, as porcentagens de veículos com sobrecarga para as quinze categorias analisadas.

Figura 3.10 – Porcentagem de veículos com excesso por categoria

O excesso pode ser classificado em excesso apenas no(s) eixo(s) ou excesso no(s) eixo(s) e peso bruto total, o que indica que o veículo já iniciou sua viagem com sobrecarga. Na Figura 3.11 é apresentada a distribuição de veículos que apresentaram excesso apenas em um ou mais eixos ou que apresentam excesso no peso bruto total e eixos, por categoria.

Observa-se que, com exceção da categoria 4DD/4DC/4CD/4DB/4CB/4BD, o excesso normalmente está presente apenas nos eixos, o que indica uma má distribuição da carga transportada, ou que a carga se deslocou entre os eixos com o movimento do próprio veículo, pois a mesma não estava presa adequadamente.

Figura 3.11 – Excesso no(s) eixo(s) vs. Excesso no(s) eixo(s) e PBT

Figura 3.11 – Excesso no(s) eixo(s) vs. Excesso no(s) eixo(s) e PBT (continuação)

Considerando que com relação à deterioração dos pavimentos as cargas por eixo são fatores mais relevantes quando comparados ao peso bruto total, é importante analisar o excesso por tipo de eixo (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 – Porcentagem de eixos com excesso

Categoria	% eixo dianteiro com excesso	% ESRD com excesso	% ETD com excesso	% ETT com excesso
3C/3CD/3DC/3BB/3BC/3CB 342.138 veículos 684.276 eixos	15,2%		10,6%	
2C/2CB 213.963 veículos 427.926 eixos	6,0%	4,6%		
3S3/3D3 209.703 veículos 629.109 eixos	24,9%		12,0%	17,3%
2S2/2B2/2BD/2DB 187.248 veículos 561.744 eixos	6,4%	2,6%	1,3%	
2S3 140.147 veículos 420.441 eixos	15,1%	16,9%		10,8%
3D4/34D/3T4/3TD 61.839 veículos 247.356 eixos	33,3%		20,9%	
3I3/3ID/3DN/3N3 44.571 veículos 222.855 eixos	33,5%	17,7%	14,3%	
4DD/4DC/4CD/4DB/4CB/4BD 38.667 veículos 77.334 eixos	13,9%		23,1%	
3M6/3Q6 37.456 veículos 149.824 eixos	35,5%		21,3%	19,6%
2I2/2C2/2DL/2BI/2BR/2RB/2BB 28.447 veículos 113.788 eixos	3,4%	2,1%		
3S2/32D 27.162 veículos 81486 eixos	14,1%		2,6%	
2S1/2B1 26.146 veículos 78.438 eixos	2,0%	0,7%		
3I2/3DL/3D2/3DD/3DJ/3C2/3IB 14.384 veículos 57.536 eixos	15,0%	3,3%	3,5%	
3LD/3DT 13.093 veículos 52.372 eixos	31,8%	18,5%	32,3%	
3I1/3DI/33D/3C3/3JD 9.763 veículos 39.052 eixos	34,2%	18,3%	30,6%	
Total 1.394.725 veículos 3.843.537 eixos	15,8%	8,0%	12,3%	15,6%

Os maiores percentuais de eixos com sobrecarga foram os eixos simples (ESRS) com 15,8% e os eixos em tandem triplo (ETT) com 15,6% do total de eixos analisados. Os menores percentuais foram observados nos eixos simples de rodas duplas (ESRD) com 8,0% e eixos em tandem duplo (ETD) com 12,3% de eixos com sobrecarga.

Além de identificar a presença de eixos sobrecarregados, pode-se também quantificar esse excesso com base nas cargas máximas legais por tipo de eixo. Com esse objetivo, os eixos sobrecarregados foram distribuídos em nove grupos, a depender do percentual de sobrecarga: (i) inferior a 2,5%; (ii) entre 2,5 e 5%; (iii) entre 5,0 e 7,5%; (iv) entre 7,5 e 10%; (v) entre 10% e 12,5%; (vi) entre 12,5% e 15%; (vii) entre 15% e 17,5%; (viii) entre 17,5% e 20%; e (ix) maior que 20%.

Figura 3.12 – Faixas de excesso de carga por categoria (ESRS)

Figura 3.12 – Faixas de excesso de carga por categoria (ESRS) (continuação)

Figura 3.12 – Faixas de excesso de carga por categoria (ESRS) (continuação)

Figura 3.13 – Faixas de excesso de carga por categoria (ESRD)

Figura 3.13 – Faixas de excesso de carga por categoria (ESRD) (continuação)

Figura 3.14 – Faixas de excesso de carga por categoria (ETD)

Figura 3.14 – Faixas de excesso de carga por categoria (ETD) (continuação)

Figura 3.14 – Faixas de excesso de carga por categoria (ETD) (continuação)

Figura 3.15 – Faixas de excesso de carga por categoria (ETD)

A análise mostra que há excessos de carga em todos os tipos de eixos. Com relação aos eixos simples de rodas simples (ESRS) e eixos tandem triplo (ETT), a maioria dos excessos se encontram na faixa até 10%, indicando que muitos transportadores carregam seus veículos considerando a tolerância como um ganho real de sobrecarga. Verifica-se essa mesma característica para os eixos simples de rodas duplas (ESRD), com a diferença que há uma quantidade considerável de eixos que excedem mais do que 20% do limite legal de 10 toneladas. Já os eixos tandem duplo (ETD) apresentam situações críticas onde a maioria dos eixos excedem 20%

do limite legal, caso verificado nas categorias 3C/3CD/3DC/3BB/3BC/3CB, 3S2/32D, 3LD/3DT, 3I2/3DL/3D2/3DD/3DJ/3C2/3IB e 3I1/3DI/33D/3C3/3JD.

3.5.2 Análise de sensibilidade dos resultados de veículos infratores frente à variação de tolerância

A tolerância máxima adotada atualmente para cargas por eixo nas pesagens para fiscalização é a maior tolerância já adotada desde o início do controle de cargas. Sendo justificada pelos órgãos responsáveis como necessárias para compensar incertezas de medição nos equipamentos de aferição de peso, entende-se que o aumento da tolerância pode trazer danos severos ao pavimento.

Com o intuito de analisar a quantidade de eixos que estão acima da carga máxima legal permitida, mas que não são considerados infratores perante a tolerância de 10% adotada atualmente para os eixos, estudou-se os excessos de carga por eixo com base nas cargas máximas legais por eixo preconizadas pelo CONTRAN, expostas na Resolução nº 210/06, considerando os seguintes cenários: (i) sem tolerância máxima; (ii) 5% de tolerância; (iii) 7,5% de tolerância; e (iv) 10% de tolerância. Uma primeira análise pode ser feita com relação à quantidade de eixos com excesso para cada cenário, apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Quantidade de eixos com excesso

Tolerância (carga por eixo)	Quantidade de eixos com excesso	Porcentagem do total
0,0%	491.330	12,9%
5,0%	293.632	7,7%
7,5%	220.686	5,8%
10,0%	163.165	4,3%

Nota-se que durante o período de análise, 491.330 eixos excederam as cargas máximas legais por eixo (Resolução nº 210/06), o que representa o triplo de veículos registrados ao se considerar a tolerância máxima de 10%. Análise semelhante à realizada com os eixos isolados foi realizada com os veículos, resultando na Figura 3.16, onde são apresentadas as porcentagens de veículos infratores, considerando-se a tolerância de 10% para eixos e 5% para o peso bruto

total, e de veículos que excederam os limites legais, sem tolerância aplicada. Os resultados apenas enfatizam novamente que muitas transportadoras carregam seus veículos considerando a tolerância máxima permitida como um ganho de sobrecarga, e não como uma tolerância dos equipamentos de aferição de peso. Conclui-se por fim que, tendo em vista as distribuições das cargas praticadas por tipo de eixo na Rodovia Fernão Dias, torna-se interessante avaliar as consequências dos respectivos excessos de cargas na redução da vida útil do pavimento.

