TRANSPORTES
revistatransportes.org.br
anpet
associação nacional de pesquisa e ensino em transportes
anpet.org.br

Nível de carga de veículos comerciais em rodovias federais concedidas

Truck load on Brazilian federal toll highways

Henrique Falck Grimm[1], **Lélio Antônio Teixeira Brito**[1]

[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul – Brasil
contato: henrique.grimm@ufrgs.br, (HFG); lelio.brito@ufrgs.br, (LATB)

Recebido:
30 de setembro de 2022
Aceito para publicação:
6 de março de 2023
Publicado:
3 de maio de 2023

Editor de área:
Francisco Thiago Sacramento Aragão

Palavras-chave:
Pesagem veicular.
Excesso de carga.
Projeto de pavimentos.

Keywords:
Vehicle weighing.
Truck overload.
Pavement design.

DOI: 10.58922/transportes.v31i1.2849

RESUMO
Ainda que haja postos de pesagem veicular coletando dados de forma quase ininterrupta no Brasil, limitada é a disponibilidade de informação sobre os níveis reais de carregamento que trafegam nas rodovias do país. Quando da impossibilidade de se executarem campanhas de pesagem adequadas para o desenvolvimento de projetos ou análises de pavimentos, considerações são feitas a respeito do carregamento da frota, que nem sempre retratam adequadamente o carregamento real. Dessa forma, esta pesquisa analisou dados de pesagem de mais de 30 milhões de veículos entre 2015 e 2020 em nove postos brasileiros, instalados em rodovias federais concedidas em estados da região Sul e Sudeste, de modo a investigar e retratar os níveis de carga observados na frota rodante no país, além de eventuais particularidades intrínsecas ao transporte de cargas brasileiro, visando estabelecer métricas que orientem projetos rodoviários no país. Para isso, foram utilizadas ferramentas comuns à ciência de dados para propor um modelo de níveis de carga alinhado ao estado da prática brasileiro. O modelo proposto retornou resultados satisfatórios quando comparados aos valores reais observados, com coeficientes de determinação entre 0,95 e 0,99, e parece ser uma alternativa viável às distribuições arbitrárias de carga comumente adotadas no país.

ABSTRACT
Even though vehicle weighing stations collect data almost 24/7 in Brazil, the amount of information available on the actual load levels of the country's truck fleet is limited. When carrying out adequate weighing campaigns for pavement design or analysis is unmanageable, considerations are made regarding the loading of the fleet, which does not always adequately portray the actual truck weights. Thus, this research analyzed weighing data from more than 30 million vehicles between 2015 and 2020 over nine Brazilian sites, located along federal toll highways in the South and Southeast regions, to investigate and portray truck load levels observed in the country's fleet, as well as any particularities intrinsic to Brazilian cargo transport, to establish metrics to guide highway projects in the country. Therefore, data science tools were used to propose a load level model inline to the Brazilian state of the practice. The proposed model yielded satisfactory results when compared to the actual observed values, with determination coefficients between 0.95 and 0.99, and reveals itself as a viable alternative to the arbitrary load distributions commonly utilized in the country.

OPEN ACCESS
CC BY

1. INTRODUÇÃO

Embora o impacto do nível de carregamento – e, eventualmente, do excesso de carga – dos veículos comerciais seja amplamente aceito e discutido na literatura, grande parte dos projetos

e análises de pavimentos no Brasil é baseada apenas em contagens volumétricas e classificatórias dos veículos da frota. Tais contagens costumam dividir a frota em veículos leves, médios, pesados, entre outros; ou ainda de acordo com o número e tipo de seus eixos, mas são simplistas ao considerar as cargas transportadas. Quando são utilizadas pesagens reais, os levantamentos de campo costumam ser bastante limitados temporalmente, e podem mascarar ou amplificar efeitos de sazonalidade no transporte de cargas.

Com o intuito de fornecer subsídios para projetos de pavimentos na ausência de dados de pesagem, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) publicou, em 1988, o volume *Tabelas de Fatores de Veículos*, contendo fatores de veículos determinados com dados de 40 postos de pesagem distribuídos nas cinco regiões do Brasil, conforme apontado no *Manual de Estudos de Tráfego do DNIT* (Brasil, 2006). Apesar da menção, as tabelas não são apresentadas no manual, mas os fatores veiculares de quatro destes postos, no estado do Paraná, foram trabalhados por Peterlini (2006). O autor, ao constatar a incompatibilidade com frotas mais recentes à época, propôs novos fatores com base em dados mais recentes de sete postos de pesagem naquele estado. Entretanto, o estudo utilizou pesagens de apenas dois dias em cada um dos doze meses de 2002, totalizando apenas 24 dias de pesagem. Em estudo similar, Fontenele (2011) analisou dados de pesagem de um ano completo em um posto de pesagem na Rodovia dos Imigrantes/SP. Recentemente, Vallejo (2021) buscou incorporar uma abordagem probabilística na determinação do fator de veículo ao estudar seis anos de pesagens em uma importante rodovia federal no estado de São Paulo.

Apesar de haver estudos focados nas taxas de sobrecarga rodante e no seu impacto sobre rodovias brasileiras (Bosso et al, 2020; Brito et al, 2013; Guerson, Tani e Valente, 2022; Klamt et al, 2017; Romeiro Jr. et al, 2020; Vallejo et al, 2022), nota-se uma carência de trabalhos que discutam os níveis reais de carga da frota do país. Além disso, importantes mudanças vêm ocorrendo no cenário de controle de cargas brasileiro nos últimos anos, todas no sentido de flexibilizar e permitir maiores tolerâncias na pesagem por eixo. Potencialmente, isso é capaz de conduzir a um aumento no nível de carga dos veículos, o que tem gerado importantes discussões entre setor produtivo e aqueles responsáveis pela conservação da infraestrutura viária, sejam eles agentes reguladores, concessionárias ou departamentos públicos.

Assim, o presente estudo busca preencher a evidente lacuna no conhecimento acerca do nível de carregamento da frota comercial atual no Brasil, que vem de forma dinâmica se adequando à tecnologia dos próprios veículos e às alterações na legislação de tolerâncias na pesagem rodoviária ocorridas nas últimas décadas. Para isso, o trabalho visa expor os níveis reais de carga dos veículos observados em nove postos de pesagem veicular instalados em rodovias federais concessionadas nas regiões Sul e Sudeste do país. Ainda, à luz da prática nacional de estimativas de carga, pretende-se propor um modelo de níveis de carga capaz de orientar projetos e estudos em rodovias de características similares.

2. CONSIDERAÇÕES DE CARGA PARA PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO

Diversos métodos de dimensionamento foram desenvolvidos ao longo do tempo, dos quais a grande maioria baseia-se no conceito de um número equivalente de passagens de um eixo ou roda padrão – chamado número N ou *equivalent single-axle load (ESAL).* Para a aplicação destes métodos de dimensionamento – como é o caso do Método da *American*

Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) de 1993, ou do Método do CBR revisado pela *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) e posteriormente adaptado para o Brasil – é necessário que se conheçam ou que se estimem as distribuições de carga esperadas durante a vida útil do pavimento.

