

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL:
CONSTRUÇÃO E INFRAESTRUTURA**

HENRIQUE FALCK GRIMM

**ESPECTRO DE CARGAS EM RODOVIAS BRASILEIRAS:
UMA AVALIAÇÃO COM DADOS EM MASSA**
Dissertação de Mestrado

Porto Alegre
agosto de 2022

HENRIQUE FALCK GRIMM

**ESPECTRO DE CARGAS EM RODOVIAS BRASILEIRAS:
UMA AVALIAÇÃO COM DADOS EM MASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Orientador: Lélío Antônio Teixeira Brito

Porto Alegre
agosto de 2022

CIP - Catalogação na Publicação

Grimm, Henrique Falck
Espectro de cargas em rodovias brasileiras: uma
avaliação com dados em massa / Henrique Falck Grimm.
-- 2022.
178 f.
Orientador: Lélío Antônio Teixeira Brito.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Projeto de Pavimentos. 2. Big Data. 3.
Clustering. 4. Excesso de Carga. 5. Pesagem Veicular.
I. Brito, Lélío Antônio Teixeira, orient. II. Título.

HENRIQUE FALCK GRIMM

**ESPECTRO DE CARGAS EM RODOVIAS BRASILEIRAS:
UMA AVALIAÇÃO COM DADOS EM MASSA**

Esta dissertação de mestrado foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Obras Viárias e Hidráulicas, e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 08 de março de 2022

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito
Ph.D. pela University of Nottingham
Orientador

Profa. Ângela de Moura Ferreira Danilevicz
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Carla Schwengber ten Caten (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Luiz Guilherme Rodrigues de Mello (DNIT)
Dr. pela Universidade de Brasília

AGRADECIMENTOS

Ao professor Lélío Antônio Teixeira Brito, pela orientação, incentivo e parceria ao longo deste trabalho, desde o meu ingresso até o término do período de mestrado.

Ao Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LPAV/UFRGS), por propiciar a infraestrutura necessária ao desenvolvimento desta pesquisa e por promover a discussão entre renomados pesquisadores e técnicos, sem a qual as conclusões aqui obtidas não teriam a mesma profundidade e maturidade.

À Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e à Ecorodovias | Eco ponte, 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 pelo LPAV por meio de recursos de desenvolvimento tecnológico (RDT), por meio da qual foi fornecida grande parte dos dados de pesagem veicular utilizados no presente estudo.

À Triunfo | Concebra, pela disponibilização dos dados referentes aos postos de pesagem veicular de Araxá e Comendador Gomes, no estado de Minas Gerais, para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Ecorodovias | Ecosul, à Concessionária Rio-Teresópolis (CRT) e à CCR | NovaDutra que, apesar de não terem ligação direta com a presente pesquisa, foram responsáveis pela operação dos postos de pesagem de Retiro, Capão Seco, Magé, Resende, Paracambi, Queluz e Guararema e pela disponibilização dos dados utilizados para a pesquisa RDT mencionada anteriormente.

Aos colegas e amigos, pelo apoio nos momentos de dificuldade e também pela leveza nos momentos de descontração. Pelas discussões científicas e por vezes filosóficas, acerca desta pesquisa, da vida, do universo e de tudo mais.

Por fim, à minha família, pelo amparo e pela compreensão de meus longos períodos de ausência. Em especial, à Ingrid, por estar ao meu lado durante toda a jornada, compartilhando mazelas e conquistas.

Maybe stories are just data with a soul.
Brené Brown

RESUMO

GRIMM, H. F. **Espectro de cargas em rodovias brasileiras**: uma avaliação com dados em massa. 2022. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Muito se discute sobre o impacto de diferentes níveis de carga sobre o desempenho de pavimentos. Entretanto, no Brasil, ainda que haja postos de pesagem veicular coletando dados de forma quase ininterrupta, 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 em nove postos brasileiros, distribuídos nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Rio Grande do Sul, de modo a investigar e retratar os níveis de carga observados na frota rodante no país. As métricas encontradas incluem classes de veículos e tipos de eixos mais comuns nas frotas comerciais, percentuais de sobrecarga, número de veículos infratores, espectros de carga e eficiência da fiscalização de cargas nas rodovias brasileiras. Como objetivo principal, a pesquisa se propôs a definir níveis de carregamento referenciais para utilização em projetos de pavimentos em diferentes regiões do Brasil. Uma metodologia foi definida a partir das métricas estatísticas obtidas para cada um dos pontos estudados, dividindo os eixos em três níveis de carregamento. Para cada nível de carregamento, foram propostos limites superior e inferior, assim como a carga de referência a ser utilizada para cada nível. Com auxílio de um algoritmo de agrupamento hierárquico baseado no conceito de aprendizado de máquina, as frotas foram divididas em quatro grupos. As distribuições médias de eixos descarregados, carregados e sobrecarregados encontradas foram de: (i) 73%, 23% e 4%, para regiões de tráfego leve; (ii) 44%, 39% e 17%, para regiões de tráfego moderado; (iii) 38%, 45% e 17%, para regiões de tráfego pesado; e (iv) 25%, 35% e 40%, para regiões de tráfego ultra pesado. No peso bruto total, 9,5% dos veículos apresentaram excessos acima do seu peso regulamentar, com sobrecarga média de 5,5%. Contudo, o estudo conclui que é grande a heterogeneidade das cargas e das frotas no Brasil, reforçando a importância da aferição das cargas rodantes para a adequada consideração das frotas de projeto.

Palavras-chave: Projeto de Pavimentos; *Big Data*; *Clustering*; Ciência de Dados; Excesso de Carga; Fiscalização de Cargas; Pesagem Veicular.

ABSTRACT

GRIMM, H. F. **Espectro de cargas em rodovias brasileiras**: uma avaliação com dados em massa. 2022. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Much is discussed about the impact of different vehicle load levels on pavement performance. However, in Brazil, even though there are vehicle weighing stations collecting data almost 24/7, information availability 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 do not always adequately portray the actual truck weights. Thus, this research analyzed weighing data from more than 30 million vehicles over nine Brazilian sites, located in the states of Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo and Rio Grande do Sul, in order to investigate and portray truck load levels observed in the country's fleet. The metrics found include most common vehicle classes and axle types in commercial fleets, overload percentages, number of infringing vehicles, load spectra and efficiency of overload enforcement on Brazilian highways. As the main goal, the research was carried to estimate reference loading levels to be used in pavement design for different regions of Brazil. A methodology was defined based on statistical metrics obtained for each of the studied sites, dividing the axles into three loading levels. For each loading level, upper and lower limits were proposed, as well as the reference load to be used for each level. Aided by a hierarchical clustering algorithm based on machine learning concepts, the fleets were divided into four groups. The average distributions of unloaded, loaded and overloaded axles observed were: (i) 73%, 23% and 4%, for light traffic regions; (ii) 44%, 39% and 17%, for moderate traffic regions; (iii) 38%, 45% and 17%, for heavy traffic regions; and (iv) 25%, 35% and 40%, for ultra-heavy traffic regions. In terms of gross vehicle weight (GVH), 9.5% of vehicles presented excesses over their regulatory weight, with an average overload of 5.5%. However, the study concludes that the heterogeneity of loads and fleets in Brazil is pronounced, emphasizing the importance of in-site measuring of truck loads for the proper consideration of the design fleets.

Keywords: Pavement Design; Big Data; Clustering; Data Science; Truck Overload; Overload Enforcement; Vehicle Weighing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Delineamento e etapas propostos para o desenvolvimento da pesquisa.....	19
Figura 2 - Ciência de dados e o escopo do trabalho	20
Figura 3 – Configuração dos principais tipos de eixo encontrados na frota comercial brasileira	25
Figura 4 - Fatores de operações equivalentes calculados pela USACE	30
Figura 5 - Linha do tempo das alterações das tolerâncias aceitas em pesagens veiculares no Brasil.....	41
Figura 6 - Número de autos lavrados no SIFAMA em 2020 por excesso de carga no eixo	43
Figura 7 - Número de autos lavrados no SIFAMA em 2020 por excesso de carga no PBT	44
Figura 8 - Número de autos lavrados no SIFAMA em 2020 por excesso de carga em ambos eixo e PBT	44
Figura 9 – Esquema de um posto de pesagem veicular móvel.....	52
Figura 10 - Esquema de um posto de pesagem veicular fixo	53
Figura 11 - Mapa dos postos de pesagem em rodovias federais brasileiras	54
Figura 12 - Espectros de cargas observados no Novo México, EUA: (a) eixo simples (estações 1 a 5); (b) eixo simples (estações 6 a 10); (c) eixo tandem (estações 1 a 5); (d) eixo tandem (estações 6 a 10)	56
Figura 13 - Processo de <i>clustering</i> dos espectros de carga utilizando o método do cotovelo (a) e a análise de um dendrograma (b).....	57
Figura 14 - Postos de pesagem veicular estudados.....	67
Figura 15 - Janela inicial do aplicativo desenvolvido	70
Figura 16 - Janela para seleção e carregamento dos arquivos.....	70
Figura 17 - Pré-visualização dos dados e utilização do aplicativo	71
Figura 18 - Tabela de apoio para consulta de balanças previamente cadastradas no aplicativo	72
Figura 19 - Autodetecção de ponto e vírgula como separador	73
Figura 20 - Janela para correlação e padronização dos nomes de variáveis.....	74
Figura 21 - Arquivo de saída do aplicativo	75
Figura 22 - Centro geométrico da área sob uma curva de quarta potência	86
Figura 23 - Exemplo de um dendrograma	88
Figura 24 - Linha temporal do volume médio mensal de veículos comerciais	90
Figura 25 - Linha temporal da carga total pesada por mês, em bilhões de kg	91