Figura 3.16 – Quantidade de veículos infratores e com excesso

3.5.3 Árvores de classificação e regressão para análise do excesso de carga a partir de dados do sistema WIM

Frente à quantidade de veículos que trafegam com excesso na BR-381, o controle das cargas transportadas através de pesagens se torna essencial. Atualmente, existem dois postos de pesagem veicular funcionando na rodovia analisada, sendo um localizado no km 694,460 – Pista Sul e outro no km 844,560 – Pista Norte, com funcionamento apenas em horário comercial, o que limita o conhecimento do real excesso na rodovia através desses meios. Nesses casos, a implantação do sistema *Weigh-in-Motion* se torna interessante, sendo esse capaz de

registrar as cargas por eixo e peso bruto total de todos os veículos que passam sobre os sensores instalados na faixa de rolamento.

Com os dados de tráfego registrados no sistema WIM, um método para identificação de padrões de viagem dos veículos com excesso de carga é proposto. A análise dos resultados pode ser útil para apoiar as decisões sobre o melhor uso dos recursos disponíveis, com: (i) aumento da eficiência das atividades de fiscalização através do planejamento do funcionamento dos postos de pesagem veicular com base nos horários com maior quantidade de veículos com excesso; (ii) fornecimento de informações para o dimensionamento de pavimentos e pontes; e (iii) conhecimento real sobre o tráfego solicitante.

O método baseia-se nas árvores de classificação e regressão (*Classification and Regression Tree Analysis* – CART), uma ferramenta analítica utilizada para construir modelos de previsão a partir de grandes conjuntos de dados, sendo possível identificar quais variáveis auxiliares são capazes de explicar a variabilidade da variável de resposta. Os modelos são obtidos por partição recursiva de todos os dados concentrados no nó raiz (de acordo com a variável auxiliar mais significativa) e montagem de um modelo de predição simples em cada partição (LOH, 2011). Uma clara vantagem das árvores de regressão é a possibilidade de selecionar importantes variáveis explicativas (ou características) e detectar interações entre essas. Desde que o primeiro algoritmo da árvore de regressão (ou seja, Detecção de Interação Automática - AID) foi publicado há mais de 50 anos, muitos pesquisadores propuseram novos algoritmos de classificação. Uma visão histórica concisa das ideias chave do desenvolvimento por trás dos principais algoritmos da regressão pode ser consultada em Loh (2014).

A árvore pode ser gerada com o auxílio de diferentes *softwares*, sendo obtida neste estudo a partir do pacote RPART em R (2016), um programa gratuito para computação estatística e gráficos. Os dados do WIM utilizados nesta análise contemplam as quinze categorias mais frequentes na BR-381 durante o período de 01 de setembro de 2015 a 31 de janeiro de 2016, resultando na análise de 515.424 caminhões. Sendo uma proposta de metodologia, os dados foram aplicados a apenas esses meses à título de exemplo ilustrativo.

As informações fornecidas pelo sistema WIM e utilizadas neste estudo são: (i) data e hora de passagem dos caminhões; (ii) pesos dos eixos; (iii) categoria do veículo; e (iv) peso bruto total. Com o objetivo de identificar as variáveis auxiliares relevantes que poderiam explicar a variabilidade de sobrecarga, são criadas duas variáveis de resposta binária. A primeira está relacionada à sobrecarga do caminhão (X), assumindo o valor um se o caminhão estiver sobrecarregado, caso contrário, é zero. Já a segunda variável refere-se ao excesso por eixo (Z), também assumindo o valor de um se o eixo está sobrecarregado, e zero caso contrário. Os veículos foram classificados em 15 categorias de acordo com o padrão brasileiro (DNIT, 2012), sendo essas nomeadas de A a O (Figura 3.17).

Figura 3.17 – Veículos analisados e respectivos pesos brutos totais

3C/3CD/3DC/3BB/ 3BC/3CB (A)	23 t	3D4/34D/3T4/3TD (F)	57 t	3S2/32D (K)	40 t
2C/2CB (B)	16 t	3I3/3ID/3DN/3N3 (G)	53 t	2S1/2B1 (L)	26 t
3S3/3D3 (C)	48.5 t	4DD/4DC/4CD/4DB/ 4CB/4BD (H)	29 t	3I2/3DL/3D2/3DD/3D J/3C2/3IB (M)	43 t
2S2/2B2/2BD/2DB (D)	33 t	3M6/3Q6 (I)	74 t	3LD/3DT (N)	50 t
2S3 (E)	41.5 t	2I2/2C2/2DL/2BI/ 2BR/2RB/2BB (J)	36 t	3I1/3DI/33D/3C3/ 3JD (O)	50 t

A data que o veículo passou no WIM é registrada como dia da semana (seg, ter, qua, qui, sex, sab e dom) e oito faixas horárias foram criadas, sendo elas 0h-3h, 3h-6h e assim por diante. Na Tabela 3.8 são apresentadas as variáveis auxiliares utilizadas na árvore de regressão para cada resposta binária.

Tabela 3.8 – Descrição das variáveis

Variável	Tipo	Descrição	Árvore de regressão veículos com excesso	Árvore de regressão eixos com excesso
Veículos com excesso	Resposta binária X	1 = sim, 0 = não	X	
Eixos com excesso	Resposta binária Z	1 = sim, 0 = não		X
Categoria do veículo	Variável auxiliar nominal	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O (Figura 3.17)	X	
Dia da semana	Variável auxiliar nominal	Domingo (Dom), Segunda (Seg), Terça (Ter), Quarta (Qua), Quinta (Qui), Sexta (Sex), Sábado (Sab)	X	X
Faixa horária	Variável auxiliar nominal	0h-3h, 3h-6h, 6h-9h, 9h-12h, 12h-15h, 15h-18h, 18h-21h, 21h-0h	X	X

Neste estudo foram desenvolvidas cinco árvores de regressão, sendo uma para analisar a sobrecarga dos veículos e quatro para a sobrecarga dos eixos. A Figura 3.18 ilustra o esquema de partição adotado em uma árvore de regressão e a representação esquemática adotada para apresentação dos resultados. Em cada nó final são incluídas métricas de resumo importantes do grupo. À esquerda, as métricas relacionadas à árvore de regressão dos veículos ("nó terminal X") são apresentadas como: (i) o número de caminhões classificados neste nó (N) e sua respectiva percentagem; (ii) percentagem de veículos sem sobrecarga (símbolo '0'); (iii) percentagem de veículos com excesso (símbolo '1'); (iv) número total de veículos analisados que excedem apenas os limites de peso do eixo (símbolo) e sua

respectiva percentagem; e (v) número total de veículos que excedem os limites de peso bruto total e eixos (símbolo) e respectiva percentagem. À direita, as métricas relacionadas à árvore de regressão dos eixos ("nó terminal Z") estão incluídas em cada nó final contendo: (i) o número total de eixos no grupo (N) e sua respectiva percentagem; (ii) percentagem de eixos sem sobrecarga (símbolo '0'); (iii) a percentagem de eixos com excesso (símbolo '1') e, adicionalmente, algumas estatísticas descritivas relacionadas aos pesos dos eixos sobrecarregados, sendo elas: (iv) a mediana; (v) o peso máximo (max); (vi) o primeiro quartil (Q1); (vii) o terceiro quartil (Q3); (viii) o desvio padrão (σ); (ix) o peso médio; e (x) percentagem de eixos com excesso distribuídos em cinco classes: excesso abaixo de 5% da carga legal; de 5% a 10%; de 10% a 15%; de 15% a 20% e acima de 20%.