Essas distribuições podem ser resumidas de diferentes formas, a depender do nível de detalhamento exigido ou desejado para o projeto. O Guia da AASHTO de 1993, por exemplo, cita as tabelas W-4, que incluem as distribuições de carga por eixo em intervalos de 2.000 lb (907,2 kg), normalmente agrupados por classe de veículo (AASHTO, 1993).

As pesagens por intervalo de carga também podem ser resumidas na forma de histogramas, criando o conceito de *espectros de carga*. A análise detalhada desses espectros – seja na forma gráfica de histogramas ou de intervalos de carga e suas frequências – permite um melhor entendimento acerca das cargas rodantes na frota, em contraste ao procedimento que resume os comportamentos heterogêneos da frota em um único número N. Tendo isso em vista, atualmente, o *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG), por meio de seu *software* de dimensionamento – o *AASHTOWare Pavement ME Design* – exige que sejam considerados espectros de carga no seu método de dimensionamento (AASHTO, 2015).

Devido à incorporação dos espectros de carga no dimensionamento proposto pelo MEPDG, diversos estudos vêm se preocupando em analisar a distribuição das cargas sob essa perspectiva, principalmente nos Estados Unidos. Em um estudo em parceria com o Departamento de Transportes do Novo México (*New Mexico Department of Transportation – NMDOT*), Hasan, Islam e Tarefder (2016) analisaram dados de pesagem em movimento de 10 estações no estado do Novo México entre 2001 e 2015 com o intuito de desenvolver espectros de carga por eixo para a região. Macea, Márquez e Llinás (2015) propuseram a caracterização de espectros de carga através da combinação de duas distribuições log-normais e uma normal, o que apresentou boa correlação com dados reais observados na Colômbia. Haider et al (2019) estudaram sete anos de dados de pesagem em movimento (*weigh-in-motion – WIM*) para atualizar os dados de entrada para o *PavementME* no estado de Michigan, Estados Unidos. Estudo similar foi desenvolvido no estado da Geórgia com dados de 10 estações WIM entre janeiro e dezembro de 2019 (Tahaei et al., 2021). Estudos mais recentes propõem que os espectros de carga sejam ainda mais detalhados, incluindo os efeitos das cargas dinâmicas geradas pelos veículos em movimento (Rys, 2021).

Apesar do avanço das metodologias de dimensionamento para a incorporação de uma análise mais detalhada das cargas de projeto, muitos dos dimensionamentos de pavimentos atuais ainda se baseiam no conceito do número N. No Brasil, tanto o método desenvolvido por Souza (1981) quanto o novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) utilizam o número N calculado de acordo com os fatores derivados dos estudos de Brown e Ahlvin (1961) na USACE.

É fato que os métodos baseados no conceito de número N recomendam que sejam realizadas pesagens veiculares e que os dados sejam agrupados em intervalos. Entretanto, sua simplicidade permite que, na prática – normalmente sob a justificativa da dificuldade de alocação de recursos humanos, financeiros ou de tempo –, sejam adotadas premissas bastante simplificadas com relação às cargas de projeto, sem a aferição de cargas reais.

Com isso, é comum que estudos de pavimentos no Brasil utilizem percentuais de veículos cheios e vazios – ainda que o conceito de "cheio" e "vazio" seja subjetivo –,

normalmente oriundos de pesquisas de origem-destino (OD). Foi assim que, ao estimar os efeitos do excesso de cargas na durabilidade de pavimentos, Albano (2005) assumiu algumas premissas com relação ao carregamento da frota. O autor utilizou contagens que indicaram que cerca de 30% dos veículos trafegam "vazios", enquanto 70% trafegam "total ou parcialmente carregados". Da parcela carregada, o autor considerou 60% dos veículos com carga igual à carga máxima legal (CML) +7,5% e 40% com CML+10% no eixo dianteiro e CML+20% nos demais eixos.

A utilização de uma proporção entre veículos carregados e vazios também pode ser observada nos estudos de viabilidade dos novos pacotes de concessões rodoviárias, publicados pela Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT (Brasil, 2022). Para o projeto denominado Rodovias Integradas do Paraná, os Estudos de Tráfego basearam-se em pesquisas OD para determinar uma mesma distribuição de carga para todos os 6 lotes estudados: 67% dos veículos carregados e 33% vazios. Entretanto, a memória de cálculo apresentada no projeto indica que, para a determinação do número N, 70% dos veículos foram considerados na sua CML, com 30% vazios. Em outra concessão, referente ao trecho da BR-163 entre o Mato Grosso e o Pará, as memórias de cálculo do projeto indicam que as proporções de veículos cheios e vazios resultantes das pesquisas OD foram ignoradas para o cálculo do número N, que adotou uma mesma proporção para todos os veículos da frota: 25% vazios, 50% na CML e 25% com excessos de 10% acima da CML.

Quando da impossibilidade de se realizarem pesagens ou pesquisas OD para a determinação de veículos cheios e vazios, alguns órgãos propõem hipóteses de carregamento da frota. A Prefeitura de São Paulo, por exemplo, estabelece, na IP-02/2004 (São Paulo, 2004), quatro grupos pré-definidos de carga para os veículos da frota – veículos vazios (carga útil = 0 kg), veículos com 75% da CML, veículos com 100% da CML e veículos com 105% da CML – com distribuições de acordo com a classe dos veículos. O Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo (DER/SP) recomenda, na Instrução de Projeto IP-DE-P00/001 (São Paulo, 2006), que sejam realizadas campanhas de pesagem para a elaboração de projetos de pavimentação. Entretanto, na ausência de dados de pesagem, o órgão também propõe cargas e fatores veiculares pré-estabelecidos, de acordo com a classe do veículo.

Quanto às cargas mínimas utilizadas como "tara" de veículos e eixos considerados vazios, parece ainda não haver consenso entre os valores encontrados na literatura e aqueles utilizados na prática. Medina e Motta (2005) afirmam que a razão entre carga útil e peso bruto total (PBT) é, em média, igual a 2/3, ficando a tara definida em 1/3 do PBT. A partir de uma campanha de pesagens realizada na BR-101/SC em 1986, Balbo (2007) observou diferentes cargas mínimas, a depender do tipo de eixo. Esses valores são apresentados na Tabela 1, ao lado dos valores recomendados pela Prefeitura de São Paulo e daqueles adotados nos estudos de viabilidade mencionados anteriormente.