Figura 26 - Histograma de frequências dos intervalos entre pesagens consecutivas na balança do Retiro/RS	92
Figura 27 - Distribuição das pesagens ao longo do dia	93
Figura 28 - Distribuição dos tipos de eixos observados nos PPVs estudados.....	96
Figura 29 - Evolução do fator veicular comercial ao longo dos anos	96
Figura 30 - Percentual de eixos do tipo ESRD (a), ETD (b) e ETT (c) com excesso	102
Figura 31 - Percentual de eixos do tipo ESRS (a), EDD (b) e EM (c) com excesso.....	103
Figura 32 - Espectros de carga por eixo nos pontos estudados	106
Figura 33 - Espectros de carga por peso bruto total nos pontos estudados	107
Figura 34 - Comparação entre os espectros de carga diurno e noturno nos PPVs de Paracambi (a) e Resende (b).....	108
Figura 35 - Comparação entre os espectros de carga durante os períodos fiscalizado e não fiscalizado no PPV de Araxá/MG	108
Figura 36 - Períodos de fiscalização no PPV de Araxá/MG, por dia da semana	109
Figura 37 - Períodos de fiscalização no PPV de Araxá/MG, por mês do ano.....	110
Figura 38 - Espectros de carga ao longo das horas do dia, no PPV de Paracambi.....	111
Figura 39 - Espectros de carga ao longo do ano, no PPV de Comendador Gomes.....	112
Figura 40 - Distribuição das cargas por eixo	113
Figura 41 - Agrupamento dos PPVs de acordo com suas distribuições de carga.....	119
Figura 42 - Agrupamento dos PPVs de acordo com suas distribuições de classe de veículo	119
Figura 43 - Agrupamento dos PPVs de acordo com suas distribuições de carga, excluindo-se Comendador Gomes	121
Figura 44 - Agrupamento dos PPVs de acordo com suas distribuições de classe de veículo, excluindo-se Comendador Gomes.....	121
Figura 45 - Valores de FVc USACE (a) e AASHTO (b) obtidos para as diferentes considerações de carga.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carga máxima legal por eixo no Brasil	37
Tabela 2 - Cargas máximas legais em vigor nos Estados Unidos	45
Tabela 3 - Limites de carga por eixo no âmbito do MERCOSUL	48
Tabela 4 - Erro máximo admissível, como percentagem do valor verdadeiro convencional da massa do veículo.....	51
Tabela 5 - Erro máximo admissível, como percentagem do valor verdadeiro convencional da carga estática de referência por eixo isolado	51
Tabela 6 - Erro máximo admissível, como percentagem da média corrigida da carga por eixo e conjunto de eixos	51
Tabela 7 - Exemplo de agrupamento de dados de pesagem	56
Tabela 8 - Tamanho mínimo da amostra (dias por ano) para estimar a distribuição de cargas com dados WIM	59
Tabela 9 - Proporção de veículos carregados e vazios resultante de pesquisas OD em estudos de viabilidade para a concessão da BR-163/MT-PA.....	60
Tabela 10 - Distribuição de carga adotada para o cálculo do número N apresentado nos estudos de viabilidade para a concessão da BR-163/MT-PA.....	61
Tabela 11 - Distribuição de cargas proposta pela Prefeitura de São Paulo	61
Tabela 12 - Cargas e fatores veiculares propostos pelo DER/SP	62
Tabela 13 - Valores de tara por eixo, em toneladas, estimados pela literatura e utilizados na prática	62
Tabela 14 - Fator veicular médio da frota comercial (FVc) no PPV 6/3 estudado por Peterlini (2006)	63
Tabela 15 - Fatores veiculares USACE por veículo encontrados na literatura e calculados por considerações de carga	64
Tabela 16 - Postos de pesagem analisados	68
Tabela 17 - Períodos de abrangência dos dados e número de veículos pesados	68
Tabela 18 - Variáveis do banco de dados SQL	76
Tabela 19 - Número de pesagens restantes após a limpeza dos dados	78
Tabela 20 - Tempo estimado de operação das balanças	93
Tabela 21 - Tipos de veículo na frota, caracterizados pelo número de eixos.....	94
Tabela 22 - Distribuição dos tipos de eixos observados nos PPVs estudados	95
Tabela 23 - Comparação entre os valores de FV encontrados nesta pesquisa e aqueles apresentados na Tabela 15	97

Tabela 24 - Fator veicular médio da frota comercial para diferentes cenários de sobrecarga, calculado com os fatores USACE	98
Tabela 25 - Fator veicular médio da frota comercial para diferentes cenários de sobrecarga, calculado com os fatores AASHTO	98
Tabela 26 - Percentuais de veículos com excessos na frota estudada	100
Tabela 27 - Excesso médio observado no PBT	101
Tabela 28 - Métricas estatísticas da distribuição de cargas por eixo.....	114
Tabela 29 - Cargas mínimas e máximas médias esperadas por tipo de eixo.....	116
Tabela 30 - Cargas limite propostas para a caracterização de eixos descarregados, carregados e sobrecarregados	116
Tabela 31 - Percentuais de eixos descarregados, carregados e sobrecarregados nas balanças estudadas.....	117
Tabela 32 - Cargas propostas como representativas para eixos descarregados, carregados e sobrecarregados	118
Tabela 33 - Fatores de equivalência de carga, <i>FC</i> , obtidos para eixos descarregados (d), carregados (c) e sobrecarregados (sc), conforme cargas propostas.....	118
Tabela 34 - Níveis de carga de referência propostos para cada grupo de rodovia definido ...	123
Tabela 35 - Fatores veiculares e erros em relação ao valor real, calculados para diferentes distribuições de carga	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fatores de equivalência da AASHTO, segundo o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT.....	29
Quadro 2 - Fatores de equivalência da USACE, segundo o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT.....	30
Quadro 3 - Classes e silhuetas utilizadas pela FHWA	32
Quadro 4 - Agrupamento das classes DNIT, conforme proposto no PNCT	34
Quadro 5 - Quadro resumo dos principais tipos de eixo encontrados no Brasil	38
Quadro 6 - Quadro resumo das alterações das tolerâncias aceitas em pesagens veiculares no Brasil.....	40
Quadro 7 - Hipóteses de carregamento da frota utilizadas por Albano (2005)	59
Quadro 8 - Grupos de balanças e suas características em comum	122

LISTA DE ABREVIACOES

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ANTT	Agencia Nacional de Transportes Terrestres
CML	Carga Máxima Legal
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EDD	Eixo Duplo Direcional
EDNT	Eixo Duplo Não em Tandem
EM	Eixo Misto
ESRD	Eixo Simples de Rodas Duplas
ESRS	Eixo Simples de Rodas Simples
ETD	Eixo Tandem Duplo
ETT	Eixo Tandem Triplo
FC	Fator de Equivalncia de Carga
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FV	Fator de Veículo
FVc	Fator de Veículo Médio da Frota Comercial
PBT/PBTC ¹	Peso Bruto Total/Peso Bruto Total Combinado
PPV	Posto de Pesagem Veicular
QFV	Quadro de Fabricantes de Veículos (publicado pelo DNIT)
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
VDM	Volume Diário Médio
VDMc	Volume Diário Médio Comercial
WIM	<i>Weigh-in-Motion</i> (Pesagem em Movimento)

¹ Por simplicidade, neste trabalho, exceto onde explicitamente indicado o contrário, será considerado como PBT o peso bruto total do veículo, independentemente de sua composição – ou seja, peso da unidade tratora mais seus reboques e/ou semirreboques, quando houver.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 QUESTÃO DE PESQUISA	17
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 DELIMITAÇÕES	18
1.4 LIMITAÇÕES	18
1.5 DELINEAMENTO	18
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 O IMPACTO DO NÍVEL DE CARGA SOBRE OS PAVIMENTOS	22
2.2 CARACTERIZAÇÃO DA FROTA	24
2.2.1 Tipos de Eixo	24
2.2.2 Fatores de Equivalência de Carga	26
2.2.3 Classificação de Veículos	31
2.3 LIMITES LEGAIS DE CARGA	35
2.3.1 A Legislação de Cargas no Brasil	36
2.3.2 Limites de Carga Adotados ao Redor do Mundo	45
2.4 PESAGEM VEICULAR E A FISCALIZAÇÃO DE CARGAS	48
2.5 CONSIDERAÇÕES DE CARGA PARA PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO	55
3 MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1 FERRAMENTAS DE PROGRAMAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS EM MASSA	65
3.2 DADOS DE PESAGEM UTILIZADOS	66
3.2.1 Organização dos Dados Recebidos	69
3.2.2 Criação de um Banco SQL Unificado	75
3.2.3 Limpeza dos Dados	77
3.3 VISUALIZAÇÃO DE DADOS	78
3.3.1 Classes de Veículo Mais Comuns na Frota	79
3.3.2 Tempo de Operação da Balança e Distribuição Horária do Tráfego	79
3.3.3 Identificação dos Tipos de Eixos e Extração de Métricas de Sobrecarga	79
3.3.4 Histogramas da Carga Real Observada	80
3.4 ANÁLISES QUANTITATIVAS	80
3.4.1 Cálculo do Número N e do Fator de Veículo Médio da Frota Comercial	81

3.4.2	Exportação dos Espectros de Carga na Forma de Tabelas.....	82
3.4.3	Métricas Estatísticas dos Dados de Pesagem	82
3.4.4	Considerações de Carga Propostas para a Caracterização das Balanças Estudadas	84
3.4.5	Algoritmos de Agrupamento (<i>Clustering</i>)	86
3.4.6	Bondade do Ajuste (<i>Goodness of Fit</i>).....	89
4	RESULTADOS	90
4.1	MÉTRICAS GERAIS OBSERVADAS	90
4.2	ESPECTROS DE CARGAS OBTIDOS	104
4.3	MODELO DE NÍVEIS DE CARGA PROPOSTO	112
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
	REFERÊNCIAS	132
	APÊNDICE A – LISTA DAS CLASSES CONTIDAS NO QUADRO DE	
	FABRICANTES DE VEÍCULOS DE 2021	138
	APÊNDICE B – CLASSES DNIT MAIS COMUNS.....	144
	APÊNDICE C – ESPECTROS DE CARGAS POR EIXO	148
	APÊNDICE D – ESPECTROS DE CARGAS POR PESO BRUTO TOTAL	158
	APÊNDICE E – MAPAS DE CALOR DA DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS POR HORA	
	DO DIA E POR MÊS DO ANO.....	168
	APÊNDICE F – ESPECTROS DE CARGA TABELADOS	178

1 INTRODUÇÃO

Pavimentos são estruturas construídas sobre um subleito com o intuito de protegê-lo das solicitações impostas pelo tráfego atuante e pelo clima, ao mesmo tempo que fornecem segurança e conforto ao usuário da via. Além de conhecer as propriedades do subleito e dos materiais que serão empregados na estrutura, é fundamental para qualquer projeto ou avaliação de pavimento prever, da forma mais adequada e próxima da realidade possível, as características fundamentais do tráfego ao qual ele será submetido durante o uso.

Uma discussão recorrente na literatura versa sobre o excesso de cargas frequentemente observado nas rodovias do mundo todo. Esse é um tópico de extrema importância no âmbito de projetos de rodovias, pois além de causarem a degradação prematura do pavimento, veículos sobrecarregados são uma ameaça à segurança nas estradas, sendo responsáveis por grande parte dos acidentes envolvendo veículos de carga (ALBANO, 2005). Um estudo de 2015 realizado pelo Departamento de Transportes do Estado de Nova York (*New York State Department of Transportation – NYSDOT*) analisou dados de 21 postos de pesagem em movimento, e concluiu que cerca de 18% dos veículos de carga que trafegam na rede do estado apresentam algum nível de sobrecarga (GHOSN et al., 2015). Os autores estimam que esses veículos sejam responsáveis por um acréscimo de US\$ 195 milhões por ano nos custos da rede viária do estado – com 26.320 km e cerca de 15.000 pontes –, sendo US\$ 145 milhões referentes aos custos de pavimentos e US\$ 50 milhões aos custos de pontes. No Brasil, ao analisarem dados de pesagens veiculares em diferentes rodovias, Brito et al. (2013) e Bosso et al. (2019) também observaram algum nível de sobrecarga em 10% e 29% dos veículos, respectivamente. Em outro estudo brasileiro, Romeiro Júnior et al. (2020) estimaram um impacto de 6% nos custos de manutenção de uma rodovia devido à sobrecarga rodante.

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 são baseados apenas em contagens volumétricas e classificatórias dos veículos da frota. Tais contagens costumam dividir a frota em veículos leves, médios, pesados, etc., ou ainda de acordo com o número e tipo de seus eixos, mas são simplistas ao considerar as cargas transportadas. Por vezes, supõe-se que a totalidade da frota trafega no limite legal de carga, onde o impacto de veículos sobrecarregados seria compensado pela ocorrência de veículos vazios na frota, ou então que uma parcela dos veículos trafega totalmente cheia, enquanto outra trafega totalmente vazia. 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. Soma-se a isto a dificuldade de separar as cargas por faixa de tráfego, principalmente nas vias com três ou mais faixas por sentido.