Figura 3.18 – Representação esquemática de uma árvore de regressão

3.5.3.1 *Árvore de regressão - Veículos com excesso*

No primeiro passo, o nó 0, que é o nó raiz, é dividido em 2 nós filhos (nós 1 e 2) com base na classificação do veículo (Figura 3.19). Isso indica que a melhor variável para classificar e prever a sobrecarga é a categoria do veículo. O nó 1, no lado esquerdo da Figura 3.19, mostra os dados relacionados às classes B, D, J, L, A, K e M. Essas categorias são caminhões compactos ou de médio porte, com limites de peso variando de 16 t para 43 t. Não há eixos tandem triplo em sua composição. Em seguida, o nó 1 é novamente dividido com base na categoria do veículo, resultando nos nós 3 e 4. Os caminhões das classes B, D, J e L estão no nó 3 e as classes A, K e M estão no nó 4. As próximas partições são baseadas na hora do dia e no dia da semana. Em geral, os veículos com excesso estão concentrados no período noturno (após 21h) e no início da manhã (até às 6h) aos domingos.

O nó 2, presente no lado direito da Figura 3.19, mostra os dados relacionados às classes C, E, F, G, H, I, N e O. Estes representam os caminhões maiores, com limites de peso variando entre 29 t e 74 t. O nó 2 é dividido com base na categoria do veículo (nós 5 e 6). O nó 5 (classes C, E e H) é novamente dividido por categoria (nó 11 com categorias E e H, e nó 12 com categoria C) e o nó 6 por faixa horária. Para os nós filhos originados do nó 6, a variável dia da semana não foi considerada como relevante. Na extremidade direita da árvore, os veículos com excesso estão concentrados das 3h às 6h. O modelo final produziu 26 nós finais, nomeados nós 25 ao 50, sendo a descrição do perfil das partições finais apresentada na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Características dos grupos de veículos com excesso

Nó #	%	% excesso	% excesso eixo	Categorias	Dia da semana	Faixa horária
25	8,7	6,8	70,2	B,D,J,L	Exceto dom	9-12h 18-21h
26	9,4	8,2	40,3	B,J,L	Exceto dom	6-9h;12-18h; 21-0h
27	6,8	10,9	85,1	D	Exceto dom	6-9h;12-18h; 21-0h
28	2,2	13,3	58,4	B,D,J,L	Dom	6-0h
29	5,6	16,5	57,7	B,D,J,L	Exceto dom	0-6h
30	0,3	27,0	37,3	B,D,J,L	Dom	0-6h
31	5,9	19,4	59,7	A,K,M	Exceto dom	9-12h;15-18h
32	9,4	23,7	56,4	A,K,M	Exceto dom	6-9h;12-15h;18-21h
33	0,2	19,7	82,6	K,M	Dom	6-21h
34	1,1	30,0	57,4	A	Dom	9-12;15-21h
35	0,6	37,5	60,9	A	Dom	6-9;12-15h
36	5,3	27,7	52,4	A,K,M	Qua, qui, sex	21h-6h
37	5,6	30,9	54,9	A,K,M	Seg, ter, sab, dom	21h-6h
38	2,0	31,8	62,9	E,H	Todos os dias	9-12h
39	1,6	34,9	57,8	E,H	Qua	6-9h;12-3h
40	7,9	38,9	54,7	E,H	Exceto qua	6-9h;12-3h

Nó #	%	% excesso	% excesso eixo	Categorias	Dia da semana	Faixa horária
41	1,5	43,0	51,4	E,H	Todos os dias	3-6h
42	2,2	35,6	63,7	C	Todos os dias	9-12h
43	6,7	44,2	54,8	C	Mo, We, Th, Su	6-9h;12-3h
44	4,4	47,6	52,5	C	Ter, sex, sab	6-9h;12-3h
45	1,6	53,9	47,4	C	Todos os dias	3-6h
46	1,8	50,9	63,5	F,G,I	Todos os dias	9-12h
47	0,3	66,6	50,3	N,O	Todos os dias	9-12h
48	6,7	60,4	50,1	F,G,I	Todos os dias	6-9h;12-3h
49	1,1	67,9	43,3	F,G,I	Todos os dias	3-6h
50	1,3	71,4	42,7	N,O	Todos os dias	Exceto 9-12h

A partir da análise da Tabela 3.9, nota-se que a porcentagem de veículos com excesso de carga varia de 6,8% (nó 25) até 71,4% (nó 50). Menores porcentagens de sobrecarga são observadas para os caminhões pequenos ou de tamanho médio (nós 25 a 35), sendo que os mesmos usualmente trafegam sobrecarregados apenas aos domingos ou exceto aos domingos, a depender da categoria. Por exemplo, os elementos do nó 25 são caminhões das categorias B, D, J ou L que viajam entre as 9h-12h ou as 18h-21h, exceto aos domingos. Apenas 6,8% destes veículos apresentam excesso de carga, com 70% dos caminhões sobrecarregados excedendo apenas os limites de peso do eixo. Para as categorias de caminhões A, K e M, as porcentagens de sobrecarga estão na faixa 20 a 30%. Para as categorias

E e H, as porcentagens aumentam em torno de 35%. As porcentagens mais elevadas de sobrecarga são observadas para a categoria C (cerca de 45%), mas a maior sobrecarga é observada nas categorias F, G, I, N e O, que correspondem a 10% do volume de tráfego, estando mais de 50% desses sobrecarregados. Os caminhões do nó 50 são de classes N ou O que viajam qualquer dia da semana e em qualquer faixa horária, com exceção das 9h às 12h, estando 71,4% desses veículos sobrecarregados e com 42,7% dos veículos com excesso apenas nos eixos.

3.5.3.2 *Árvore de regressão - Eixos com excesso*

Com o objetivo de caracterização da severidade do tráfego que solicita o pavimento, árvores de regressão foram elaboradas também para os tipos de eixos mais comuns: (i) eixos simples rodas simples (ESRS); eixos simples rodas duplas (ESRD); (iii) eixos tandem duplo (ETD); e (iv) eixos tandem triplo (ETT).

O modelo de eixos simples com rodas simples (ESRS) resultou em onze nós finais, sendo eles os nós 8, 9, 12 a 20 (Figura 3.20). O nó raiz 0 é dividido em 2 nós filhos (nós 1 e 2) com base na hora do dia. O nó 1 (viagens de 9-12h e 15-0h) no lado esquerdo é dividido novamente de acordo com a faixa horária (nós 3 e 4). A árvore divide ainda os nós 3 e 4 com base no dia da semana, resultando em três nós terminais e um nó filho. O nó 2 (viagens às 3-9h e 12-15h) no lado direito separou os dados em dias úteis e fins de semana. Para os ESRS, a porcentagem de sobrecarga varia de 11,8 a 27,4%. O nó terminal 12 indica que nas segundas ou quartas-feiras, entre as 9h às 12h, 11.8% do ESRS apresentam excesso de carga. Em geral, a árvore indica uma concentração mais alta de eixos simples com rodas simples sobrecarregados aos sábados e domingos, entre as 3h e 6h (nó 20).

Figura 3.20 – Árvore de regressão – Eixos simples de rodas simples (ESRS)

O modelo de eixos simples com rodas duplas (ESRD) resultou em nove nós finais, sendo eles os nós 3, 9, 10 a 16 (Figura 3.21). A divisão do nó raiz indica que a variável mais relevante para classificar e prever a sobrecarga em eixos simples com rodas duplas é a hora do dia. O nó 1 (viagens das 9h às 0h), no lado esquerdo, é dividido de acordo com o dia da semana (nós 3 e 4). O nó 2 (viagens das 0h às 9h), no lado direito, também é dividido de acordo com o dia da semana (nós 5 e 6). A sobrecarga nos eixos simples com rodas duplas varia entre 10,8% e 23,9%. A menor

probabilidade de que os eixos simples rodas duplas apresentem excesso ocorre após às 9h, de segunda a sábado (vide nó 3, 10,8%), enquanto 23,9% do ESRD apresentam excesso de carga na faixa horária 0h e 6h, em domingos (vide nó 16).