Tabela 1: Cargas mínimas por eixo estimados pela literatura e utilizados na prática como tara de veículos vazios

Tipo de eixo	IP-02/2004 (São Paulo, 2004)	Medina e Motta (2005)	Balbo (2007)	BR-163/MT-PA (Brasil, 2022)
ESRS	2,70-3,50 t	2,00 t	0,50 t	3,00 t
ESRD	3,00 t	3,33 t	1,00 t	5,00 t
ETD	4,50 t	5,66 t	4,00 t	8,50 t
ETT	8,50 t	8,50 t	5,00 t	12,80 t

A Tabela 2 apresenta um apanhado de fatores de carga encontrados na literatura consultada (Fontenele, 2011; Peterlini, 2006; São Paulo, 2004; 2006; Vallejo, 2021). Em especial para os fatores de Peterlini (2006), os valores apresentados são os valores médios dentre as sete balanças estudadas pelo autor. Também são apresentados, para referência, os fatores calculados considerando 70% dos veículos na CML e 30% vazios (70c-30v) – considerando como tara as cargas apresentadas por Balbo (2007) – e 80% na CML, 20% vazios (80c-20v). Em grande parte dos casos, os valores reais observados por Peterlini (2006), Fontenele (2011) e Vallejo (2021) são menores ou similares àqueles calculados de acordo com o DER/SP, Prefeitura de São Paulo ou com as considerações 70c-30v e 80c-20v, com os quatro últimos se mostrando bastante semelhantes entre si. Entretanto, para alguns dos veículos mais pesados, os valores reais estimados pelos autores superaram os fatores calculados a partir das premissas de carga.

Tabela 2: Fatores de carga USACE por veículo encontrados na literatura e calculados por considerações de carga

Classe	Peterlini (2006)	Fontenele (2011)	Vallejo (2021)	Vallejo (2021)	DER/SP	Prefeitura São Paulo	70c-30v	80c-20v
	Médio		Pré-2014	Pós-2014				
2C	0,80	0,63	0,40	1,00	2,78	2,60	2,50	2,85
3C	6,06	4,59	4,67	6,01	5,44	6,56	6,18	7,07
2S1	1,88	1,12	-	-	4,09	-	4,80	5,49
2S2	3,78	1,79	3,89	6,36	8,70	-	8,49	9,70
2S3	15,43	10,29	7,58	10,48	10,27	10,47	9,01	10,30
3S3	12,63	12,91	18,06	23,37	9,42	14,04	12,70	14,51
3D4	18,75	24,57	57,36	73,38	17,28	-	18,16	20,75
2CB	-	-	-	-	2,81	0,69	2,50	2,85

3. DADOS UTILIZADOS

Para atingir os objetivos propostos pelo presente estudo, os dados utilizados deveriam abranger, idealmente, diferentes rodovias e regiões do país, expondo a heterogeneidade da frota e das cargas transportadas. Infelizmente, apesar da grande rede de postos de pesagem existente no Brasil, a disponibilidade de tais dados ainda é bastante restrita no país. Com isso, os dados utilizados nessa pesquisa se limitaram a duas fontes principais: (i) dados disponibilizados pela ANTT para o desenvolvimento de um estudo[1] realizado pelo Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV/UFRGS) para a concessionária Ecoponte, do grupo Ecorodovias, com apoio de recursos de desenvolvimento tecnológico (RDT) e sob supervisão e orientação da ANTT; (ii) dados cordialmente cedidos pela concessionária Concebra, do grupo Triunfo, para desenvolvimento de estudos de carga. Ao todo, nove postos de pesagens tiveram seus dados analisados, abrangendo quatro estados das regiões Sul e Sudeste do país, cujas informações são detalhadas na Tabela 3.

[1]Pesquisa RDT intitulada "Definição de uma metodologia para avaliar os impactos do aumento da tolerância nas cargas por eixo nos custos de manutenção de pavimentos de rodovias concedidas".

Tabela 3: Postos de pesagem analisados

Posto de Pesagem	Rodovia	UF	km	Sentido	Data Início	Data Fim	Período [dias]	Veículos
Araxá	BR-262	MG	673	leste	18/09/2015	08/03/2020	1.633	765.418
Comendador Gomes	BR-153	MG	175	norte	16/07/2015	06/03/2020	1.695	383.579
Magé	BR-116	RJ	131	sul	02/01/2015	31/08/2018	1.337	3.341.006
Paracambi	BR-116	RJ	217,5	sul	01/01/2015	31/08/2018	1.338	5.289.718
Resende	BR-116	RJ	301	sul	01/01/2015	30/08/2018	1.337	6.997.942
Queluz	BR-116	SP	1	norte	01/01/2013	31/08/2018	2.068	9.613.233
Guararema	BR-116	SP	179,4	sul	01/01/2015	26/09/2018	1.364	5.477.880
Retiro	BR-116	RS	509	norte	07/04/2018	27/11/2018	234	252.396
Capão Seco	BR-392	RS	48	sudeste	21/02/2018	31/10/2018	252	594.701
Total							**11.258**	**32.715.873**

Deve-se destacar que todas as balanças utilizadas estão instaladas em postos de pesagem veicular (PPV) que atuam na fiscalização de cargas de importantes rodovias federais concedidas do país. Com isso, pode-se argumentar que as pesagens observadas tenderiam a não superar os valores máximos legais e que as amostras estudadas seriam enviesadas pela atuação da fiscalização. Entretanto, é necessário pontuar que os dados foram coletados de forma contínua nessas balanças, 24 h por dia, sete dias por semana, salvo eventuais falhas nos equipamentos. Assim, as análises incluem também veículos que trafegavam em períodos sem fiscalização atuante – normalmente à noite ou aos fins de semana –, o que tende a mitigar parcialmente o enviesamento da amostra estudada. Porém, vale ressaltar que a extrapolação dos resultados ora obtidos para outras rodovias deve ser feita com cautela.

Ao todo, os nove postos abrangem mais de 30 milhões de veículos aferidos, com cerca de 100 milhões de pesagens por eixo e outros 300 milhões de metadados a serem processados. Para tamanho volume de informações, ferramentas comuns para armazenamento e análise de dados – como o *Microsoft Excel*, por exemplo – se tornam inviáveis de serem utilizadas pela limitação de espaço e poder de processamento. Com isso, criou-se um banco de dados unificado utilizando uma Linguagem de Consulta Estruturada (ou *Structured Query Language* – *SQL*), com o uso da linguagem *Python* para o processamento e análise dos dados.

4. MODELO DE NÍVEIS DE CARGA PROPOSTO

Embora novas metodologias de dimensionamento de pavimentos recomendem o uso de espectros de carga para caracterização da frota, a prática brasileira ainda está fortemente baseada no conceito de um número N. Não raro, são assumidas hipóteses bastante genéricas sobre as cargas rodantes, com pouco ou nenhum embasamento teórico que as justifiquem, evidenciado nos exemplos da seção 2. Além disso, ainda que se avaliem as cargas detalhadamente na forma de espectros, não há ferramentas calibradas para o cenário brasileiro que permitam o seu uso em análises de pavimento – em contraste ao cenário norte-americano e a aplicação do *AASHTOWare PavementME*, por exemplo.

Ciente das limitações brasileiras, este estudo se propôs a determinar níveis de carga que pudessem ser incorporados nos métodos atualmente em prática no Brasil, mas a partir de hipóteses mais robustas e formuladas com base em dados reais de pesagens. Assim, métricas estatísticas dos dados de pesagem foram utilizadas como delimitadoras de três grupos de carregamento para cada tipo de eixo, conforme ilustrado na Figura 1, sendo:

a) *eixos descarregados* – eixos com carga entre a mínima observada e a carga mediana;

b) *eixos carregados* – eixos com carga entre a carga mediana e a CML;

c) *eixos sobrecarregados* – eixos com carga entre a CML a carga máxima observada.