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, 2006a). 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, propôs novos fatores com base em dados mais recentes de sete postos de pesagem naquele estado. Entretanto, embora consideravelmente mais recente, o estudo utilizou pesagens de apenas dois dias em cada um dos doze meses de 2002, totalizando 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.

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 aparente lacuna no conhecimento acerca do nível de carregamento da frota comercial atual no Brasil, que de 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, foram utilizados dados obtidos de forma contínua em balanças de postos de pesagem veicular instalados em diferentes rodovias e regiões do país.

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Dada a contextualização inicial apresentada, a questão de pesquisa deste trabalho é: com base em dados de postos de pesagem em serviço, qual nível de carregamento da frota veicular deveria ser considerado em projetos e avaliações de pavimentos nas rodovias brasileiras?

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos desta pesquisa são divididos em objetivo geral e objetivos específicos, conforme descrito a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

Considerando o contexto apresentado na introdução e a questão de pesquisa proposta, o objetivo geral desta pesquisa é propor, a partir de dados de pesagem veículo a veículo, níveis de carregamento referenciais da frota para serem utilizados em projetos e sistemas de gerenciamento de pavimentos em diferentes regiões do Brasil.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) identificar, através de dados coletados em massa, o nível de carregamento real observado na frota comercial brasileira em diferentes rodovias do país;
- b) verificar e comparar os níveis de carga recomendados por órgãos rodoviários para projeto de pavimentos no Brasil;
- c) identificar o comportamento da frota frente aos limites legais de carga impostos pela legislação brasileira;
- d) usar ferramentas de análise de dados em massa para auxiliar na identificação de características subsuperficiais do carregamento rodoviário para fins de análise do desempenho de pavimentos;
- e) propor, com auxílio de um método de agrupamento (*clustering*), frotas de veículos comerciais com características e comportamentos de carga similares, de modo a permitir a extrapolação dos resultados obtidos para outras rodovias e regiões do país.

1.3 DELIMITAÇÕES

Apesar de apresentar um panorama geral acerca da classificação e pesagem de veículos, assim como dos limites legais de carga e das considerações utilizadas em projetos de pavimentação para diferentes países, a presente pesquisa se propõe a avaliar os níveis de carregamento observados em rodovias delimitadas pelo território brasileiro.

1.4 LIMITAÇÕES

Dada a limitação na disponibilidade de dados de pesagem no Brasil, assim como na qualidade destes dados, não foi possível estudar todos os postos de pesagem veicular existentes no país. Dessa forma, períodos específicos e um número limitado de fontes de dados foram utilizados no estudo, discutidos em detalhe na seção 3.2 *DADOS DE PESAGEM UTILIZADOS*.

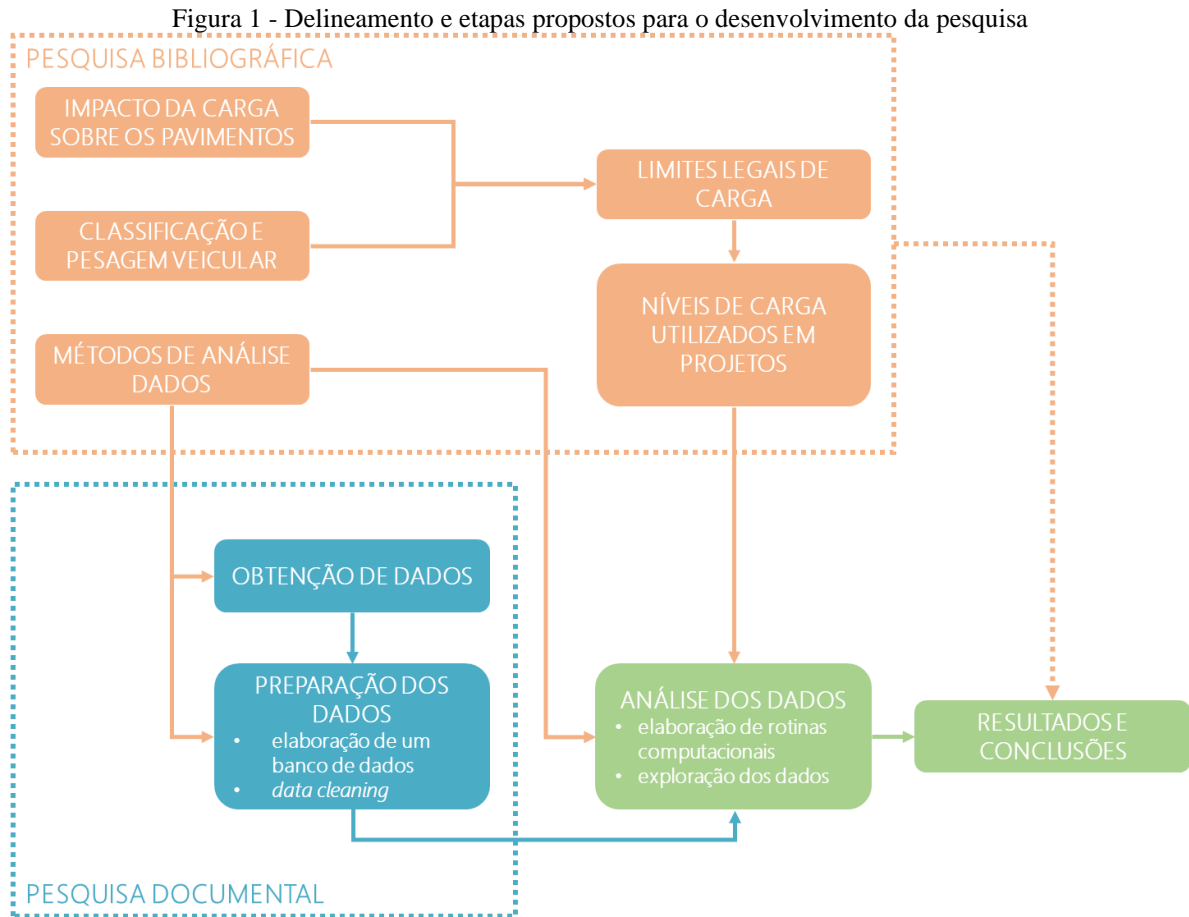
Vale ressaltar que os dados utilizados foram obtidos de balanças já existentes e que, devido às restrições impostas pela pandemia, não foram previstas visitas ou coletas de dados em campo. Além disso, não foram realizadas campanhas para a aferição da precisão das balanças consideradas no estudo, limitando-se a um tratamento estatístico e limpeza dos dados obtidos.

Por fim, o presente trabalho limitou-se a extrair resultados quanto aos níveis de carga observados em rodovias brasileiras, não se aprofundando no impacto dessas cargas na previsão de desempenho dos pavimentos. Assim, os fatores veiculares apresentados ao longo do texto, calculados com base em metodologias conhecidas da literatura, têm propósito comparativo, apenas, e não devem ser tomados como recomendação para uso direto em projetos de pavimentação.

1.5 DELINEAMENTO

Conforme exposto nos objetivos discutidos acima, a presente pesquisa se propõe a analisar dados reais de pesagem veicular de modo a extrair métricas que forneçam mais subsídios e embasamento ao projeto de pavimentos no país. Para isso, o presente trabalho foi baseado no delineamento apresentado na Figura 1. A pesquisa foi dividida em dois ramos principais: *Pesquisa Bibliográfica* e *Pesquisa Documental*. O primeiro incluiu uma revisão da literatura acerca do *Impacto da Carga Sobre os Pavimentos, Classificação e Pesagem Veicular, Limites*

Legais de Carga e Níveis de Carga Utilizados em Projetos de Pavimentação, todos com enfoque no Brasil e suas diferenças para o cenário mundial. Em paralelo, também foram estudados *Métodos de Análise de Dados*, de modo a fornecer embasamento teórico para as análises que seriam realizadas.



(fonte: elaborado pelo autor)

O segundo ramo da pesquisa, a *Pesquisa Documental*, teve início com a *Obtenção de Dados* de pesagem veicular de uma variedade fontes, buscando abranger diferentes regiões do país ao longo de vários anos. A partir da obtenção dos dados, a etapa de *Preparação dos Dados* visou elaborar um banco de dados unificado e padronizado, de modo a permitir comparações e análises entre as diferentes fontes de dado de forma simples e eficiente. Também foi nessa etapa que os dados foram verificados quanto a sua consistência, removendo entradas duplicadas e incoerentes, por exemplo, ou corrigindo-as quando possível.

A partir dos dois ramos iniciais da pesquisa, a etapa de *Análise dos Dados* explorou os dados com uso de ferramentas e rotinas computacionais, de modo a responder à questão da pesquisa e atingir seus objetivos. O conhecimento obtido através da revisão da literatura foi fundamental nessa etapa, pois sem ele o banco de dados criado não passaria de um enorme conjunto de

números sem um propósito maior. Também foi baseado na literatura que os *Resultados* obtidos através da análise conduziram às *Conclusões*, visando contribuir tanto para o estado da arte quanto da prática no âmbito de projetos e gerenciamento de pavimentos no Brasil.

Em especial na etapa de *Análise de Dados*, vale ressaltar a proximidade deste estudo ao meio de *data science* (ou ciência de dados), analisando grandes bancos de dados com o intuito de se extrair informações ou modelos do fenômeno em questão. Um fluxo de trabalho genérico comum na ciência de dados é apresentado na Figura 2.



(fonte: elaborado pelo autor)

O processo começa com a *Aquisição de Dados*, onde os dados são coletados e armazenados em um banco de dados. Essa etapa não fez parte do estudo, uma vez que os dados foram obtidos de bancos de dados já existentes. A segunda etapa, *Preparação dos Dados*, busca filtrar dados inconsistentes, corrigindo-os, quando possível, ou retirando-os da amostra, caso contrário. Após a limpeza das entradas inconsistentes, parte-se para a *Análise dos Dados*, onde grande parte do trabalho é desenvolvido. Inicialmente, essa etapa envolve uma abordagem exploratória, que é então refinada até a obtenção de conclusões. A partir das conclusões obtidas, normalmente se procede a *Elaboração de Relatório* para apresentação dos resultados obtidos. No caso do presente estudo, esse relatório é parte integrante da dissertação desenvolvida. Por último, a etapa de *Ação* busca, a partir dos resultados obtidos, tomar medidas que melhorem ou otimizem o cenário analisado. Para o caso em questão, essa etapa poderia estar vinculada, por exemplo, à elaboração de novas leis para a fiscalização dos níveis de carga ou à adoção dos resultados

obtidos em novos projetos de pavimentação, que, apesar de serem motivação para o desenvolvimento do estudo, estão ambos fora do escopo do trabalho, representado pela área em destaque na Figura 2.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos principais mais apêndices. Neste primeiro capítulo, foram apresentados a contextualização do tema, a justificativa para o desenvolvimento desta pesquisa, os objetivos propostos e as delimitações do estudo.

O *capítulo 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA* apresenta uma revisão da literatura acerca do tema proposto, onde foram abordados tópicos relevantes ao estudo como o impacto do nível de carga sobre os pavimentos, formas de caracterização da frota rodante, os limites legais de carga no Brasil e no mundo, a pesagem e a fiscalização de cargas no país e o estado da prática da engenharia de pavimentação no que diz respeito às cargas de projeto.