Figura 3.21 – Árvore de regressão – Eixos simples de rodas duplas (ESRD)

A Figura 3.22 apresenta os resultados da árvore de regressão para os eixos tandem duplo (ETD). Existem nove nós finais, nomeados como nós 8, 9 a 16. Na parte esquerda da árvore existem 4 nós finais (nós 8 a 11). Pode-se notar que a probabilidade de sobrecarga do eixo tandem duplo é diferente de acordo com a hora do dia. Entre as 9h-12h, os dias críticos são terça, quinta e sexta-feira (14,9%). No entanto, entre as 15h-21h, é domingo. À direita existem 5 nós finais (nós 12 a 16). No nó 2, os dados são divididos por hora e depois pelo dia da semana. O nó do terminal 16 indica que 21,5% dos ETD trafegando entre as 0h-9h ou 21h-0h em segundas, terças ou domingos apresentam excesso de carga.

Figura 3.22 – Árvore de regressão – Eixo Tandem Duplo (ETD)

O modelo de eixos tandem triplo (ETT) resultou em 9 nós finais, nomeados como nós 8, 9 a 16 (Figura 3.23). A divisão inicial foi feita com base na hora do dia. O nó 1, no lado esquerdo, mostra os dados das 9h às 12h e das 18h às 21h. O mesmo é novamente dividido de acordo com a hora do dia, resultando nos nós 3 e 10. O nó terminal 8 indica que nas segundas, quartas, sábados e domingos, entre as

9h e às 12h, há 15,3% dos ETT com excesso de carga. No ramo direito da árvore, o nó 2 foi partido primeiramente de acordo com a hora do dia (nós 4 e 5) e depois de acordo com o dia da semana (nós 6 e 7 e nós terminais 15 e 16). Os nós 6 e 7 são novamente divididos de acordo com a hora do dia. O nó terminal 16 indica que 32,1% dos ETT estão sobrecarregados nas terças, sábados e domingos, entre as 3h às 6h.

Figura 3.23 – Árvore de regressão – Eixo Tandem Triplo (ETT)

As árvores de regressão podem ser facilmente interpretadas, pois os resultados são adequados para representação visual e também podem ser usados para identificação das variáveis mais relevantes em um grande conjunto de dados. Com base na análise das árvores obtidas a partir dos dados do sistema WIM instalado na BR-381, chegou-se nas seguintes conclusões:

- Uma análise geral do modelo de árvore de regressão de veículos com excesso mostra que há uma probabilidade de 28,9% de um caminhão na BR-381 estar sobrecarregado;
- A variável mais importante para classificar e prever a sobrecarga é o tipo de caminhão. As categorias críticas são C, E, F, G, H, I, N e O;
- A maioria dos caminhões sobrecarregados circula no final da noite ou no início da manhã;
- Os eixos tandem triplo apresentaram a maior porcentagem de sobrecarga seguida dos eixos tandem duplo;
- A variável mais significativa para classificar e prever a sobrecarga nos eixos é a hora do dia.
- Eixos trafegando nos fins de semana e no início da manhã são mais propensos a apresentarem excesso;
- Os dados do WIM podem ser utilizados na elaboração do projeto de pavimentos e para identificar o dia da semana e a hora do dia que há mais veículos trafegando com excesso de carga para planejamento de fiscalizações;
- A fim de apoiar as decisões sobre o melhor uso dos recursos disponíveis, uma análise mais detalhada pode ser feita relacionando os períodos em que os postos de pesagem veiculares estão operando e os cenários críticos observados no modelo. Espera-se que os cenários críticos (maiores excessos), coincidam com o período que as atividades de pesagem são reduzidas.

4 A INFLUÊNCIA DA SOBRECARGA NAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

A deficiência nas fiscalizações de cargas nas rodovias resulta na frequente ocorrência de sobrecarga, sendo essa prática diretamente relacionada com a degradação prematura das estruturas dos pavimentos. Observando as distribuições de cargas praticadas por tipo de eixo na Rodovia Fernão Dias apresentadas no Capítulo 3, torna-se relevante a avaliação do efeito dos excessos de cargas observados na redução da vida útil do pavimento. Para isso, inicialmente foi realizada a caracterização do tráfego a partir do sistema *Weigh-in-Motion*. Os números N obtidos foram então comparados com a degradação real observada em campo e com a degradação prevista.

É relevante citar que próximo ao sistema WIM foi construído um trecho experimental composto por quatro segmentos de aproximadamente 100 metros cada, com espessuras iguais de base, porém com variação do material, sendo eles: (i) Segmento 1: pavimento flexível com base de brita graduada simples (BGS); (ii) Segmento 2: pavimento semirrígido com base de brita graduada tratada com cimento (BGTC); (iii) Segmento 3: base composta por material asfáltico fresado estabilizado com emulsão asfáltica e; (iv) Segmento 4: base composta por material asfáltico fresado estabilizado com espuma asfáltica. A obra de construção do trecho experimental iniciou-se em 27 de novembro de 2014 e concluiu-se com a abertura ao tráfego em 13 de dezembro de 2014. Maiores detalhes sobre a caracterização dos materiais, acompanhamento da construção e dados de monitoramento do desempenho funcional e estrutural do trecho experimental são apresentados por Andrade (2017) em sua dissertação de Mestrado. Nesse estudo, é avaliado o efeito da sobrecarga apenas no segmento 1 (ilustrado na Figura 4.1), sendo esse o único trecho onde se observou a ocorrência de trincas e fissuras até a idade de 25 meses, momento em que esse segmento foi reconstruído.

Figura 4.1 – Seção esquemática do trecho experimental – Segmento 1

Fonte: Andrade (2017).

4.1 ESTIMATIVA DO NÚMERO N A PARTIR DE DADOS DO SISTEMA WIM

A partir dos dados do sistema WIM foi possível calcular o número N real que solicitou os trechos experimentais durante o período analisado. Para estabelecer esse número, foram definidos os fatores de veículo (FV) da frota registrada, sendo esses expressos em termos dos fatores de equivalência de carga (FEC) da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e do *United States Army Corps of Engineers* (USACE). As equações utilizadas são apresentadas nas tabelas 4.1 e 4.2, sendo P o peso do eixo em toneladas.

Tabela 4.1 – Cálculo do FEC segundo a AASHTO

Tipos de eixo	Equações
Simples de rodagem simples	$FEC = (P/7,77)^{4,32}$
Simples de rodagem dupla	$FEC = (P/8,17)^{4,32}$
Tandem duplo	$FEC = (P/15,08)^{4,14}$
Tandem triplo	$FEC = (P/22,95)^{4,22}$

Tabela 4.2 – Equações para cálculo do FEC segundo a USACE

Tipos de eixo	Faixas de carga (t)	Equações
	0 – 8	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
	0 – 11	$FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
	0 – 18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

A definição do tipo do eixo é realizada automaticamente na caracterização da frota analisada. Ao calcular o número N pelos dados do sistema WIM, são considerados os volumes, quantidades de passagens por tipo de eixo e cargas reais que solicitaram a rodovia durante o período analisado, visto que o sistema consegue registrar e pesar todos os eixos que passam pela via. Cabe ressaltar que foram expurgados desse cálculo todos os veículos que, por conta de alguma anomalia na aquisição dos dados, não se enquadraram em nenhuma das categorias preconizadas pelo DNIT (2012) e foram, portanto, classificados como NC (Não Classificados), esses com representatividade de apenas 0,4% do total de veículos comerciais registrados no período analisado.

Nas figuras 4.2 e 4.3 são apresentadas as contagens acumuladas do tráfego, considerando distintos cenários de carga, sendo eles: (i) tráfego real; (ii) tráfego na tolerância, onde todos os eixos que excederam a carga máxima legal foram substituídos pela carga máxima legal do referido eixo mais a tolerância de 10%; e (iii) tráfego legal, onde todos os eixos que excederam a carga máxima legal foram substituídos pelo respectivo valor máximo legal. O sistema esteve em perfeito funcionamento entre os meses de setembro de 2015 e outubro de 2017, exceto entre fevereiro e junho de 2016, quando os sensores de temperatura apresentaram problemas técnicos que afetaram a qualidade dos registros. Dessa forma, para esse período e entre dezembro de 2014 e agosto de 2015 (período em que o trecho experimental já havia sido construído) foi feita uma extrapolação dos dados do WIM.