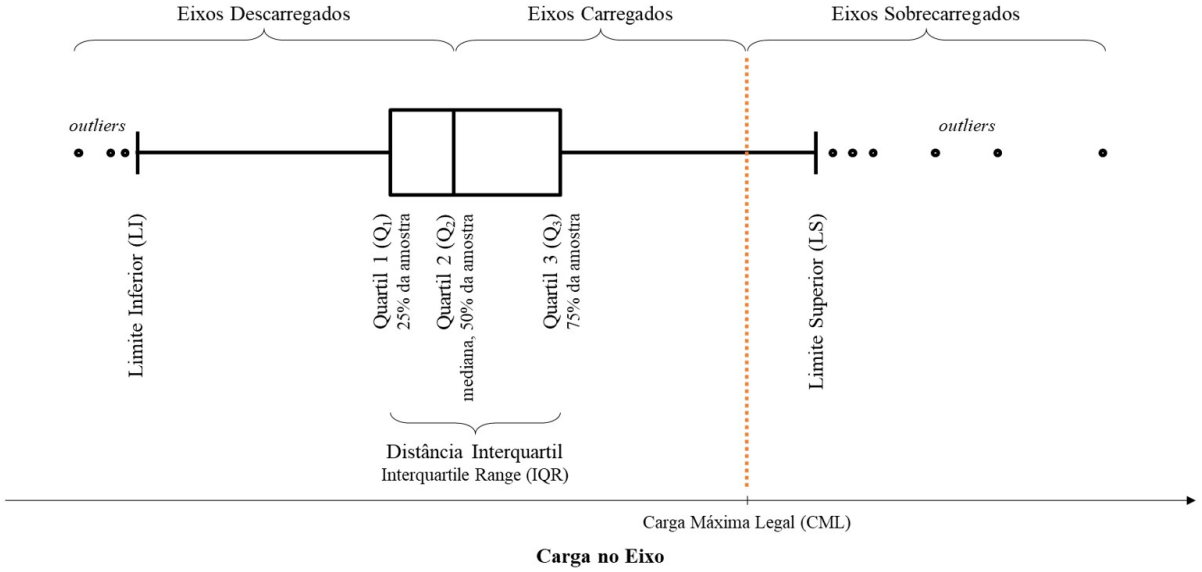


Figura 1. Grupos de carregamento propostos com base em métricas estatísticas

Aqui, adotou-se a nomenclatura "descarregados" em lugar do habitual "vazios", entendendo que viagens de veículos totalmente vazios seja um extremo bastante incomum em qualquer frota comercial. Uma vez determinados os grupos de carregamento e suas respectivas fronteiras, foi possível extrair, a partir dos dados de pesagem, o percentual de eixos considerados descarregados, carregados e sobrecarregados.

Na tentativa de detectar leituras estranhamente incomuns na amostra estudada (i.e. *outliers*, "pontos fora da curva"), três abordagens foram utilizadas. A primeira, comum na geração de gráficos de caixa (*boxplots*) como o da Figura 1, baseia-se na distância interquartil (ou *interquartile range – IQR*). O método utiliza a distância entre o primeiro quartil, Q_1, e o terceiro quartil, Q_3, multiplicada por algum fator – neste caso, $1{,}5 \cdot IQR$. O multiplicador de 1,5 é comumente utilizado por resultar em limites inferior, *LI* e superior, *LS*, tais que abranjam aproximadamente 99% de uma distribuição normal. Assim, os limites inferior e superior para a detecção de *outliers* seriam determinados pelas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$LI = Q_1 - 1{,}5 \cdot IQR = Q_1 - 1{,}5 \cdot (Q_3 - Q_1) \quad (1)$$

$$LS = Q_3 + 1{,}5 \cdot IQR = Q_3 + 1{,}5 \cdot (Q_3 - Q_1) \quad (2)$$

A segunda abordagem utilizada, frequentemente adotada na determinação de intervalos de aceitação e conceitualmente similar à anterior, baseia-se nos parâmetros de média, μ, e desvio padrão, σ. De forma análoga à anterior, os limites são estabelecidos a partir de um múltiplo de σ, comumente adotado como z = 3 por resultar em limites que abrangem 99,73% de uma amostra de uma distribuição normal. Nessa abordagem, resultados fora do intervalo $\mu \pm z \cdot \sigma$ são tomados como *outliers*.

Nota-se que ambas as abordagens citadas são formuladas em torno de uma distribuição normal, simétrica, que não necessariamente é o caso dos espectros de carga. Para contornar essa limitação, uma terceira abordagem foi explorada, baseada em técnicas de aprendizado não-supervisionado de máquina (ou *unsupervised machine learning*). O algoritmo utilizado foi o proposto por Breunig et al (2000), baseado no conceito de vizinhos mais próximos (ou *nearest neighbors – NN*), e consiste em atribuir um grau de anomalia – chamado *local outlier fator (LOF)* – para cada ponto, em comparação aos seus *n* vizinhos mais próximos (assumido como $n = 40$), tomando por base a distância euclidiana entre os pontos avaliados.

Assumindo uma natureza de quarta potência do dano em função das cargas, convencionou-se, neste estudo, o centro geométrico de uma função do tipo $f(x) = x^4$ como representativo das cargas de cada intervalo delimitado, conforme ilustrado na Figura 2. Dividindo-se a área sob a curva de $f(x)$ entre os limites inferior, x_i, e superior, x_s, em faixas de largura infinitesimal e altura $f(x) = x^4$, o centro geométrico, x_c, de cada intervalo pode ser deduzido a partir da média dos centros de cada faixa infinitesimal ponderada pela sua área, resultando na Equação 3.

$$x_c = \frac{5}{6} \cdot \frac{{x_s}^6 - {x_i}^6}{{x_s}^5 - {x_i}^5} \tag{3}$$

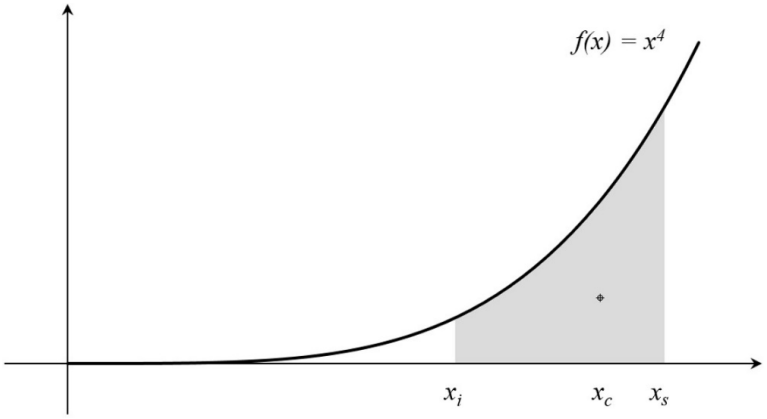


Figura 2. Centro geométrico da área sob uma curva de quarta potência

Aplicando essa premissa, foram calculados os centros geométricos, x_c, dos grupos *descarregados* e *carregados*, considerando como limites inferior, x_i, e superior, x_s, as fronteiras delimitadas na Figura 1, baseadas nas métricas estatísticas de cada tipo de eixo – eixo simples de rodas simples (ESRS), duplo direcional (EDD), simples de rodas duplas (ESRD), tandem duplo (ETD) e tandem triplo (ETT). Por ser observado em apenas uma das balanças analisadas, o eixo misto (EM) não foi incluído nessa etapa do estudo.