No *capítulo 3 MATERIAIS E MÉTODOS*, são apresentados os dados e as ferramentas utilizados no desenvolvimento deste estudo. Também são descritas as etapas e as análises realizadas, sejam elas qualitativas ou quantitativas, que ultimamente conduziram aos resultados da pesquisa.

Os resultados obtidos são resumidos no *capítulo 4 RESULTADOS*, conforme as análises propostas no capítulo anterior. Aqui também são discutidas as possíveis razões e justificativas por trás de cada resultado, referenciando aos capítulos anteriores, quando necessário.

O *capítulo 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS* resume as conclusões alcançadas a partir dos resultados encontrados, além de apresentar sugestões de trabalhos futuros relevantes para a área.

Por fim, apresenta-se uma série de apêndices, contendo gráficos auxiliares às análises realizadas, assim como alguns subprodutos obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho que possam servir como ponto de partida para outros estudos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos fatores impactam diretamente o comportamento dos pavimentos, conseqüentemente afetando o seu projeto. Huang (2004) divide tais fatores em quatro categorias: tráfego e carregamento, meio ambiente, materiais e critério de falha. Na primeira categoria, o autor destaca o impacto das diferentes configurações de eixo observadas nos veículos sobre o dimensionamento de pavimentos, assim como das suas respectivas cargas e do número de repetições de cada eixo na frota.

Sendo assim, um dos aspectos fundamentais ao projeto e à análise de pavimentos, além do estudo dos diferentes materiais envolvidos na pavimentação e do ambiente em que a estrutura será instalada, é o conhecimento das características do tráfego ao qual as rodovias são submetidas durante sua vida útil, ou pelo menos durante algum período específico de interesse. Embora alguns estudos particulares possam ser focados em um dado espaço temporal passado, a grande maioria dos projetos e análises de pavimentos tem interesse em prever o comportamento futuro e evolução dos defeitos na estrutura. Sendo assim, resta ao projetista ou ao gerente de pavimentos apenas estimar, com base em dados históricos e em modelos estatísticos, qual será o tráfego rodante sobre a rodovia ao longo de sua vida útil.

Embora tais estimativas – comumente chamadas, nesse contexto, de *Estudos de Tráfego* – sejam intrinsecamente interdisciplinares e, idealmente, englobem uma análise aprofundada da economia da região de interesse, assim como uma previsão de possíveis polos geradores de tráfego, este capítulo de revisão da literatura será focado nas características do tráfego, propriamente dito, e nos seus conseqüentes impactos sobre os pavimentos.

2.1 O IMPACTO DO NÍVEL DE CARGA SOBRE OS PAVIMENTOS

Em 1988, um estudo do Banco Mundial em países em desenvolvimento revelou que, além da falta de manutenção adequada, um dos principais fatores para a deterioração prematura de pavimentos era o crescimento inesperado da frota, frequentemente apresentando carregamentos acima da capacidade projetada (HARRAL, 1988). Isso é reforçado por Albano (2005), que, além dos impactos nocivos ao pavimento, atribui também ao excesso de carga grande parcela dos acidentes observados nas estradas.

Dada a importância do carregamento dos veículos no comportamento dos pavimentos, é fundamental compreender o impacto de diferentes níveis de carga sobre essas estruturas. Nesse quesito, Pinto e Preussler (2002) retratam que uma sobrecarga de 5% por eixo seria capaz de reduzir em cerca de 30% a vida útil de um pavimento, ao passo que 20% de sobrecarga resultariam em uma redução de 70% na vida de projeto. Utilizando diferentes modelos de fatores de equivalência de carga, Albano (2005) estimou, para uma frota hipotética composta inteiramente por eixos simples de rodado duplo com carga de 10 t, que um aumento de 20% das cargas implica em uma redução de 38% a 65% na vida prevista de um pavimento espesso e de 56% a 74% para um pavimento delgado. Em consonância, ao estudar os dados de oito balanças na Polônia, Rys, Judycki e Jaskula (2016) constataram uma redução de 50% na vida de fadiga dos pavimentos quando o percentual de veículos sobrecarregados variava de 0% para 20%. Em outro estudo, realizado no estado do Texas, nos Estados Unidos, a redução da vida de serviço de rodovias federais, estaduais e *farm-to-market* foi estimada em 40%, 41% e 66%, respectivamente, devido ao aumento do tráfego de veículos totalmente carregados e com excesso observado na região (MOROVATDAR; ASHTIANI, 2020). No Brasil, Vallejo (2021) analisou seis anos de dados de pesagem e estimou, tomando por base o fator veicular da frota, um aumento de 35% no dano ao pavimento no período. A autora atribuiu o aumento à alteração dos limites legais brasileiros em 2014, embora não tenha sido observado no estudo a consideração de outros fatores relevantes – como questões econômicas, por exemplo – que possam ter colaborado com o aumento das cargas observado.

Outros estudos tentaram estimar o impacto financeiro do excesso de carga nos pavimentos. Com base em dados reais de pesagem em uma rodovia no Brasil, Romeiro Júnior et al. (2020) estimaram um acréscimo de cerca de 6% nos custos de manutenção do pavimento em 30 anos de análise, comparando um cenário sem sobrecargas com o cenário real observado na rodovia. Em Portugal, Pais et al. (2019) verificaram um aumento de 30% nos custos do ciclo de vida do pavimento devido ao dano adicional causado por veículos com cargas acima do limite legal. Em 2015, um estudo do Departamento de Transportes do Estado de Nova York (*New York State Department of Transportation – NYSDOT*) estimou que veículos sobrecarregados são responsáveis por um acréscimo de US\$ 145 milhões por ano nos custos da rede de pavimentos do estado (GHOSN et al., 2015). Além disso, o estudo atribuiu aos veículos com excesso de carga um custo adicional de US\$ 50 milhões por ano referente às pontes da rede viária do estado, em termos do que chamaram de “utilização da margem de segurança”, referindo-se a um consumo dos coeficientes de segurança utilizados em projetos de pontes.

Através da bibliografia consultada, é possível identificar a importância da determinação dos impactos dos níveis de carga sobre os pavimentos, ainda que se note certa carência de trabalhos baseados em dados reais de pesagem com volume de dados desejável para análises estatísticas robustas. Além disso, percebe-se uma grande variação dos resultados de impacto obtidos, salientando a relação entre a degradação e as estruturas nas quais elas ocorrem, assim como a relevância da incorporação de espectros de cargas reais em estudos de previsão de desempenho de pavimentos.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA FROTA

Ao estimar o dano causado pelo tráfego ao pavimento, não apenas a carga tem importância, mas também a forma como ela é distribuída ao pavimento. Dessa forma, é de interesse entender os diferentes tipos de eixo utilizados nos veículos de carga, como eles impactam o pavimento e como eles podem ser agrupados de forma a classificar os vários veículos que compõe uma frota.

2.2.1 Tipos de Eixo

Em um veículo, o eixo pode ser visto como a peça ou mecanismo responsável por ligar pares de rodas de lados opostos entre si. Nesse sentido, o eixo deve também estar conectado ao restante do veículo – normalmente, por meio de suspensões – e transmitir a carga deste às rodas, ao mesmo tempo que permite que as rodas girem em torno de seu centro, movimentando o veículo. Além disso, os eixos podem, ainda, ser responsáveis por transmitir a tração do motor às rodas, de modo a impulsionar o veículo e mantê-lo em movimento.

Uma outra definição, mais ampla e potencialmente mais comum no âmbito de estudos de tráfego e projetos de pavimento, considera como eixo de um veículo todo o sistema rodas-eixo responsável por transmitir a carga do veículo ao pavimento. Não raro, nesse contexto, um conjunto de eixos próximos é considerado como um único eixo duplo ou triplo, conforme o caso. Sendo assim, neste trabalho, a segunda definição – aquela que considera como eixo todo o sistema rodas-eixo – será adotada.

De modo a atender as necessidades distintas de cada tipo de veículo, diversos tipos de eixo podem ser verificados na frota atual. Os tipos mais comumente observados em rodovias e

discutidos na literatura são (BOSSO et al., 2020; BRASIL, 2021a; HUANG, 2004; PAIS et al., 2019; ROMEIRO JÚNIOR et al., 2020):

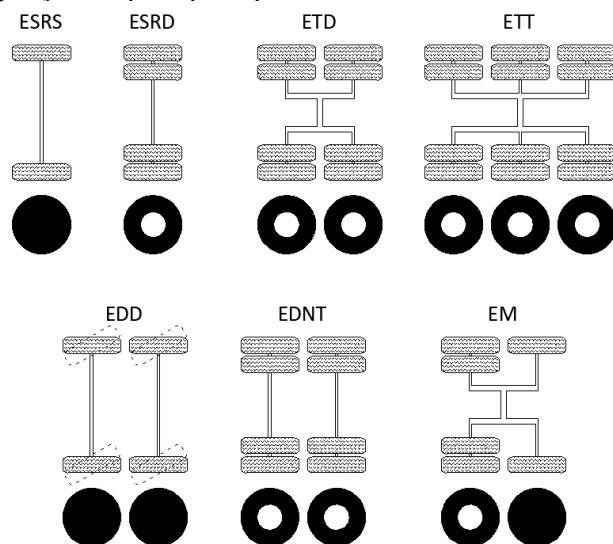
- eixo simples de rodas simples (ESRS) – eixo isolado com dois pneumáticos;
- eixo simples de rodas duplas (ESRD) – eixo isolado com quatro pneumáticos;
- eixo tandem duplo (ETD) – conjunto de dois eixos em tandem² com oito pneumáticos;
- eixo tandem triplo (ETT) – conjunto de três eixos em tandem com doze pneumáticos.

Vale ressaltar que, na literatura internacional, *single axle* normalmente diz respeito ao ESRD, embora também possa designar o ESRS, sendo diferenciados muitas vezes pelo contexto – eixos frontais costumam ter rodas simples enquanto eixos traseiros têm rodas duplas. Ainda, *tandem axle* refere-se ao ETD, enquanto o ETT é referenciado internacionalmente como *tridem axle*.

Outros tipos de eixo, consideravelmente menos comuns, mas ainda mencionados na legislação brasileira são (BRASIL, 2006b):

- eixo duplo direcional (EDD) – conjunto de dois eixos direcionais com dois pneumáticos cada;
- eixo duplo não em tandem (EDNT) – conjunto de dois ESRD não em tandem com distância entre eixos superior a 1,20 m e inferior a 2,40 m;
- eixo misto (EM) – conjunto de dois eixos, sendo um com dois e outro com quatro pneumáticos, interligados por suspensão especial.

Figura 3 – Configuração dos principais tipos de eixo encontrados na frota comercial brasileira



(fonte: elaborado pelo autor)

² De acordo com a Resolução CONTRAN n° 210/06, Art. 4°: “Considerar-se-ão eixos em tandem dois ou mais eixos que constituam um conjunto integral de suspensão, podendo qualquer deles ser ou não motriz” (BRASIL, 2006b).

Embora tecnicamente os conjuntos de eixos em tandem sejam constituídos por mais de um eixo, ao longo desse trabalho, exceto onde explicitamente indicado o contrário, ETD e ETT serão contabilizados como um grupo que contempla todo o conjunto de dois e três eixos, respectivamente. De forma a ilustrar estes e os demais eixos citados, a Figura 3 mostra uma representação gráfica superior e de perfil dos principais tipos de eixo observados na frota brasileira.