Figura 4.2 – Número N de repetições de carga do eixo padrão acumulado (AASHTO)

Figura 4.3 – Número N de repetições de carga do eixo padrão acumulado (USACE)

Observa-se nas figuras 4.2 e 4.3 que a presença de veículos sobrecarregados resulta em diferenças consideráveis no N acumulado, sendo os mesmos

responsáveis pelo aumento das solicitações de carga em 32% (USACE) e 23% (AASHTO). Quando comparado o cenário real com o tráfego na tolerância essa diferença diminui, mas ainda é relevante, passando para 14% (USACE) e 12% (AASHTO).

A partir dos dados de tráfego registrados pelo sistema WIM, estimou-se o número N de projeto para um período de 10 anos também para os três cenários de carga, considerando-se um crescimento exponencial do tráfego anual a uma taxa de 3% (crescimento observado comparando os dados do WIM de setembro de 2016 com setembro de 2017). Os resultados são apresentados nas figuras 4.4 e 4.5

Figura 4.4 – Número N de projeto (AASHTO)

Figura 4.5 – Número N de projeto (USACE)

Cabe mencionar que, pelo fato de terem sido eliminados da análise do número N os veículos que não puderam ser classificados de acordo com o Quadro de Fabricantes de Veículos do DNIT (2012), conforme abordado no item 3.3.1, sabe-se que esse valor de N na prática é maior que o apresentado, sendo, porém, ainda relevante a análise para efeito de comparação na consideração ou não do excesso de carga.

4.2 TRECHO EXPERIMENTAL

O segmento do trecho experimental analisado nessa dissertação, conforme já mencionado, é composto por um concreto asfáltico convencional (CA) de 12 cm, base de brita graduada simples (BGS) de 25 cm e, não sendo possível determinar a composição do pavimento antigo por ausência de histórico de construção, nominou-se a última camada como remanescente, sendo a mesma mantida após verificada sua condição de baixas deflexões e por ser uma camada consolidada e sem problemas de drenagem.

Os materiais que compõem a estrutura foram caracterizados em laboratório e as propriedades elásticas lineares dos materiais são apresentadas na Tabela 4.3.

Os valores de carga por roda utilizados na análise variaram entre: (i) limites máximos legais para cada tipo de eixo; (ii) tolerância de 10%; e (ii) tolerância de 20%. As deformações observadas são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Deformação horizontal crítica para diferentes cenários de carga

Tipo de eixo	ϵ_t ($\times 10^{-04}$ cm/cm)		
	Carga máxima legal	+ 10% tolerância	+ 20% tolerância
ESRS	1,97	2,09	2,19
ESRD	2,60	2,81	3,01
ETD	2,21	2,39	2,57
ETT	2,20	2,39	2,57

Conforme esperado, o aumento da carga acarretou no aumento das deformações observadas na fibra inferior da camada asfáltica. A consideração de excessos de 10% (tolerância vigente) e 20% resultaram em valores de deformações até 17% maiores quando comparados ao cenário de carga no limite legal. O aumento da deformação horizontal com a variação da carga aplicada pode ser observado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Aumento da deformação horizontal conforme carga aplicada

Com relação ao desempenho da estrutura do trecho experimental em campo, monitorou-se a ocorrência de trincas e fissuras através do levantamento visual

detalhado segundo a norma DNIT-PRO 008/2003, conforme pode ser observado nas figuras 4.7 e 4.8. A Figura 4.9 apresenta a evolução da área trincada em função do tempo.

Figura 4.7 – Evolução da área trincada em função do número N (USACE)

Figura 4.8 – Evolução da área trincada em função do número N (AASHTO)

Figura 4.9 – Evolução da área trincada em função do tempo

Fissuras foram observadas já nos três primeiros meses de operação do trecho experimental com BGS. O percentual de área trincada manteve-se constante durante os sete meses iniciais (até julho de 2015), fato que pode ser atribuído ao período de estiagem. Com o início do período chuvoso, o percentual de área trincada aumentou de forma significativa e exponencial, atingindo o limite de 15% com pouco mais de 11 meses de idade, porcentagem a qual o pavimento está no limite de fadiga segundo critério preconizado pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e representado pela linha vermelha. Já o limite de 20% de área trincada, indicativo de comprometimento estrutural segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (representado pela linha verde), ocorreu com um pouco mais de 12 meses de idade. A ocorrência precoce de trincas neste segmento pode estar relacionada com a baixa energia de compactação empregada na obra, o que refletiu em um baixo módulo de resiliência desde a idade 0 da estrutura (ANDRADE, 2016; BESSA, 2017). Além disso, o aumento acentuado das trincas na estrutura é decorrente das distribuições de tensões de compressão e tração na camada asfáltica de pavimentos de comportamento flexível. Os resultados indicam, por fim, que o uso de base de brita graduada simples não é a indicada para as condições de tráfego da BR-381.

4.3 SIMULAÇÃO DA REDUÇÃO DA VIDA ÚTIL DE PAVIMENTOS CONSIDERANDO DISTINTOS CENÁRIOS DE CARGA

O pavimento rodoviário é uma estrutura dimensionada para resistir às tensões e deformações induzidas pelas cargas dos veículos que trafegarão sobre a camada asfáltica pelo período de projeto adotado. Com o passar do tempo, as repetidas solicitações dos veículos desenvolvem-se em patologias, sendo a deformação permanente e a fadiga os principais defeitos que ocorrem nos asfaltos brasileiros. Nesse capítulo, será abordado o efeito desse excesso de carga apenas na problemática da fadiga por meio de modelos de previsão disponíveis na literatura, cabendo reforçar que, em muitos cenários, o excesso de trincamento está diretamente relacionado ao incremento também da deformação permanente, devido à entrada da água na estrutura do pavimento.

O fenômeno de fadiga é descrito como a deterioração do material quando solicitado repetidamente por um carregamento, resultando no aparecimento de fissuras e trincas na camada de revestimento asfáltico dos pavimentos. Em estruturas bem dimensionadas, os defeitos são observados em proporções que comprometem a estrutura próximo à sua idade de projeto. No entanto, é comum defeitos surgirem precocemente, estando eles usualmente relacionados, mas não se limitando, a erros de projeto. Já os erros de projeto decorrem de diversos fatores, sendo um deles a dificuldade de prever o tráfego real que solicitará o pavimento.

Há diferentes métodos para estimativa da vida útil de fadiga de uma estrutura de pavimento, sendo apresentados alguns coeficientes de modelos de fadiga tradicionais na Tabela 4.6 referente ao revestimento de concreto asfáltico, sendo válida para esses a Equação 4.1.

$$N = k * \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^n \quad (4.1)$$

Sendo:

N : número equivalente de operações do eixo padrão acumulado para o período de projeto;

k e n : coeficientes particulares para cada tipo de mistura asfáltica, determinados a partir de regressões lineares;

ε_t : deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada asfáltica (ε_t).

Tabela 4.6 – Número N (AASHTO) em função de ε_t

Referência	K	n
Verstraeten, Veverka e Francken (1982)	$4,92 \times 10^{-14}$	4,76
Powell et al. (1984)	$1,66 \times 10^{-10}$	4,32
Thompson (1987)	$5,00 \times 10^{-6}$	3,00

Há também modelos que apresentam um maior nível de detalhamento, incluindo informações sobre, por exemplo, as propriedades dos materiais. O método empírico-mecanístico da AASHTO conhecido como *Mechanistic-empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) sugere o uso da Equação 4.2, sendo as referências de coeficientes mais utilizadas da Shell Oil (1980) e do Asphalt Institute (1982) (Tabela 4.7).

$$N = Ck_1 * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k_2} * \left(\frac{1}{E}\right)^{k_3} \quad (4.2)$$

Sendo:

N : número equivalente de operações do eixo padrão acumulado para o período de projeto;

ε_t : deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada asfáltica;

E : módulo de rigidez da mistura asfáltica em temperatura intermediária;

k_1, k_2 e k_3 : coeficientes de ajuste;

C : fator de correção, influenciado pelo volume de ligante e volume de vazios para o modelo do Asphalt Institute; e volume de ligante, espessura da camada asfáltica e índice de penetração do ligante asfáltico para o modelo da Shell Oil.