Para o caso específico do grupo de *eixos sobrecarregados*, a adoção da premissa do centro geométrico da curva de quarta potência entre a fronteira inferior do grupo (CML) e sua fronteira superior (carga máxima observada) resultou em valores atípicos de carga, principalmente se considerado que esse extremo se encontra na cauda superior da distribuição, com sobrecargas muito elevadas sendo muito mais raras que cargas próximas da CML. Assim sendo, foi adotado como carga representativa dos *eixos sobrecarregados* o valor de 1,10·CML, correspondente a tolerância por eixo de 10% acima da CML vigente até 2021. Esse valor foi determinado por meio de tentativa e erro, buscando minimizar as

diferenças entre os fatores de veículo médios da frota comercial (FVc) calculados de acordo com as considerações ora propostas e os FVc "reais", calculados eixo a eixo a partir dos dados de pesagem, utilizando as equações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para o método AASHTO e USACE.

5. RESULTADOS

Embora os excessos de carga sejam um ponto de atenção, é necessário observar que, na maioria dos casos, excessos não são regra, mas sim exceção. Portanto, uma avaliação adequada das cargas de projeto deve levar em conta toda a gama de veículos da frota, sejam eles carregados ou descarregados. Para isso, foram construídos histogramas dos espectros reais de carga observados em cada uma das balanças. Na tentativa de apresentar um panorama geral e comparativo entre os pontos de pesagem estudados, a Figura 3 resume os espectros de carga para o peso bruto total. Em todos os casos, as cargas são normalizadas pela sua CML, com excessos de carga traduzidos por valores acima da unidade. Os limites legais (PBT/PBT_{limite} = 1,0) e a tolerância de 5% no PBT são representados em linhas verticais.

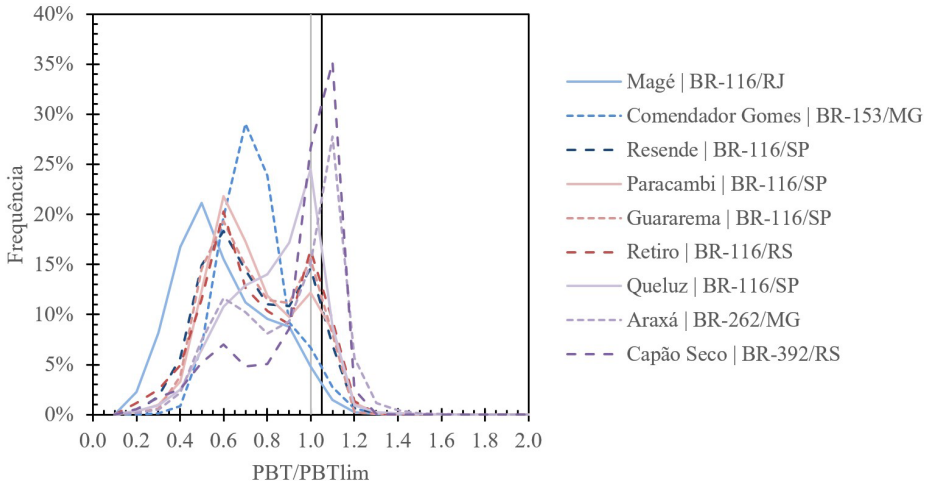


Figura 3. Espectros de carga por peso bruto total nos pontos estudados

Com base nos espectros de carga apresentados na Figura 3, é possível observar que os veículos pesados nas balanças de Capão Seco e Araxá tendem a utilizar mais da carga útil disponível – e até mesmo a apresentar maiores percentuais de sobrecarga –, enquanto a grande maioria dos veículos comerciais observados em Magé, no outro extremo, trafegam com apenas metade da carga máxima. As demais balanças apresentam um equilíbrio entre veículos carregados e descarregados, com Resende, Paracambi, Guararema e Retiro pendendo um pouco mais para o lado descarregado do espectro e Queluz tendendo mais para o lado carregado. Chama atenção, ainda, a balança de Comendador Gomes, que apresenta um comportamento bastante descolado das demais.

Para comparação com os valores obtidos na literatura, foram calculados os fatores de veículo para as classes apresentadas na Tabela 2. Os resultados médios encontrados em cada uma das balanças estudadas são apresentados na Tabela 4, e um comparativo na forma gráfica por ser encontrado na Figura 4. Os valores encontrados mostram concordância com aqueles apresentados por Peterlini (2006), Fontenele (2011) e Vallejo (2021), também calculados com base em dados reais de pesagem. Para veículos de até quatro eixos – os mais

comuns na maioria das frotas brasileiras –, os valores encontrados pelos demais autores estão entre os máximos e mínimos observados neste estudo ou muito próximo a este intervalo. Por outro lado, os fatores recomendados pelos órgãos paulistas ou aqueles obtidos pelas considerações genéricas do tipo 70c-30v ou 80c-20v para estes veículos superaram os valores observados tanto neste estudo como aqueles encontrados na literatura.

Já para os veículos com cinco ou mais eixos, os fatores calculados com cargas genéricas subestimam a maioria dos fatores encontrados na literatura, ficando próximo à mediana dos valores observados neste estudo. Nesta análise, chama atenção os fatores calculados por Vallejo (2021) para caminhões do tipo 3D4, quase duas vezes o maior fator observado neste estudo.