2.2.2 Fatores de Equivalência de Carga

A distribuição da carga veicular sobre os vários tipos de eixo causa danos igualmente variados ao pavimento. Por exemplo, 10 t em um ESRD são concentrados em 2,5 t por roda, mas são distribuídas em 0,83 t por roda em um ETT. Sendo assim, é importante observar como o comportamento das cargas varia na frota em função do tipo de eixo, e como isso é traduzido em dano ao pavimento.

Uma das formas de considerar os diferentes tipos de eixo no projeto de pavimentos visa relacionar o dano de cada um desses eixos ao dano de um eixo padrão – usualmente um eixo simples de rodas duplas (ESRD) com carga de 18.000 libras (8,2 t ou 80 kN) e pressão de inflação dos pneus de 81 psi (0,56 MPa). Nesse sentido, um fator de equivalência de carga (FC) de um eixo – no inglês, *equivalent axle load factor (EALF)* – define o dano causado ao pavimento pela passagem de um dado eixo qualquer em termos de um número equivalente de passagens do eixo padrão (HUANG, 2004). Com isso, o somatório dos FC de cada um dos eixos de uma dada frota ao longo da vida de projeto do pavimento resulta em um número equivalente de passagens de um eixo padrão no período – também chamado de *número N* ou *equivalent single-axle load (ESAL)* –, que pode então ser utilizado como parâmetro para o projeto da estrutura.

Huang (2004) argumenta que, ao comparar eixos de uma mesma configuração com cargas diferentes (i.e. comparar um ESRD de 8,2 t com um ESRD de 10 t, comparar um ETD de 17 t com um ETD de 18,7 t, etc.), a equivalência entre os eixos segue uma relação de quarta potência e tende a ser independente do critério de falha considerado. Essa conclusão resulta de uma análise teórica conduzida por Deacon³ (1969 apud HUANG, 2004), que pode ser expressa como

³ DEACON, J. A., 1969. "Load Equivalency in Flexible Pavements" *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 38, pp. 465–491.

$$EALF = \left(\frac{L_x}{L_s}\right)^4 \quad (1)$$

onde L_s é a carga do eixo padrão utilizado como base para a comparação e L_x é a carga do eixo comparado.

Entretanto, ao converter diferentes tipos de eixo em um eixo padrão único (i.e. converter um ETT em um ESRD de 8,2 t, por exemplo), o autor ressalta que o FC depende do tipo de pavimento, da espessura ou capacidade estrutural, e dos critérios adotados para definir o fim da vida de um pavimento. Assim, diferentes modelos para a determinação de FC foram propostos ao longo dos anos, dos quais são mencionados alguns a seguir.

Um desses modelos, e historicamente um dos mais utilizados na análise e dimensionamento de pavimentos rodoviários (HUANG, 2004; YODER; WITCZAK, 1975), é o proposto pela *American Association of State Highway Officials (AASHO)* e publicado no seu *Interim Guide for Design of Pavement Structures* (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY OFFICIALS, 1972). Os fatores de equivalência propostos são derivados de três grandes testes conduzidos pelo *Highway Research Board (HRB)* nos Estados Unidos entre meados dos anos 1940 e o início da década de 1960 (HUANG, 2004). O primeiro deles, conhecido como *Maryland Road Test*, teve início em 1941 e consistia em um trecho experimental de pavimento de concreto construído na US-301, com resultados publicados em 1952 pelo HRB. Dado o sucesso do estudo em Maryland, patrocinado por estados do centro-oeste e leste americano, a *Western Association of State Highway Officials (WASHO)* conduziu um teste similar entre os anos de 1952 e 1954, desta vez em pavimentos flexíveis. O terceiro grande teste, e talvez o mais conhecido, aconteceu em Ottawa, no estado americano de Illinois, de 1956 a 1960. O estudo foi composto por 6 pistas experimentais ovais, avaliando tanto pavimentos de concreto rígido quanto flexível. Baseada nos resultados desses testes, em 1972, foram propostas pela AASHO as seguintes equações de regressão para a determinação do *EALF* (HUANG, 2004):

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right) = 4,79 \log(18 + 1) - 4,79 \log(L_x + L_2) + 4,33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (2)$$

$$G_t = \log\left(\frac{4,2 - p_t}{4,2 - 1,5}\right) \quad (3)$$

$$\beta_x = 0,40 + \frac{0,081(L_x + L_2)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19}L_2^{3,23}} \quad (4)$$

onde W_{tx} é o número de aplicações de um eixo de carga x e W_{t18} é o número de aplicações de um eixo simples de 18 kip (18.000 libras) ao final do período t . As equações incorporaram o conceito de *pavement serviceability index (PSI)* – uma forma de avaliar conforto e segurança do pavimento em uma escala de 0 a 5, com 5 sendo a melhor serventia possível –, considerando a serventia inicial, p_o , como 4,2 e a serventia terminal, p_t , como parâmetro de entrada na equação. Na Equação 4, o número estrutural do pavimento, SN – outro conceito desenvolvido nos testes do HRB – é função da espessura do pavimento, módulo das camadas e condição de drenagem da base e sub-base, L_x é a carga em kip do eixo em questão, L_2 é o código do eixo (1 para ESRD, 2 para ETD e 3 para ETT) e β_{18} é o valor de β_x quando L_x é igual a 18 kip e L_2 é igual a 1. Importante notar que o *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures* (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) indica, em seu *Apêndice D*, que um valor de serventia terminal, $p_t = 2,5$ e de número estrutural, $SN = 5,0$ tendem a fornecer resultados suficientemente adequados para a maioria dos projetos de pavimentação. No mesmo apêndice do guia de 1993 podem ser encontradas tabelas com os fatores de carga calculados seguindo as equações 2 a 4 para diferentes tipos de eixo, valores de carga, SN e p_t .

No Brasil, os fatores de equivalência propostos pela AASHO em 1972, e ainda presentes nas versões mais atuais dos manuais da AASHO, foram adaptados por Queiroz⁴ (1982 apud MEDINA; MOTTA, 2005). Nas equações brasileiras, o único parâmetro de entrada é a carga do eixo, em toneladas, ficando constantes o número estrutural e a serventia terminal do pavimento, propostas como variáveis nas equações originais da AASHO. As equações brasileiras, apresentadas no *Manual de Estudos de Tráfego* do DNIT (BRASIL, 2006a) como “fatores de equivalência de carga da AASHO”, são resumidas no Quadro 1. Apesar da origem das equações brasileiras não ser detalhada no manual, e do histórico do trabalho de Queiroz não ter sido encontrado na literatura pesquisada, comparações realizadas pelo autor sugerem que tenha se adotado um valor fixo de número estrutural, $SN = 6,0$, e de serventia final, $p_t = 2,0$.

⁴ QUEIROZ, C. A. V. Uma avaliação das consequências econômicas da restrição aos excessos de carga por eixo. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTOS, 17., 1982, Brasília, DF. *Anais...* Rio de Janeiro: ABPv, 1982. p. II.1-II.35.

Quadro 1 - Fatores de equivalência da AASHTO, segundo o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT

Tipo de eixo	Fator de equivalência de carga
ESRS	$FC = (P/7,77)^{4,32}$
ESRD	$FC = (P/8,17)^{4,32}$
ETD	$FC = (P/15,08)^{4,14}$
ETT	$FC = (P/22,95)^{4,22}$

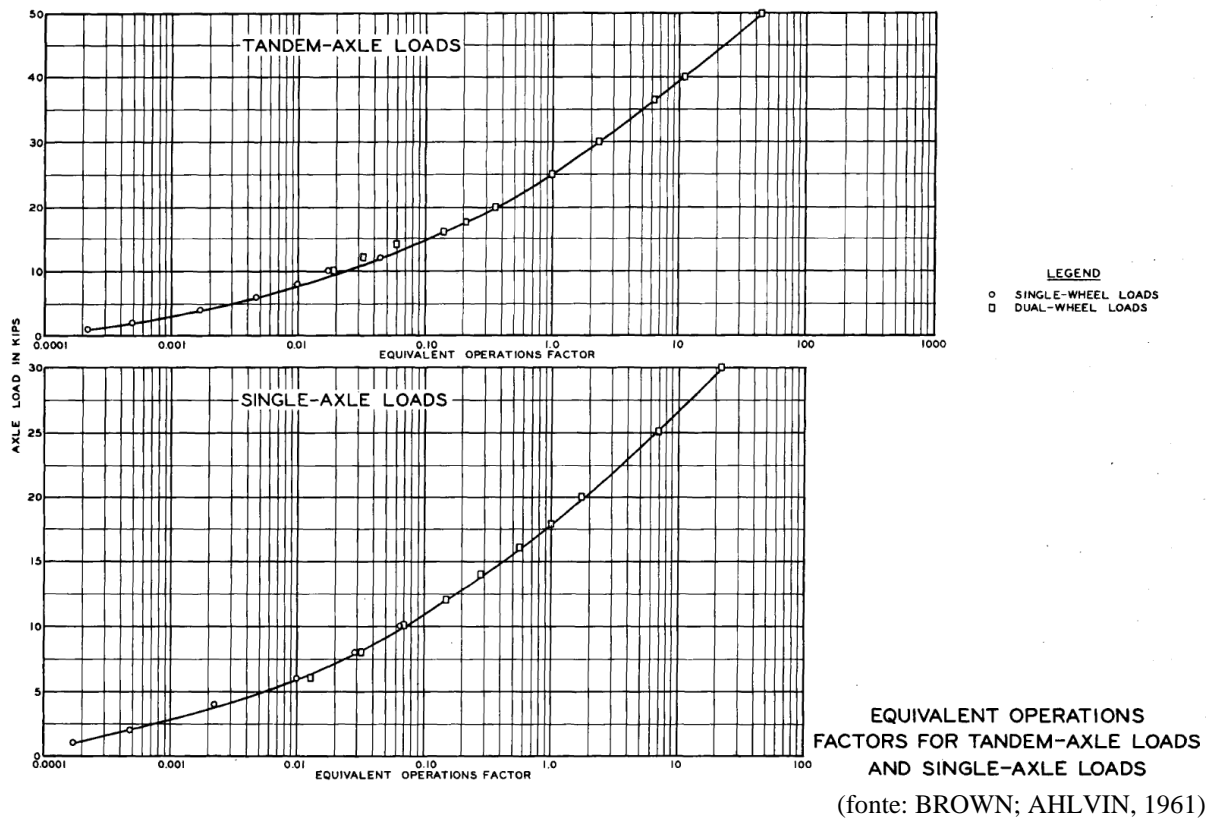
P = peso bruto total sobre o eixo, em tf

(fonte: BRASIL, 2006a)

Outra abordagem bastante emblemática historicamente é a de fatores de equivalência de rodas, ou *equivalent wheel load factor (EWLF)*, conceitualmente similar à discutida acima, buscando converter o impacto de uma roda (ou conjunto de rodas) com determinada carga no impacto de uma “roda padrão”. Foi utilizando essa abordagem que o Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano (*U.S. Army Corps of Engineers – USACE*) desenvolveu seu método de dimensionamento de pavimentos aeroportuários (YODER; WITCZAK, 1975). O método foi baseado no *Método CBR*, que já era utilizado pela *California Division of Highways*, decorrente de estudos durante os anos de 1928 e 1929 que avaliaram a relação entre a espessura do revestimento e o Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio – CBR*) do solo de pavimentos satisfatórios e com falha. Baseado nessa relação, construíram-se faixas de espessura de revestimento *versus* CBR do subleito que seriam adequadas para que o pavimento não apresentasse falhas. Por sua simplicidade de aplicação, o método foi selecionado pelo Corpo de Engenheiros no início da Segunda Guerra Mundial para servir de base para o dimensionamento de suas pistas de pouso e decolagem. Na adequação do método, assumiu-se que a curva ideal proposta pelo método do CBR seria representativa de uma roda de avião de 12.000 libras, enquanto novas curvas foram derivadas para rodas mais carregadas e de diferentes configurações com base no conceito de deflexão equivalente do subleito, calculadas à luz da teoria de uma camada de Boussinesq.