Tabela 4.7 – Coeficientes de ajuste

Referência	k_1	k_2	k_3
Asphalt Institute (1982)	$7,96 \times 10^{-2}$	3,291	0,854
Shell Oil (1980)	1,0	5,000	1,400

A partir da metodologia do Asphalt Institute, o N de fadiga para a estrutura do Segmento 1 do trecho experimental aqui utilizado foi obtido, resultando em $1,93 \times 10^6$ solicitações. Maiores detalhes sobre os parâmetros utilizados nos cálculos são apresentados por Bessa (2017) em sua tese de Doutorado. Cruzando o N obtido com a contagem acumulada do tráfego considerando diferentes cenários de carga, valores esses já apresentados na Figura 4.2, é possível verificar visualmente a redução de vida útil do pavimento em relação ao N de fadiga estimado (Figura 4.10).

Figura 4.10 – Vida útil estimada do Segmento 1 considerando diferentes cenários de carga (N AASHTO)

Uma análise semelhante pode ser realizada com o real N de fadiga observado em campo, onde sabe-se que a estrutura atingiu o limite de 20% de área trincada com $2,01 \times 10^6$ solicitações (Figura 4.11).

Figura 4.11 – Vida útil observada do Segmento 1 considerando diferentes cenários de carga (N AASHTO)

Para sintetizar o resultado da prática do excesso de carga nas rodovias, em particular na BR-381, a redução de vida útil do pavimento em meses e sua respectiva perda percentual comparada ao cenário ideal (veículos trafegando com cargas até o limite legal) é apresentada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Redução de vida útil dos pavimentos

N de fadiga	Tráfego tolerância 10%	Tráfego real
1,93x10 ⁶ (Asphalt Institute, 1982)	1,43 meses	2,97 meses
	10,2%	21,2%
2,01x10 ⁶ (real observado em campo)	1,53 meses	3,37 meses
	10,5%	23,0%

Nota-se, portanto, que a prática de excesso de carga nas rodovias penaliza o pavimento ao acelerar a degradação de sua estrutura que consequentemente sofrerá um número maior de intervenções, requerendo maiores investimentos do que planejado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Rodovia Fernão Dias desempenha uma função importante na rede rodoviária brasileira ao ligar importantes polos econômicos das regiões Sudeste e Sul do Brasil. Por conta disso, observa-se um tráfego intenso de veículos comerciais na rodovia em questão, sendo esses, mas não somente, comumente relacionados à deterioração prematura dos pavimentos asfálticos.

Dessa forma, justificado pela importância do tráfego rodoviário na degradação das estruturas asfálticas, este trabalho teve como objetivo geral avaliar a redução da vida útil do pavimento asfáltico rodoviário frente ao tráfego real que o solicita, principalmente com relação a variação de cargas e circulação de veículos com excesso.

Definiu-se, portanto, uma rotina de monitoramento detalhada das cargas transportadas na BR-381, sentido Sul, com determinação das características volumétricas, classificatórias e do espectro de cargas circulantes na rodovia a partir da análise dos dados registrados pelo sistema *Weigh-in-Motion*. Foi possível também quantificar o excesso de carga e analisá-lo com base na legislação brasileira vigente, variando-se os valores de tolerância para análise da sensibilidade dos resultados de veículos infratores frente a esse fator.

De forma geral, o estudo de tráfego realizado com a utilização do sistema WIM mostrou-se de grande importância, não apenas pelo nível de detalhe atingido com a análise dos dados, mas também no âmbito de implantação de uma tecnologia ainda pouco empregada no Brasil, mas com grande potencial. A partir da análise de dados coletados entre setembro de 2015 a fevereiro de 2017, observou-se que:

- As 15 categorias mais frequentes na rodovia representam mais que 97% do total de veículos comerciais passantes;
- A Faixa 2 é a mais solicitada, onde trafegam aproximadamente 85% dos veículos comerciais;
- O volume de tráfego da rodovia, embora oscile em torno de um valor médio, varia ao longo do tempo. Durante os meses analisados, a distribuição do volume de tráfego de veículos comerciais apresentou variações com relação ao dia da semana, observando-se também particularidades com relação às

distribuições horárias. Adicionalmente, o volume de veículos que trafegaram durante os dias de final de semana foi notoriamente menor que durante os dias úteis. Já ao analisar o volume diário médio dos veículos comerciais, notou-se que os valores se mantiveram estáveis durante os meses;

- As cargas médias observadas por categoria durante o período analisado para os eixos simples e em tandem variaram entre: (i) ESRS: 3,8 t a 9,7 t; (ii) ESRD: 3,5 t a 8,7 t; (iii) ETD: 7,2 t a 16,9 t; (iv): ETT: 19,5 t a 23,1 t. No geral, foram observadas situações com excessos muito elevados em alguns eixos;
- Os maiores percentuais de eixos com sobrecarga foram registrados nos eixos simples (ESRS) com 15,8% e os eixos em tandem triplo (ETT) com 15,6%. Eixos simples de rodas duplas (ESRD) representaram o menor percentual de eixos com sobrecarga, com 8,0%;
- Analisando quantitativamente o excesso com base nas cargas máximas legais por tipo de eixo, com relação aos eixos simples de rodas simples (ESRS) e eixos tandem triplo (ETT), a maioria dos excessos se encontram na faixa de até 10% acima da carga máxima legal, indicando que muitos transportadores carregam seus veículos considerando a tolerância como um ganho real de sobrecarga. Verifica-se essa mesma característica para os eixos simples de rodas duplas (ESRD), com a diferença que há uma quantidade considerável de eixos que excedem mais que 20% do limite legal de 10 toneladas. Já os eixos tandem duplo (ETD) apresentam situações críticas onde a maioria dos eixos excedem 20% do limite legal;
- No geral, com exceção da categoria 4DD/4DC/4CD/4DB/4CB/4BD, o excesso normalmente apresentou-se apenas nos eixos, o que indica uma má distribuição da carga transportada, ou que a carga se deslocou entre os eixos com o movimento do próprio veículo, pois a mesma não estava presa adequadamente;
- O monitoramento contínuo do tráfego durante um período de 17 meses resultou em um amplo banco de dados sobre as cargas circulantes na BR-381. Foram monitorados pelo sistema WIM um total de 1.394.725 veículos comerciais, representando cerca de 3.843.537 eixos. Dentre os veículos monitorados, 23,7% dos veículos encontrava-se com carga acima dos limites legais permitidos;

- Um total de 491.330 eixos apresentaram excesso, o que representa o triplo de veículos registrados ao se considerar a tolerância máxima adotada por lei atualmente de 10%;
- Um método para identificação de padrões de viagem dos veículos com excesso de carga foi proposto, baseado nas árvores de classificação e regressão, uma ferramenta analítica utilizada para construir modelos de previsão a partir de grandes conjuntos de dados. Os resultados obtidos podem ser utilizados, por exemplo, para otimizar as atividades de fiscalização de carga com planejamento das operações de pesagem baseado nos cenários mais críticos. Para o caso da BR-381, sugere-se priorização das atividades de fiscalização nos horários entre 12 p.m. e 3 a.m. e 6 a.m. e 9 a.m. nas segundas-feiras para as categorias 3D4/34D/3T4/3TD, 3I3/3ID/3DN/3N3 e 3M6/3Q6. Outro cenário favorável é concentrar a fiscalização nas categorias 3D4/34D/3T4/3TD, 3I3/3ID/3DN/3N3, 4DD/4DC/4CD/4DB/4CB/4BD, 3LD/3DT e 3I1/3DI/33D/3C3/3JD em qualquer horário, visto que esse grupo apresenta porcentagens de excesso acima de 60%;
- Com base no tráfego observado, foi possível verificar que a presença de veículos sobrecarregados resulta em diferenças consideráveis no N acumulado, sendo os mesmos responsáveis pelo aumento das solicitações de carga em 32% (USACE) e 23% (AASHTO). Quando comparado o cenário real com o tráfego na tolerância essa diferença diminui, mas ainda é relevante, passando para 14% (USACE) e 12% (AASHTO);
- Cruzamentos do acompanhamento real da degradação do pavimento do trecho experimental estudado com o tráfego real que solicitou a estrutura confirmam que o tráfego com excesso de carga acelera a degradação dos pavimentos em até 23%, visto que com base em modelos de vida de fadiga conhecidos, para o cenário ideal onde os eixos sobrecarregados trafegariam no limite legal, a estrutura aguentaria as solicitações por quase seis meses a mais que o cenário real (12 meses).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Desenvolvimento do Modelo de Deterioração de Pavimentos Asfálticos com Instrumentação e Sistema Weigh in Motion**. Universidade de São Paulo, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Manual de procedimentos de fiscalização em postos de pesagem veicular**. Brasília, 2014.