De acordo com o método proposto na seção 4, as métricas estatísticas das pesagens foram utilizadas para dividir a frota em três grupos de eixos – descarregados, carregados e sobrecarregados –, delimitados pela carga mínima, mediana, CML e carga máxima de cada tipo de eixo. Entendendo que as cargas máximas e mínimas absolutas encontradas no banco são extremos não usuais – tais como eixos simples com carga de 50 kg ou de 65.000 kg –, foram propostos três balizadores superiores e inferiores, baseados na distância interquartil (IQR), na média e desvio padrão (μ, σ) e nos vizinhos mais próximos (*nearest neighbors* – *NN*). Os limites foram calculados para cada tipo de eixo e balança estudada, e os valores médios ponderados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4: Fatores veiculares USACE médios por classe de veículo calculados com dados de pesagem

Classe	Retiro	Magé	Queluz	Capão Seco	Comendador	Araxá	Guararema	Resende	Paracambi
2C	0,92	0,39	0,80	0,91	0,50	1,61	1,22	1,02	1,23
3C	3,07	1,92	5,14	3,46	1,65	8,47	3,05	3,79	4,31
2S1	1,43	0,54	1,68	1,46	0,96	2,37	1,11	0,97	1,29
2S2	1,46	1,01	4,65	1,67	1,51	5,13	1,66	2,30	2,16
2S3	7,48	4,07	6,68	10,99	2,55	13,25	7,82	8,42	7,96
3S3	14,64	7,25	13,27	18,06	5,34	22,15	13,44	14,22	13,48
3D4	23,39	11,33	23,08	27,75	8,86	38,18	19,32	18,41	17,15

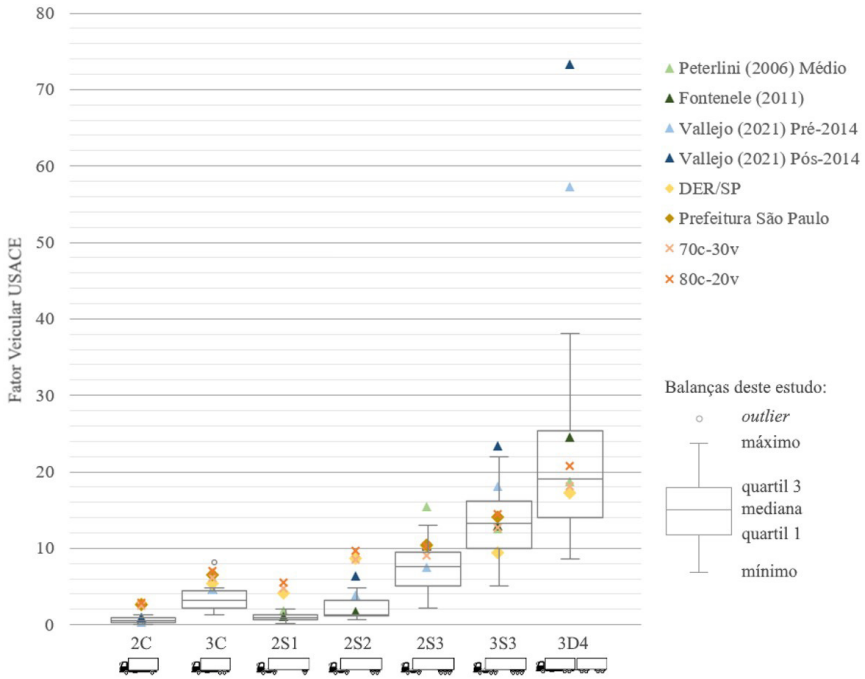


Figura 4. Comparativo entre os fatores veiculares da Tabela 2 e aqueles observados neste estudo

Tabela 5: Cargas mínimas e máximas médias esperadas por tipo de eixo

Eixo	Limite inferior [kg]			Limite superior [kg]		
	Q_1 - 1,5·IQR	μ - 3·σ	NN_{inf}	Q_3 + 1,5·IQR	μ + 3·σ	NN_{sup}
ESRS	1.544,25	1.012,39	291,53	7.998,47	8.364,31	25.762,14
ESRD	-615,54	-57,31	274,67	14.054,92	13.527,17	18.881,45
ETD	-796,79	513,73	775,56	25.927,85	24.567,27	35.551,40
ETT	9.229,30	5.869,94	3.867,77	35.155,20	37.530,02	44.796,99
EDD	3.646,66	2.886,94	-	14.748,86	15.529,55	-

Considerando os limites menos rígidos (NN), apenas 0,20% dos eixos analisados foram considerados *outliers*. Para o limite inferior, esse se mostrou um bom método para balizar as cargas mínimas, uma vez que valores médios ou medianos pequenos com altas dispersões tendem a retornar valores muito próximos de zero ou negativos, sem sentido físico para os dados em questão. Assim, o limite inferior baseado nos vizinhos mais próximos, NN_{inf}, foi adotado como balizador das cargas mínimas para cada eixo, arredondado para baixo até o próximo múltiplo de 50 kg. Entretanto, para o limite superior, os valores obtidos para NN_{sup} foram demasiadamente flexíveis, chegando a valores superiores a 4 vezes a CML para o ESRS. Com isso, foi tomado como balizador superior o maior valor dentre as outras duas metodologias, arredondado para cima até o próximo múltiplo de 50 kg. Para a carga mediana, foram tomadas as medianas globais de cada tipo de eixo, arredondadas para o múltiplo mais próximo de 5% da CML de cada eixo. Os valores mínimos, máximos e medianos assim obtidos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Cargas limite propostas para a caracterização de eixos descarregados, carregados e sobrecarregados

Eixo	Carga mínima [t]	Carga mediana [t]	CML [t]	Carga máxima [t]
ESRS	0,25	4,80	6,00	8,40
ESRD	0,25	6,50	10,00	14,10
ETD	0,75	12,75	17,00	25,95
ETT	3,85	22,95	25,50	37,55
EDD	2,85	9,00	12,00	15,55

O percentual de eixos observados em cada um dos níveis de carga propostos pode ser encontrado na Tabela 7, discriminada por balança e tipo de eixo. Cabe ressaltar que, como corolário da definição da mediana como divisora entre eixos descarregados e carregados, espera-se que, em média, 50% dos eixos se apresentem descarregados. Assim, percentuais de eixos descarregados acima de 50% denotam balanças menos carregadas do que a média dos nove PPVs estudados – como o caso de Magé –, ao passo que percentuais de eixos descarregados abaixo dos 50% indicam balanças mais carregadas do que a média – ao exemplo de Araxá e Capão Seco.

A partir das cargas propostas como balizadoras de cada nível de carga (Tabela 6), foram calculados os centros geométricos de uma curva de quarta potência entre cada par de limites, de acordo com a Equação 3. As cargas assim obtidas foram propostas como representativas de cada nível de carregamento, e são resumidas na Tabela 8. Em especial para os eixos sobrecarregados, as cargas utilizadas foram limitadas a 1,10·CML, conforme discutido na seção anterior.