Com o conhecimento adquirido na construção das pistas aeroportuárias, e com o fim da guerra em 1945, o Corpo de Engenheiros voltou seus esforços para readaptar o método do CBR para utilização em pavimentos rodoviários. Os resultados obtidos foram publicados em 1961, com o título de *Revised Method of Thickness Design for Flexible Highway Pavements at Military Installations* (BROWN; AHLVIN, 1961). Nele, foram apresentadas as curvas obtidas para os fatores de operações equivalentes para ESRS, ESRD e ETD com diferentes cargas, em termos de um eixo padrão (ESRD) de 18.000 libras (i.e. o fator para o ESRD de 18 kip é igual a 1).

Figura 4 - Fatores de operações equivalentes calculados pela USACE



Os resultados foram reapresentados no ano seguinte, em 1962, por Turnbull, Foster e Ahlvin no trabalho *Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*, que ultimamente serviu de base para o *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis* do DNER, desenvolvido por Souza (1981) e em vigor até hoje no Brasil. As curvas adaptadas por Souza também são encontradas no *Manual de Estudos de Tráfego* do DNIT (BRASIL, 2006a), equacionadas conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Fatores de equivalência da USACE, segundo o Manual de Estudos de Tráfego do DNIT

Tipo de eixo	Faixas de carga [t]	Fator de equivalência de carga
ESRS e ESRD	0 - 8	$FC = 2,0782 \cdot 10^{-4} \cdot P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \cdot 10^{-6} \cdot P^{6,2542}$
ETD	0 - 11	$FC = 1,5920 \cdot 10^{-4} \cdot P^{3,472}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \cdot 10^{-6} \cdot P^{5,484}$
ETT	0 - 18	$FC = 8,0359 \cdot 10^{-5} \cdot P^{3,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,3229 \cdot 10^{-7} \cdot P^{5,5789}$

P = peso bruto total sobre o eixo, em tf

(fonte: BRASIL, 2006a)

2.2.3 Classificação de Veículos

Dada a enorme variedade de marcas e modelos de veículos que trafegam nas rodovias, é comum, ao analisar uma frota, agrupar veículos com características semelhantes em um número mais limitado de categorias. Essas classificações têm como objetivo avaliar a heterogeneidade intrínseca da frota sem perder de vista a praticidade, podendo variar dependendo do foco da análise em questão.






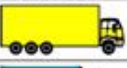


























Uma divisão extremamente simples, mas ainda útil para estudos de capacidade de tráfego, por exemplo, pode separar a frota em veículos de passeio (ou leves) – onde podem ser agrupados motos, automóveis e utilitários – e veículos comerciais (ou pesados) – com ônibus e caminhões. Uma classificação desse tipo é utilizada no *Highway Capacity Manual* (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010), que inclui como veículos pesados, ainda, os veículos recreacionais (*recreational vehicles – RV*), também conhecidos no Brasil como *trailers* ou *motor-homes*. Esse tipo de classificação é bastante semelhante ao utilizado pelo DER/SP (SÃO PAULO (Estado), 2021), que agrupa veículos como leves – automóveis e utilitários de 2 eixos e 4 rodas –, médios – caminhões de 2 eixos –, pesados – caminhões de 3 eixos e 6 rodas –, semirreboques e reboques – caminhões com 4 ou mais eixos – e ônibus – veículos de transporte coletivo.

Nos Estados Unidos, a *Federal Highway Administration (FHWA)* é um pouco mais minuciosa na sua classificação. Ao todo, 13 classes de veículos são descritas, sendo três classes referentes a motos, veículos de passeio e utilitários, uma a ônibus e as demais destinadas a veículos de carga (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2013). O Quadro 3 apresenta as 13 classes utilizadas pela FHWA e suas respectivas silhuetas.

No Brasil, a classificação mais utilizada para fins de pesagem veicular é a do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), apresentada no *Quadro de Fabricantes de Veículos (QFV)*, que inclui 120 classes diferentes de veículos comerciais (BRASIL, 2021a). Dependendo do comprimento do veículo, 36 dessas classes possuem uma subclassificação, totalizando 156 classes possíveis. Elas são divididas em:

- a) veículos de carga com peso bruto total de até 57 t – e que podem, portanto, trafegar sem portar Autorização Especial de Trânsito (AET) –, com 105 classes;
- b) veículos de carga que necessitam de AET (PBT > 57 t), com 21 classes;
- c) ônibus, com 30 classes.

Quadro 3 - Classes e silhuetas utilizadas pela FHWA

Class 1 Motorcycles		Class 7 Four or more axle, single unit	
Class 2 Passenger cars		Class 8 Four or less axle, single trailer	
			
			
			
Class 3 Four tire, single unit		Class 9 5-Axle tractor semitrailer	
			
			
Class 4 Buses		Class 10 Six or more axle, single trailer	
			
			Class 11 Five or less axle, multi trailer
Class 5 Two axle, six tire, single unit		Class 12 Six axle, multi-trailer	
			
			Class 13 Seven or more axle, multi-trailer
Class 6 Three axle, single unit			
			
			

(fonte: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2013)

Conforme descrito no *Manual de Estudos de Tráfego* (BRASIL, 2006a), cada uma das classes do QFV é representada por um código alfanumérico, onde o primeiro algarismo representa o número de eixos do veículo simples ou da unidade tratora, enquanto o segundo algarismo, se existente, indica a quantidade de eixos da(s) unidade(s) rebocada(s). Ainda segundo o manual, as letras do código alfanumérico representariam:

C = veículo simples (caminhão ou ônibus) ou veículo trator + reboque;

S = veículo trator (cavalo mecânico) + semirreboque;

I = veículo trator + semirreboque com distância entre eixos > 2,40 m (eixos isolados);

J = veículo trator + semirreboque com um eixo isolado e um eixo em tandem;

D = combinação dotada de 2 (duas) articulações;

T = combinação dotada de 3 (três) articulações;

Q = combinação dotada de 4 (quatro) articulações;

X = veículos especiais;





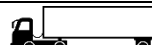


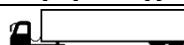
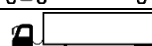
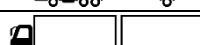

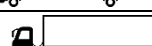
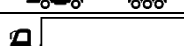
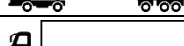
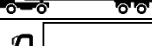
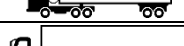







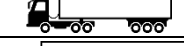
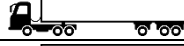
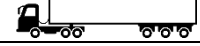






B = ônibus.






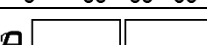

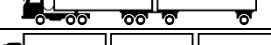
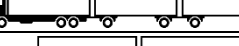
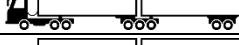


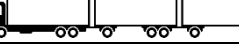


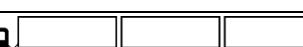

Dessa forma, um veículo de classe 2C seria um veículo simples com 2 eixos, enquanto a classe 2S3 indicaria um semirreboque cuja unidade tratora (cavalo mecânico) possui 2 eixos, acoplado a um semirreboque com 3 eixos. Entretanto, desde a publicação do manual em 2006, novas classes e nomenclaturas foram incorporadas ao QFV. A versão mais recente do quadro, de 2021, apresenta classes como 2N3, 2L4, 3V5, 3P5, 3M6, 4R4, entre outras, que não seguem a nomenclatura apontada pelo manual. Além dessas, outras combinações são observadas no quadro, como o veículo 4DS – caminhão trator com semirreboque, com total de 6 eixos individuais – ou o 4DT – caminhão trator com semirreboque, com total de 7 eixos individuais –, por exemplo, que não parecem seguir a mesma lógica de número de eixos.

Com relação as cargas máximas transportadas por cada classe, dentre os caminhões, a classe mais leve é a 2CC, composta por dois ESRS e com limite de 12 t. Outro veículo leve, e muito comum nas estradas brasileiras, é o de classe 2C, composto por um ESRS e um ESRD, com limite de 16 t. No outro extremo, a classe mais pesada observada no QFV é a 3D6, com peso limite de 80 t distribuído em um ESRS, quatro ESRD e dois ETD, totalizando 7 grupos de eixo e 9 eixos individuais. Para os ônibus, a classe mais leve é a 2BC, com limite de 12 t, enquanto as mais pesadas são a B3I e a 32B, com 43 t.

De forma a simplificar a classificação apresentada pelo QFV, o próprio DNIT propõe um agrupamento de algumas das classes do quadro. Em seu *Plano Nacional de Contagem de Tráfego* (PNCT), o departamento indica um total de 11 grupos, de forma semelhante àquela apresentada pela FHWA, agrupados em termos de número de eixos. Destes, dois grupos englobam motocicletas, veículos de passeio e utilitários, outros dois representam ônibus e caminhões leves e outros 6 dizem respeito aos demais veículos de carga (BRASIL, 2021b). Os grupos propostos pelo PNCT podem ser visualizados no Quadro 4.

Quadro 4 - Agrupamento das classes DNIT, conforme proposto no PNCT

Grupo PNCT	Qtd eixos	Composições	Silhueta	Classe DNIT
A	2	Ônibus		2CB
		Caminhão simples		2C
B	3	Ônibus trucado		3BC
		Caminhão trucado		3C
		Caminhão + semirreboque		2S1
C	4	Caminhão duplo direcional trucado		4CD
		Caminhão + semirreboque		2S2
				2I2
				3S1
		Caminhão + reboque		2C2
		Caminhão + 2 reboques		2DL
D	5	Caminhão + semirreboque		2S3
				2I1
				2I3
		Caminhão trucado + semirreboque		3S2
				3I2
		Caminhão + reboque		2C3
		Caminhão trucado + reboque		3C2
		Caminhão + semirreboque + reboque		2N3
		Caminhão + 2 semirreboques		3DL
				2LD
	2JD			
E	6	Caminhão + semirreboque		3S3
				3I1
				3I3
		Caminhão duplo direcional trucado + reboque		4R2
		Caminhão + reboque		2R4
		Caminhão trucado + reboque (Romeu e Julieta)		3C3
		Caminhão trucado + semirreboque + reboque		3N3
		Caminhão + semirreboque + reboque		2N4
				2L4
	2J4			

Grupo PNCT	Qtd eixos	Composições	Silhueta	Classe DNIT
		Caminhão trucado + 2 semirreboques		3JD
				3LD
		Caminhão + 2 semirreboques		2D4
F	7	Caminhão duplo direcional trucado + reboque		4R3
		Caminhão trucado + reboque (Romeu e Julieta)		3D4
		Caminhão trucado + 2 semirreboques (bitrem articulado)		3T4
		Caminhão trucado + semirreboque + reboque		3N4
		Caminhão trucado + 2 reboques		3Q4
G	8	Caminhão trucado + 2 semirreboques (bitrem articulado)		3V5
				3P5
		Caminhão trucado + semirreboque + reboque		3J5
		Caminhão + 2 reboques		3M5
H	9	Caminhão trucado + 2 semirreboques		3M6
		Caminhão trucado + semirreboque + reboque com dolly (rodotrem)		3T6
		Caminhão trucado + 3 semirreboques (tritrem)		3R6
I	2	Veículos de passeio e utilitários		TP
J	2	Motocicletas		TP
L	-	Outros	-	L

(fonte: adaptado de BRASIL, 2021a)

2.3 LIMITES LEGAIS DE CARGA

Embora o número elevado de variáveis envolvidas nas análises – clima, tipo de eixo, composição da frota, etc. – não permita um consenso acerca do impacto do nível de carga da frota sobre o pavimento, fica claro pela bibliografia consultada que essa é uma parcela relevante no comportamento dessas estruturas. Assim, da preocupação com a conservação das rodovias e com o dano causado pelos excessos de cargas, surge a necessidade de estabelecerem-se limites e legislações para o controle e fiscalização das cargas transportadas por esse modal.