ALBANO, J. F. **Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ALBANO, J. F.; LINDAU, L. A. **Revisando as tecnologias para pesagem de veículos**. Revista Estradas (Porto Alegre), v. 10, p. 102–108, 2006.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO guide for design of pavement structures**. Washington, D.C., 1993.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A manual of practice**. Interim Edition. Washington, D.C., 2008.

ANDRADE, L. R. **Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado**. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ASPHALT INSTITUTE. **Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1)**, 9th edition. Research Report 82-2, 1982.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Standard specification for highway Weigh-In-Motion (WIM) systems with user requirements and test methods – E1318-09**. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2009.

AUSTROADS. **Weigh-in-Motion Technology – Report AP-R168/00**. Sydney, 2000.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BESSA, I. S. **Laboratory and field study of fatigue cracking prediction in asphalt pavements**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

BOCK, A. L. **Pesagem em movimento de cargas atuantes em rodovias e seu impacto no desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BONNAURE, F.; GRAVOIS, A.; UDRON, J. **A New Method of Predicting the Fatigue Life of Bituminous Mixes**. In Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 49, 1980.

BRASIL. **Deliberação nº 117, de 19 de dezembro de 2011**. Altera o prazo previsto no art. 17 da Resolução CONTRAN nº 258/2007, que regulamenta os arts. 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 21 dez. 2011.

BRASIL. **Lei nº 13.103, de 02 de março de 2015**. Dispõe sobre o exercício da profissão de motorista; altera a Consolidação das Leis do Trabalho CLT, aprovada pelo Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943, e as Leis nº 9.503, de 23 de setembro de 1997 Código de Trânsito Brasileiro, e nº 11.442, de 5 de janeiro de 2007 (empresas e transportadores autônomos de carga), para disciplinar a jornada de trabalho e o tempo de direção do motorista profissional. Diário Oficial da União, Brasília, 03 mar. 2015.

BRASIL. **Lei nº 7.408, de 25 de novembro de 1985**. Permite a tolerância de 5% (cinco por cento) na pesagem de carga em veículo de transporte. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, 26 nov. 1985.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 012, de 06 de fevereiro de 1998**. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres. Diário Oficial da União, Brasília, 12 fev. 1998.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 068, de 23 de setembro de 1998**. Requisitos de segurança necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC. Diário Oficial da União, Brasília, 25 set. 1998.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 102, de 31 de agosto de 1999**. Dispõe sobre a tolerância máxima de peso bruto de veículos. Diário Oficial da União, Brasília, 20 set. 1999.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 164, de 10 de setembro de 2004**. Acresce parágrafo único ao art. 1º da Resolução CONTRAN nº 68/98. Diário Oficial da União, Brasília, 15 set. 2004.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 210, de 13 de novembro de 2006**. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 22 nov. 2006.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 211, de 13 de novembro de 2006**. Requisitos necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC. Diário Oficial da União, Brasília, 22 nov. 2006.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 258, de 30 de novembro de 2007**. Regulamenta os artigos 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 06 dez. 2007.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 301, de 18 de dezembro de 2008.** Dispõe sobre a tolerância máxima de 7,5% (sete e meio por cento) de peso bruto, transferidos por eixo aos pavimentos das vias públicas para efeito de aplicação da Resolução CONTRAN nº 258/2007. Diário Oficial da União, Brasília, 22 dez. 2008.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 328, de 14 de agosto de 2009.** Altera o prazo previsto no art. 17 da Resolução CONTRAN nº 258/2007, que regulamenta os arts. 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 18 ago. 2009.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 337, de 17 de dezembro de 2009.** Altera o prazo previsto no art. 17 da Resolução CONTRAN nº 258/2007, que regulamenta os arts. 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 21 dez. 2009.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 353, de 24 de junho de 2010.** Altera o prazo previsto no art. 17 da Resolução CONTRAN nº 258/2007, que regulamenta os arts. 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 25 jun. 2009.

BRASIL. **Resolução CONTRAN nº 365, de 24 de novembro de 2010.** Altera o prazo previsto no art. 17 da Resolução CONTRAN nº 258/2007, que regulamenta os arts. 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 26 nov. 2010.

BRASIL. **Resolução nº 489, de 05 de junho de 2014.** Altera os artigos 5º e 9º da Resolução nº 258, de 30 de novembro de 2007, do Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN, que regulamenta os artigos 231 e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 06 jun. 2014.

BRASIL. **Resolução nº 526, de 29 de abril de 2015.** Referenda a Deliberação nº 142 de 17 de abril de 2015 que dispõe sobre a alteração da Resolução CONTRAN nº 211, de 13 de novembro de 2006, e da Resolução CONTRAN nº 258, de 30 de novembro de 2007 e revoga a Resolução CONTRAN nº 489 de 05 de junho de 2014. Diário Oficial da União, Brasília, 30 abr. 2015.

BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; NÚÑEZ, W. P.; BOCK, A.; VITORELLO, T.; HIRSCH, F.; CRONST, F.; CEZIMBRA, R.; TIEFENSEE, M. D., MATTA, H.A.N. **Implantação de um sistema de pesagem em movimento em alta velocidade na rodovia BR-290 / RS, Free Way, para estudo de espectro de cargas comerciais rodantes.** Revista Estradas no 18, p. 22–28, 2013.

BUCHANAN, S. **Traffic Load Spectra Development for the 2002 AASHTO Pavement Design Guide.** Mississippi Department of Transportation. Mississippi State University, 2004.

CANADÁ. **Section 55 of the Roads Act R.S.P.E.I. 1988, Cap. R-15.** Vehicle Weights and Dimensions Regulations, 11 dez. 2010.

CHAN, Y. C. **Truck overloading study in developing countries and strategies to minimize its impact.** Dissertação de mestrado, Queensland University of Technology, Queensland, 2008.

CHOU, C. **Applying the high-speed weigh-in-motion to law enforcement.** International Seminar of Weigh-in-motion, 2011.

CHOU, C. J. **Effect of overloaded heavy vehicles on pavement and bridge design.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Washington, D. C., n. 1539, p. 58–65, 1996.

CNT, SEST, SENAT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017 – Relatório Gerencial.** Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>. Acesso em: agosto 2017.

COTTINEAU, LM.; JACOB, B.; HORNYCH, P; SCHMIDT, F.; KLEIN, E. **Direct Enforcement of Overload by WIM.** In 7th International Conference on Weigh-In-Motion (ICWIM7), Foz do Iguaçu, Brazil, 7-10 November 2016.

CUNAGIN, W.; MICKLER, W.; WRIGHT, C. **Evasion of Weight-Enforcement Stations by Trucks.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1570, n. 970849, p. 181–190, 1997.

DAVIS, J. **Live-load models for design and fatigue evaluation of highway bridges.** Tese de doutorado, University of Rutgers, Department of Civil and Environmental Engineering, 2007.