Tabela 7: Percentuais de eixos descarregados, carregados e sobrecarregados nas balanças estudadas

Tipo de eixo	Descarregados	Carregados	Sobrecarregados
Retiro	**47,83%**	**35,33%**	**16,84%**
ESRS	45,38%	33,72%	20,90%
ESRD	52,07%	41,25%	6,68%
ETD	48,86%	32,99%	18,16%
ETT	43,65%	28,62%	27,73%
EDD	21,94%	57,46%	20,61%
Magé	**73,44%**	**22,69%**	**3,87%**
ESRS	75,85%	19,65%	4,50%
ESRD	72,14%	25,85%	2,01%
ETD	68,30%	26,63%	5,07%
ETT	80,46%	14,89%	4,65%
EDD	64,93%	30,86%	4,20%
Queluz	**35,77%**	**47,90%**	**16,33%**
ESRS	30,84%	51,65%	17,51%
ESRD	36,43%	53,53%	10,04%
ETD	36,20%	44,34%	19,46%
ETT	49,28%	30,46%	20,27%
EDD	-	-	-
Capão Seco	**20,38%**	**38,64%**	**40,97%**
ESRS	22,35%	36,51%	41,14%
ESRD	49,12%	39,04%	11,83%
ETD	11,48%	40,61%	47,91%
ETT	21,00%	37,11%	41,89%
EDD	10,42%	45,27%	44,31%
Comendador Gomes	**66,18%**	**26,59%**	**7,23%**
ESRS	54,69%	31,22%	14,09%
ESRD	69,76%	28,88%	1,36%
ETD	69,13%	26,16%	4,71%
ETT	86,15%	10,05%	3,80%
EDD	12,05%	28,56%	59,39%
Araxá	**29,64%**	**33,85%**	**36,50%**
ESRS	36,14%	38,80%	25,05%
ESRD	35,78%	45,92%	18,30%
ETD	22,61%	24,95%	52,44%
ETT	19,92%	24,28%	55,80%
EDD	26,54%	51,82%	21,64%
Guararema	**49,45%**	**37,72%**	**12,83%**
ESRS	49,82%	37,55%	12,63%
ESRD	43,35%	47,70%	8,95%
ETD	57,39%	29,84%	12,77%
ETT	43,83%	25,45%	30,72%
EDD	-	-	-
Resende	**51,15%**	**37,69%**	**11,17%**
ESRS	49,49%	42,20%	8,30%
ESRD	51,16%	42,26%	6,58%
ETD	56,74%	29,01%	14,25%
ETT	40,52%	23,20%	36,28%
EDD	-	-	-
Paracambi	**50,26%**	**36,25%**	**13,49%**
ESRS	46,69%	38,87%	14,44%
ESRD	46,76%	45,15%	8,09%
ETD	61,72%	24,09%	14,19%
ETT	48,34%	21,21%	30,45%
EDD	-	-	-
Total Geral	47,08%	38,95%	13,96%

Tabela 8: Cargas propostas como representativas para eixos descarregados, carregados e sobrecarregados

Eixo	Descarregado [t]	Carregado [t]	Sobrecarregado [t]
ESRS	4,00	5,49	6,60
ESRD	5,42	8,72	11,00
ETD	10,63	15,27	18,70
ETT	19,13	24,31	28,05
EDD	7,52	10,78	13,20

Com base nos intervalos propostos na Tabela 6, e utilizando os fatores de equivalência de carga calculados a partir do centro geométrico de cada nível de carregamento (Tabela 8), foi possível estimar, para cada balança estudada, os valores de número N e de fator veicular médio da frota comercial, FVc. Para isso, as pesagens reais de cada balança foram agrupadas nos três grupos de carregamento (Tabela 7), com suas proporções aplicadas aos fatores de equivalência de carga correspondentes. Os FVc assim obtidos (cargas propostas, distribuição real) são apresentados na Figura 5. Para efeitos comparativos, ainda foram calculados fatores adotando distribuições simplificadas do tipo 70-30 ou 80-20 (carregados-vazios). Nesse caso, foi utilizado a CML para eixos carregados e os valores observados por Balbo (2007), apresentados na Tabela 1, como tara de eixos vazios.

Nota-se uma boa aderência dos FVc calculados sob as premissas deste estudo aos valores reais, calculados eixo a eixo, tanto pelo método USACE quanto pelo AASHTO. Por outro lado, os valores calculados com base em considerações genéricas de carga tendem a superestimar as cargas de frotas menos carregadas – chegando a mais de três vezes o valor real no caso de Magé –, ao passo que ainda subestimam frotas mais carregadas.

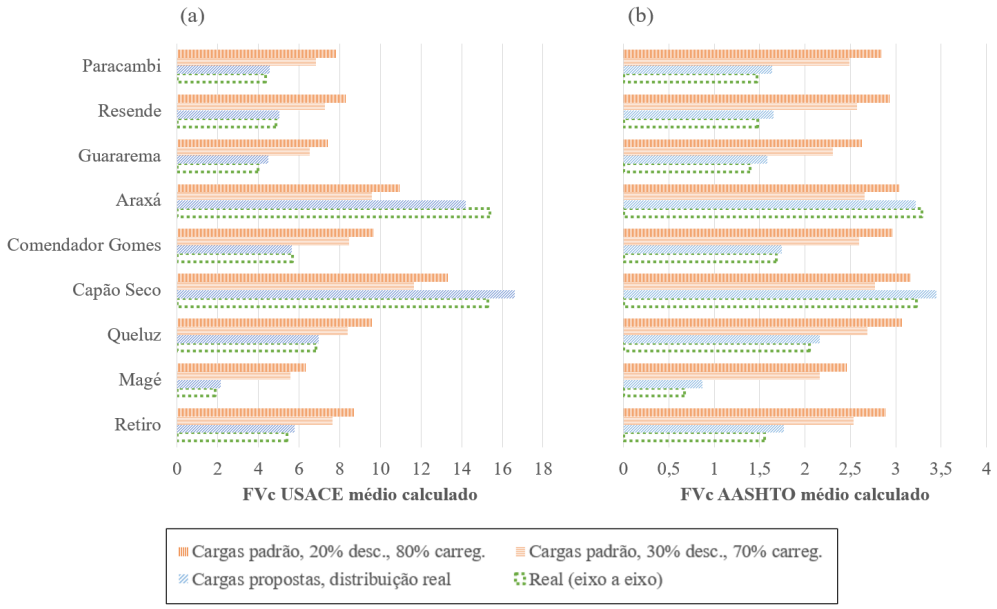


Figura 5. Valores de FVc USACE (a) e AASHTO (b) obtidos para as diferentes considerações de carga

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica realizada demonstrou a relevância do tema proposto no cenário de projetos e análise de pavimentos no Brasil. Embora diversos trabalhos tenham tentado explorar o conceito de espectro de cargas no exterior, muitos estudos e projetos de pavimentos no país ainda partem da premissa de uma frota ou carregamento simplificado,

por vezes considerando todos os veículos com o mesmo nível de carregamento. Nesse sentido, o presente estudo buscou contribuir tanto para o estado da arte quanto da prática no âmbito de projetos e gerenciamento de pavimentos no Brasil, analisando um grande banco de dados de pesagem e abrangendo diferentes anos e rodovias do país.

Ao todo, foram analisadas pesagens de mais de 30 milhões de veículos, distribuídas em nove postos de pesagem brasileiros ao longo de 11.258 dias, perfazendo uma média de 3,4 anos de dados por PPV. O modelo de níveis de cargas proposto apresentou resultados satisfatórios para o FVc, com erros médios de +6,3% para o fator USACE e de +12,0% para o fator AASHTO, em relação aos valores reais (calculados eixo a eixo) quando considerados os percentuais reais de eixos descarregados, carregados e sobrecarregados, com coeficientes de determinação de 0,99 e 0,95, respectivamente. Em contraste, os FVc calculados a partir de distribuições genéricas de carga do tipo 70-30 e 80-20 apresentaram coeficientes de determinação entre 0,28 e 0,57, com erros médios de +63% a +98%.