De forma geral, esse controle pode ser realizado de duas formas: (i) pela carga total de cada veículo – peso bruto total (PBT) ou peso bruto total combinado (PBTC); (ii) pela carga transmitida ao pavimento por cada um dos eixos – ou grupos de eixos – de forma individual. A primeira, dependendo do tipo de pesagem utilizada, pode ter a vantagem da simplicidade e do

menor número de informações a serem verificadas. Entretanto, essa forma de controle pode mascarar a real fonte do dano causado aos pavimentos: a carga aplicada sobre o pavimento por cada um dos pneus do veículo. É justo considerar que as cargas se distribuam de forma aproximadamente uniforme entre os dois lados de um mesmo eixo (PAIS et al., 2019), assim como em diferentes eixos em um grupo de eixos do tipo tandem. Sendo assim, a pesagem por eixo – ou por grupo de eixos em tandem – permite fiscalizar de forma mais direta e efetiva a real fonte de dano aos pavimentos.

Conforme discutido anteriormente, diferentes tipos de eixo interagem de forma igualmente distinta com o pavimento. Portanto, é natural que os limites de carga por eixo variem de acordo com o tipo de eixo. A seguir, são discutidas as cargas máximas admitidas no Brasil, com uma breve contextualização histórica das alterações na legislação de cargas no país. Além disso, a título comparativo, também são apresentadas as cargas limites aceitas em outros países.

2.3.1 A Legislação de Cargas no Brasil

Os limites legais de carga no Brasil são historicamente estabelecidos considerando dois aspectos: (i) limite máximo de peso bruto total e de peso bruto transmitido por eixo; e (ii) tolerâncias admitidas além dos limites máximos estabelecidos. Como será visto adiante, o primeiro se manteve praticamente inalterado desde sua instituição, enquanto o segundo passou por alterações substanciais ao longo das últimas décadas.

O primeiro registro encontrado que faz menção a limites legais de carga no Brasil data de 1968, referente ao Regulamento do Código Nacional de Trânsito aprovado pelo Decreto nº 62.127 (BRASIL, 1968), cujo artigo 82 estabelecia:

I - Pêso [sic passim] bruto total por veículo ou combinação de veículos: 40 (quarenta) toneladas;

II - Pêso bruto por eixo isolados: 10 (dez) toneladas;

III - Pêso bruto por conjunto de 2 (dois) eixos tandem, quando a distância entre os dois planos verticais que contenham os centros das rodas fôr [sic passim] superior a 1,20m (um metro e vinte centímetros) e inferior ou igual a 2,40m (dois metros e quarenta centímetros): 17 (dezessete) toneladas;

IV - Pêso bruto por conjunto de 2 (dois) eixos não em tandem, quando a distância entre os 2 (dois) planos verticais que contenham os centros das rodas fôr superior a 1,20m (um metro e vinte centímetros) e inferior ou igual a 2,40m (dois metros e quarenta centímetros): 15 (quinze) toneladas.

Além disso, o artigo 83 citava que para “[...] eixos isolados, dotados de 2 (dois) pneumáticos, o limite máximo de peso [sic] bruto por eixo, fixado no item II, do artigo anterior [Art. 82], será reduzido à metade” (BRASIL, 1968), instituindo o peso limite de 5 t para o ESRS. À exceção do limite do ESRS – definido como 6 t no Decreto nº 98.933 de 07 de fevereiro de 1990 –, os demais limites permanecem inalterados até hoje, apenas com a inclusão de novos tipos de eixo. É o caso do eixo tandem triplo, por exemplo, introduzido no mesmo decreto de 1990.

Desde 2006, a carga máxima legal (CML) por eixo era estabelecida pela Resolução nº 210/2006 do CONTRAN (BRASIL, 2006b). A resolução foi recentemente substituída pela Resolução CONTRAN nº 882, de 13 de dezembro de 2021 (BRASIL, 2021c), apesar de os limites, resumidos na Tabela 1, permanecerem inalterados.

Tabela 1 - Carga máxima legal por eixo no Brasil

Tipo de Eixo	Rodagem	Suspensão	Distância Entre Eixos [m]	Carga Máxima [kg]
Simple	Simple	Direcional	-	6.000
Simple	Dupla	-	-	10.000
Duplo	Dupla	Direcional	-	12.000
Duplo	Dupla	Tandem	$1,20 < d \leq 2,40$	17.000
Duplo	Dupla	Não Tandem	$1,20 < d \leq 2,40$	15.000
Duplo	Simple + Dupla	Especial	$d < 1,20$	9.000
Duplo	Simple + Dupla	Especial	$1,20 < d \leq 2,40$	13.500
Duplo	Extralarga	Pneumática	$1,20 < d \leq 2,40$	17.000
Tripl	Dupla	Tandem	$1,20 < d \leq 2,40$	25.500
Tripl	Extralarga	Pneumática	$1,20 < d \leq 2,40$	25.500

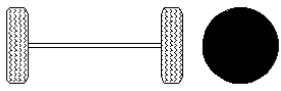
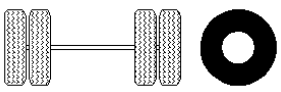
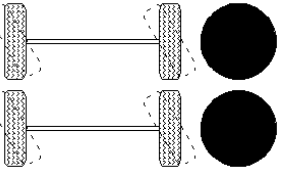
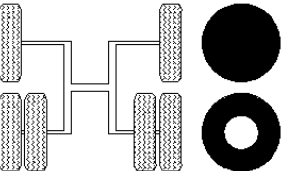
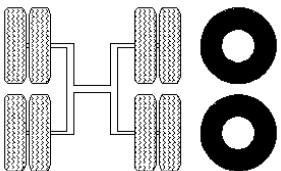
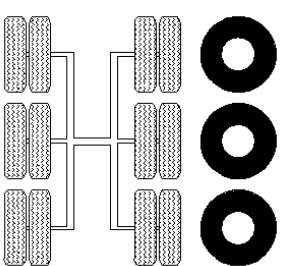
(fonte: baseado em BRASIL, 2021a)

Embora a Tabela 1, baseada no *Quadro de Fabricantes de Veículos* do DNIT (BRASIL, 2021a), apresente a discriminação de dez tipos diferentes de eixo, todos as 156 classes apontadas no próprio documento são compostas por uma combinação de apenas seis eixos distintos. Assim, o Quadro 5 resume algumas características desses seis principais tipos de eixo.

Para o caso específico de veículos de transporte coletivo de passageiros, a Resolução nº 502/2014 do CONTRAN acrescentava 1,0 t nas cargas máximas estabelecidas acima. A resolução também foi substituída pela Resolução CONTRAN nº 822/2021, onde o peso bruto por eixo de veículos de característica rodoviária para transporte coletivo de passageiros passa a ser limitado em:

- a) 7,0 t para eixos simples de dois pneumáticos (ESRS);
- b) 11,0 t para eixos simples de quatro pneumáticos (ESRD);
- c) 14,5 t para eixos duplos de seis pneumáticos (EM);
- d) 18,0 t para eixos duplos de oito pneumáticos (ETD);
- e) 13,0 t para dois eixos direcionais de dois pneumáticos cada (EDD).

Quadro 5 - Quadro resumo dos principais tipos de eixo encontrados no Brasil

Eixo	Descrição	Eixos	Pneus	Configuração e Silhueta	Carga Máxima Legal [kg]	Carga Máxima por Pneu [kg/pneu]
ESRS	Eixo Simples de Rodas Simples	1	2		6.000	3.000
ESRD	Eixo Simples de Rodas Duplas	1	4		10.000	2.500
EDD	Eixo Duplo Direcional	2	4		12.000	3.000
EM	Eixo Misto	2	6		13.500	2.250
ETD	Eixo Tandem Duplo	2	8		17.000	2.125
ETT	Eixo Tandem Triplo	3	12		25.500	2.125

Entretanto, a resolução explicita que os limites não se aplicam a veículos de característica urbana para transporte coletivo de passageiros, e que eles só prevalecem se todos os pneumáticos de um mesmo conjunto de eixos forem da mesma rodagem e calçarem rodas no mesmo diâmetro.

Além das cargas máximas legais estabelecidas pelo CONTRAN, a legislação brasileira de cargas permite, desde 1985, que veículos trafeguem com sobrecarga, desde que dentro de um nível de tolerância aceitável. Essa tolerância teria como função compensar o erro máximo observados nas balanças, de forma a não autuar indevidamente um veículo em decorrência de uma imprecisão intrínseca aos sistemas de pesagem. Com isso, entrou em vigor em 25 de novembro de 1985 a Lei nº 7.408 (BRASIL, 1985), permitindo uma tolerância máxima de 5% sobre os limites de peso bruto total e peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias públicas.

Desde então, essa tolerância legal na pesagem de veículos sofreu diversas alterações, resumidas no Quadro 6 e na Figura 5. Em 1999, a Resolução nº 102 do CONTRAN (BRASIL, 1999a) passou a tratar de forma distinta a pesagem por eixo, flexibilizando sua tolerância máxima para 7,5%. Ainda em 1999, entrou em vigor a Resolução nº 104 do CONTRAN (BRASIL, 1999b), ratificando a tolerância de 7,5% na pesagem por eixo e reforçando que fica mantida a tolerância de 5% no PBT, conforme Lei nº 7.408/85. Esta resolução dispõe, ainda, sobre o remanejamento e transbordo das cargas quando constatado excesso em algum de seus eixos ou conjuntos de eixos, caso no qual os veículos não seriam multados, mas só seriam liberados após sanada a irregularidade. Oito anos depois, surge a Resolução 258/2007 do CONTRAN (BRASIL, 2007) que, dentre outras providências, prevê que a tolerância máxima de 7,5% na pesagem por eixo, em vigor até então, só ficaria permitida até 31 de dezembro de 2008, a partir de quando a tolerância máxima admissível na pesagem por eixo retornaria ao valor de 5%, mantida a mesma tolerância no PBT. Além disso, a Resolução 258, no seu artigo 9º, indica que (BRASIL, 2007):

[...] o veículo poderá prosseguir viagem sem remanejamento ou transbordo, desde que os excessos aferidos sejam simultaneamente inferiores a 5% (cinco por cento) do limite para cada tipo de eixo, ou seja:

I - 300 kg no eixo direcional;

II - 500 kg no eixo isolado;

III - 850 kg por conjuntos de eixos em tandem duplo, e;

IV - 1275 kg no conjunto de eixos em tandem triplo.