DEEN, R. C.; SOUTHGATE, H. F.; MAYES, J. G. **The Effect of Truck Design on Pavement Performance.** 1980 Annual Meeting - The Association of Asphalt Paving Technologists. Kentucky Department of Transportation, 1980.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT (2016) Disponível em <http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/pesagem/piaf>. Acesso em: maio 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT (2017) Disponível em <http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cvt/audiencias-publicas/audiencias-publicas-2017/arquivos-de-eventos/ap-23-11.2017/ap-23-11-2017-leonardo-rodrigues-dnit>. Acesso em: fevereiro 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **Instrução de Serviço – Plano Nacional de Pesagem (PNP)**, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **Manual de Conservação Rodoviária.** Rio de Janeiro: Publicação IPR 710, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **Manual de Gerência de Pavimentos.** Rio de Janeiro: Publicação IPR 745, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **Quadro de fabricantes de veículos, abril 2012.** Disponível em: www.dnit.gov.br/download/rodovias/operacoes-rodoviaras/pesagem/qfv-2012-abril.pdf. Acesso em: agosto 2017.

DOUPAL, E.; ADAMEOVA, Z.; KRIZ, I. **Start of direct enforcement in the Czech Republic.** In 7th International Conference on Weigh-In-Motion (ICWIM7), Foz do Iguaçu, Brazil, 7-10 November 2016.

ESTADOS UNIDOS. **Section 127 of Title 23 - Highways, United States Code (U.S.C.).** Establishes weight limitations for vehicles operating on the Interstate System. United States Code, 07 jan. 2011.

FERNANDES JR., J. L. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos.** Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

FHWA, Federal Highway Administration. **Long Term Pavement Performance Program Protocol for Calibrating Traffic Data Collection Equipment.** U.S. Department of Transportation, Washington D.C., 1998.

FHWA, Federal Highway Administration. **Traffic Monitoring Guide.** U.S. Department of Transportation, Washington D.C., 2013.

FONTENELE, H. B. **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, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

FONTENELE, H. B.; ZANUNCIO, C. E. M.; SILVA JUNIOR, C. A. P. **O excesso de peso nos veículos rodoviários de carga e seu efeito.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 18, p. 95–103, 2011.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

GAJDA, J., BURNOS, P., SROKA, R. **Weigh-in-Motion Systems for Direct Enforcement in Poland.** In 7th International Conference on Weigh-In-Motion (ICWIM7), Foz do Iguaçu, Brazil, 7-10 November 2016.

GHOSN, M. et al. **Effects of Overweight Vehicles on New York State DOT Infrastructure.** NYS Department of Transportation. The City College of New York, 2015.

GUTIÉRREZ, J. C. H; CANALE, A. C. **Influencia de los parámetros de carga em la estabilidad direccional de um vehículo combinado.** Información Tecnológica (Impresa), v. 20(4), p. 131-136, 2009.

HALLENBECK, M.; WEINBLATT, H. NCHRP Report 509: **Equipment for collecting traffic load data.** Transportation Research Board, Washington D.C., 2004.

HANG, W.; XIE, Y.; HE, J. **Practices of using weigh-in-motion technology for truck weight regulation in China**. *Transport Policy*, v. 30, p. 143–152, 2013.

JACOB, B.; FEYPELL-DE LA BEAUMELLE, V. **Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology**. *IATSS Research*, v. 34, n. 1, p. 9–15, 2010.

JACOB, B.; LOO, H. VAN. **Weigh-in-motion for enforcement in Europe**. *International Conference on Heavy Vehicles*, p. 25–38, 2008.

KARIM, M. R.; IBRAHIM, N. I.; SAIFIZUL, A. A.; YAMANAKA, H. **Effectiveness of vehicle weight enforcement in a developing country using weigh-in-motion sorting system considering vehicle by-pass and enforcement capability**. *IATSS Research*, v. 37, n. 2, p. 124–129, 2014.

LEE, C. E.; GARNER, J. E. **Collection and Analysis of Augmented Weigh-in-Motion Data**. Texas Department of Transportation. The University of Texas at Austin, 1996.

LOH, WY. **Classification and regression trees, January 2011**. Disponível em: www.stat.wisc.edu/~loh/treeprogs/guide/wires11.pdf. Acesso em: setembro 2017.

LOH, WY. **Fifty years of Classification and Regression Trees (with discussions and rejoinder)**. In *International Statistical Review*. v.82 (3), pp. 329-370, 2014.

MAI, D.; TUROCHY, R. E.; TIMM, D. H. **Quality control of weigh-in-motion data incorporating threshold values and rational procedures**. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 36, p. 116–124, 2013.

MIMBELA, L. E. Y.; KLEIN, L. A. **Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies Used in Intelligent Transportation Systems**. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. The Vehicle Detector Clearinghouse, 2007.

NAVIN, F. P. D. **Estimating truck's critical cornering speed and factor of safety**. *Journal of Transportation Engineering*, v. 118, n. 1, p. 130-145, 1992.

NICHOLS, A. P.; CHOU, C.-S.; DAYAN, S. **Evaluation of the Percent of Overloaded Vehicles Receiving Proper Permits**. West Virginia Department of Transportation. Marshall University, 2015.

PAPAGIANNAKIS, A.; BRACHER, M.; LI, J.; JACKSON, N. **Optimization of Traffic Data Collection for Specific Pavement Design Applications**. Office of Infrastructure Research and Development. Washington State University, 2006.

PETERLINI, P. **Cargas por eixo e fatores de veículos obtidos em rodovias federais concessionadas do estado do Paraná**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

PILLAY, K.; BOSMAN, J. **Heavy Vehicle Overload Control in the City of Tshwane**. 20th South African Transport Conference, 2001.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Ed. COPIARTE. Rio de Janeiro, 2002.

POWELL, W. D.; POTTER, J. F.; MAYHEW, H. C.; NUNN, M. E. **The structural design of bituminous pavements**. TRRL Laboratory Report, Issue No. 1115, Transport and Road Research Laboratory, 1984.

R Development Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R foundation for statistical computing, 2016.

ROADDEX Network. **Effect of axle and tyre configurations on pavement durability – A prestudy**, 2014.

SADEGHI, J. M.; FATHALI, M. **Deterioration Analysis of Flexible Pavements under Overweight Vehicles**. Journal of Transportation Engineering, v. 133, n. 11, p. 625–633, 2007.

SELEZNEVA, O. I.; AYRES, M.; HALLENBECK, M.; RAMACHANDRAN, A.; SHIRAZI, H.; VON QUINTUS, H. **MEPDG Traffic Loading Defaults Derived from Traffic Pooled Fund Study**. Office of Infrastructure Research and Development. Applied Research Associates, Inc., 2016.

SIVAKUMAR, B.; M. GHOSN; F. MOSES. **NCHRP Report 683 Protocols for Collecting and Using Traffic Data in Bridge Design**. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2011.

SRIDHAR, B. K. **Characterization and Development of Axle Load Spectra to Enhance Pavement Design and Performance on the Basis of New Mechanistic-Empirical Design Guide in Louisiana**. Dissertação de mestrado. Louisiana State University, Baton Rouge, 2008.

STANCZYK, D.; KLEIN, E. **Heavy Traffic Data Collection and Detection of Overloaded HGV**. Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 48, p. 133–143, 2012.

STEPHENS, J.; QI, Y.; AL-KAISY, A.; VENEZIANO, D.; VILLWOCK-WITTE, N.; FORSYTHE, S.; MCCARTHY, D.; EWAN, L. **Montana Weigh-in-Motion (WIM) and Automatic Traffic Recorder (ATR) Strategy**. Montana Department of Transportation, Helena, 2013.

THOMPSON, M. R. **ILLI-PAVE based full-depth asphalt concrete pavement design procedure**. Proceedings, Sixth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, 1987.

TUROCHY, R. E.; TIMM, D. H.; TISDALE, S. M. **Truck Equivalency Factors, Load Spectra Modeling and Effects on Pavement Design**. Alabama Department of Transportation. Auburn University, 2005.

UNIÃO EUROPÉIA. **Council Directive 96/56/EC of 25 July 1996**. Establishes maximum authorized dimensions in national and international traffic and the

maximum authorized weights in international traffic, Official Journal n° 235, 17 set. 1996.

VERSTRAETEN, J.; VEVERKA, V.; FRANCKEN, L. **Rational and practical designs of asphalt pavements to avoid cracking and rutting.** Proceedings, Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1982.