Vale ressaltar que os altos coeficientes de determinação obtidos para o modelo proposto já eram esperados, uma vez que o modelo foi ajustado e testado sobre o mesmo conjunto de balanças. Para confirmar a aplicabilidade do modelo proposto a frotas diferentes daquelas aqui estudadas, novos dados de pesagem deverão ser utilizados e confrontados aos resultados obtidos a partir do modelo.

Proporções genéricas de níveis de carregamento, bastante utilizadas na prática de projetos no país, tendem a superestimar os valores de FVc para a maioria dos pontos observados, ao passo que subestimam os valores de FVc para pontos mais carregados. Porém, destaca-se que os resultados ora obtidos foram derivados exclusivamente de dados de pesagem obtidos em postos de pesagem em rodovias federais concedidas no Brasil. Portanto, recomenda-se a continuidade de estudos de carga no país, de modo a monitorar os níveis reais de carregamento da frota rodante e considerá-los de forma adequada em projetos e sistemas de gerenciamento de pavimentos.

Por fim, recomenda-se revisitar estudos de tráfego que porventura tenham se baseado em considerações genéricas de carga, em especial aqueles que tenham sido utilizados para obter curvas de calibração brasileiras para modelos de desempenho de pavimentos. Do contrário, tais modelos serão incompatíveis com o uso de cargas reais de tráfego, limitando a sua aplicabilidade futura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANTT e à Ecorodovias | Ecoponte, por fomentarem o desenvolvimento da pesquisa intitulada *Definição de uma metodologia para avaliar os impactos do aumento da tolerância nas cargas por eixo nos custos de manutenção de pavimentos de rodovias concedidas*, desenvolvida entre 2018 e 2020 com recursos de desenvolvimento tecnológico (RDT), por meio da qual foram disponibilizados os dados de pesagem veicular utilizados no presente estudo. Os agradecimentos se estendem ainda à Triunfo | Concebra, pela disponibilização dos dados referentes aos postos de pesagem veicular de Araxá e Comendador Gomes, no estado de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

Albano, J.F. (2005) *Efeitos dos Excessos de Carga Sobre a Durabilidade de Pavimentos*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/4498> (acesso em: 06/03/2023).

AASHTO (1993) *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, DC: AASHTO.

AASHTO (2015) *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: a Manual of Practice* (2nd ed.). Washington, DC: AASHTO.

Balbo, J.T. (2007) *Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração*. São Paulo: Oficina de Textos.

Bosso, M.; K.L. Vasconcelos; L.L. Ho et al. (2020) Use of regression trees to predict overweight trucks from historical weigh-in-motion data. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, v. 7, n. 6, p. 843-59. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.07.004.

Brasil (2006) *Manual de Estudos de Tráfego*. Brasília: IPR/DNIT.

Brasil (2022) *Novos Projetos em Rodovias*. Brasília: Agência Nacional de Transportes Terrestres. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/novos-projetos-em-rodovias> (acesso em: 06/03/2023).

Breunig, M.M.; H.-P. Kriegel; R.T. Ng et al. (2000) LOF: identifying density-based local outliers. *SIGMOD Record*, v. 29, n. 2, p. 93-104. DOI: 10.1145/335191.335388.

Brito, L.A.T.; J.A.P. Ceratti; W.P. Núñez et al. (2013) 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*, v. 18, p. 22-8.

Brown, D.N. e R.G. Ahlvin (1961) *Revised Method of Thickness Design for Flexible Highway Pavements at Military Installations*. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.

Fontenele, H.B. (2011) *Representação do Tráfego de Veículos Rodoviários de Carga através de Espectros de Carga por Eixo e seu Efeito no Desempenho dos Pavimentos*. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-12032012-111950/publico/HBF_doutorado.pdf> (acesso em: 06/03/2023).

Guerson, L.; V.Z. Tani and A.M. Valente (2022) Operação de sistema HS-WIM para controle do excesso de peso de veículos em condições brasileiras. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, v. 3, n. 2, p. 325-42. DOI: 10.54021/seesv3n2-002.

Haider, S.W.; G. Musunuru; N. Buch et al. (2019) Updating traffic inputs for use in the pavement mechanistic-empirical design in Michigan. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2673, n. 11, p. 13-28. DOI: 10.1177/0361198119849913.

Hasan, M.A.; M.R. Islam and R.A. Tarefder (2016) Clustering vehicle class distribution and axle load spectra for mechanistic-empirical predicting pavement performance. *Journal of Transportation Engineering*, v. 142, n. 11, p. 05016006. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000876.

Klamt, R.; L. Specht; J. Budny et al. (2017) A influência da sobrecarga nos pavimentos e a importância da fiscalização de pesagem veicular nas rodovias brasileiras. *Revista CIATEC*, v. 9, n. 2, p. 52-65.

Macea, L.F.; L. Márquez and H. Llinás (2015) Improvement of axle load spectra characterization by a mixture of three distributions. *Journal of Transportation Engineering*, v. 141, n. 12, p. 04015030. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000801.

Medina, J. e L.M.G. Motta (2005) *Mecânica dos Pavimentos* (2ª ed). Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.

Peterlini, P.S. (2006) *Cargas por Eixo e Fatores de Veículos Obtidos em Rodovias Federais Concessionadas do Estado do Paraná*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88317> (acesso em: 06/03/2023).

Romeiro Jr., C.L.; L.A. Brito; L.F.T. Heller et al. (2020) Impact on pavement deterioration due to overload vehicle regulation in Brazil. *Transportation Research Procedia*, v. 45, p. 842-9. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.02.085.

Rys, D. (2021) Consideration of dynamic loads in the determination of axle load spectra for pavement design. *Road Materials and Pavement Design*, v. 22, n. 6, p. 1309-28. DOI: 10.1080/14680629.2019.1687006.

São Paulo (Município) (2004) *IP – 02/2004 Classificação das Vias*. São Paulo: Prefeitura Municipal.

São Paulo (Estado) (2006) *Instrução de Projeto IP-DE-P00/001. Projeto de Pavimentação*. São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem.

Souza, M.L. (1981) *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis* (3ª ed.). Rio de Janeiro: IPR.

Tahaei, N.; J.J. Yang; M.G. Chorzepa et al. (2021) Machine learning of Truck Traffic Classification groups from Weigh-in-Motion data. *Machine Learning with Applications*, v. 6, p. 100178. DOI: 10.1016/j.mlwa.2021.100178.

Vallejo, F.M.L. (2021) *Impactos do Excesso de Carga nos Pavimentos Rodoviários: uma Abordagem Probabilística na Determinação do Fator de Veículo* Tese (doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-25102021-161844/publico/FlavianeMeloLopesVallejoCorr21.pdf> (acesso em: 06/03/2023).

Vallejo, F.M.L.; C.R. Santos; L.L.B. Bernucci et al. (2022) Análise do excesso de carga de veículos comerciais e seu efeito no dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos. *Transportes*, v. 30, n. 3, p. 2643-57. DOI: 10.14295/transportes.v30i3.2643.