Não fica claro, porém, se tais excessos seriam cumulativos à tolerância vigente de 7,5%, o que na prática permitiria o tráfego de excessos de até 12,5% nos eixos sem a necessidade de transbordo, desde que não fosse verificado excesso superior a 5% no PBT. Tal interpretação só se torna explícita sete anos depois, com a publicação da Resolução 489/2014 do CONTRAN (BRASIL, 2014a), cujo artigo 2º indica que “[...] o veículo poderá prosseguir viagem sem remanejamento ou transbordo, desde que os excessos aferidos em cada eixo ou conjunto de eixos sejam simultaneamente inferiores a 12,5% [...]”, e que essa tolerância “[...] não será cumulativa aos limites estabelecidos”. É nessa mesma resolução de 2014 que fica claro que a tolerância na pesagem por eixo – prevista para retornar ao valor de 5% a partir de janeiro de 2009 em decisão dada pela Resolução nº 258 do CONTRAN e prorrogada pelas resoluções 301/2008, 328/2009, 337/2009, 353/2010, 365/2010, 403/2012, 430/2013 e 467/2013 – não retornará para aquele valor, mas passará a ser de 7,5% do limite por eixo para veículos que excederem a tolerância de 5% no PBT, e de 10% do limite do eixo para veículos não o excederem.

Quadro 6 - Quadro resumo das alterações das tolerâncias aceitas em pesagens veiculares no Brasil

Data	Lei/Resolução	Descrição
25/11/1985	Lei nº 7.408	Tolerância de 5% no PBT e no eixo
31/08/1999	Resolução CONTRAN nº 102	Tolerância de 7,5% no eixo
21/12/1999	Resolução CONTRAN nº 104	Tolerância de 5% no PBT e 7,5% no eixo
30/11/2007	Resolução CONTRAN nº 258	Previsão de retorno da tolerância de 5% no eixo a partir de 2009; necessidade de transbordo apenas para excessos superiores a 12,5%* no eixo
18/12/2008	Resolução CONTRAN nº 301	Alteração do prazo para o retorno da tolerância de 5% no eixo
14/08/2009	Resolução CONTRAN nº 328	Alteração do prazo para o retorno da tolerância de 5% no eixo
17/12/2009	Resolução CONTRAN nº 337	Alteração do prazo para o retorno da tolerância de 5% no eixo
24/06/2010	Resolução CONTRAN nº 353	Alteração do prazo para o retorno da tolerância de 5% no eixo
24/11/2010	Resolução CONTRAN nº 365	Alteração do prazo para o retorno da tolerância de 5% no eixo
26/04/2012	Resolução CONTRAN nº 403	Alteração do prazo para o retorno da tolerância de 5% no eixo
23/01/2013	Resolução CONTRAN nº 430	Alteração do prazo para o retorno da tolerância de 5% no eixo
11/12/2013	Resolução CONTRAN nº 467	Alteração do prazo para o retorno da tolerância de 5% no eixo
05/06/2014	Resolução CONTRAN nº 489	Tolerância de 5% no PBT e 7,5% no eixo (para veículos que excederem a tolerância do PBT) ou 10% no eixo (para veículos dentro da tolerância do PBT); necessidade de transbordo apenas para excessos superiores a 12,5% no eixo
02/03/2015	Lei nº 13.103	Tolerância de 5% no PBT e 10% no eixo
21/10/2021	Lei nº 14.229	Tolerância de 5% no PBT e 12,5% no eixo; veículos com PBT ≤ 50 t que não excederem a tolerância de 5% estão dispensados da fiscalização por eixo

*O limite de 12,5% depende da interpretação dada ao art. 9º da Resolução nº 258.

(fonte: BRASIL, 1985, 1999a, 1999b, 2007, 2014, 2015, 2021a)

Figura 5 - Linha do tempo das alterações das tolerâncias aceitas em pesagens veiculares no Brasil

		Tolerância PBT	Tolerância eixo	Limite transbordo
1985	Lei nº 7.408	5,0%	5,0%	
1986		5,0%	5,0%	
1987		5,0%	5,0%	
1988		5,0%	5,0%	
1989		5,0%	5,0%	
1990		5,0%	5,0%	
1991		5,0%	5,0%	
1992		5,0%	5,0%	
1993		5,0%	5,0%	
1994		5,0%	5,0%	
1995		5,0%	5,0%	
1996		5,0%	5,0%	
1997		5,0%	5,0%	
1998		5,0%	5,0%	
1999	Resolução CONTRAN nº 102 e 104	5,0%	7,5%	
2000		5,0%	7,5%	
2001		5,0%	7,5%	
2002		5,0%	7,5%	
2003		5,0%	7,5%	
2004		5,0%	7,5%	
2005		5,0%	7,5%	
2006		5,0%	7,5%	
2007	Resolução CONTRAN nº 258	5,0%	7,5%	12,5%²
2008	Resolução CONTRAN nº 301	5,0%	7,5%	12,5% ²
2009	Resolução CONTRAN nº 328 e 337	5,0%	7,5% ¹	12,5% ²
2010	Resolução CONTRAN nº 353 e 365	5,0%	7,5% ¹	12,5% ²
2011		5,0%	7,5% ¹	12,5% ²
2012	Resolução CONTRAN nº 403	5,0%	7,5% ¹	12,5% ²
2013	Resolução CONTRAN nº 430 e 467	5,0%	7,5% ¹	12,5% ²
2014	Resolução CONTRAN nº 489	5,0%	10,0%	12,5%
2015	Lei nº 13.103	5,0%	10,0%	12,5%
2016		5,0%	10,0%	12,5%
2017		5,0%	10,0%	12,5%
2018		5,0%	10,0%	12,5%
2019		5,0%	10,0%	12,5%
2020		5,0%	10,0%	12,5%
2021	Lei nº 14.229	5,0%	12,5%³	12,5%³

¹ Entre 2009 e 2014, havia previsão de retorno da tolerância no eixo ao valor de 5% (art. 5º e art. 17 da Resolução nº 258).

² O limite de 12,5% entre 2007 e 2014 depende da interpretação dada ao art. 9º da Resolução nº 258.

³ O limite de 12,5% é aplicável apenas a veículos com PBT regulamentar superior a 50 t.

(fonte: elaborado pelo autor)

Após as diversas resoluções publicadas pelo CONTRAN entre 1999 e 2014, a Presidência da República publica, em 2 de março de 2015, a Lei nº 13.103 – também conhecida como *Lei do Caminhoneiro*. Além de outras providências a respeito da profissão de motorista, transporte autônomo de carga, etc., a lei altera aquela de 1985, ficando permitida a tolerância máxima de 5% no PBT e de 10% sobre os limites de peso bruto transmitido por eixo (BRASIL, 2015).

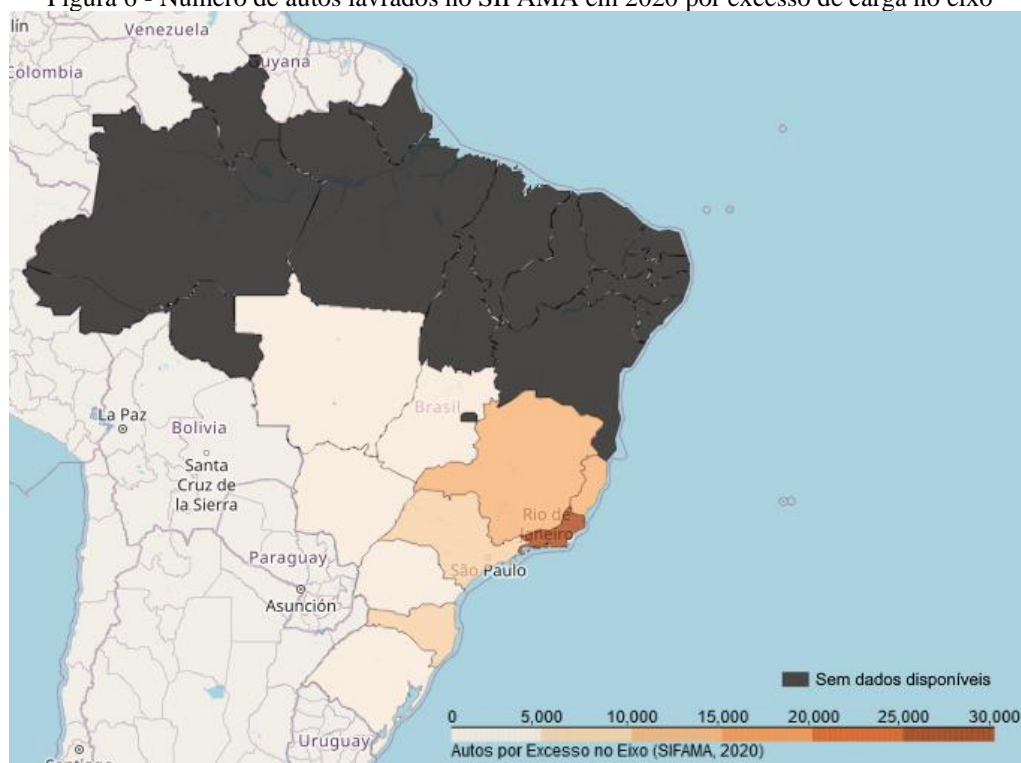
Ainda que outras resoluções tenham sido emitidas acerca do assunto após a publicação da Lei do Caminhoneiro, as tolerâncias permaneceram, de forma geral, inalteradas até 2021, quando da publicação da Lei nº 14.229. A lei mais recente mantém a tolerância de 5% na fiscalização

por PBT, mas flexibiliza para 12,5% a tolerância por eixo (BRASIL, 2021d), além de liberar da fiscalização por eixo os veículos com PBT regulamentar igual ou inferior a 50 t, desde que não seja ultrapassado a tolerância de 5% no PBT. Caso sejam observados excessos acima de 5% no PBT, mesmo os veículos abaixo de 50 t deverão ser submetidos à fiscalização por eixo e, constatados excessos, serão aplicadas as penalidades cumulativamente. Segundo o ministro da infraestrutura, Tarcísio Gomes de Freitas, as alterações seriam motivadas pela modernização e adequação ao novo regulamento metrológico (BRASIL, 2021e). Em 2020, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) publicou a Portaria nº 367, que alterou os erros máximos admissíveis dos instrumentos de pesagem automática de veículos rodoviários em movimento em vigor até então (BRASIL, 2020a). A nova portaria criou três classes de exatidão a serem atendidas pelos equipamentos na pesagem por eixo e PBT, variando de mais a menos precisa, conforme melhor detalhado na seção 2.4. Tais classes, somadas às tolerâncias mais flexíveis nas pesagens veiculares, podem permitir que sistemas de pesagem em movimento de alta velocidade (*high-speed weigh-in-motion – HS-WIM*) passem a operar como instrumento de fiscalização, evitando a necessidade da custosa construção de postos de pesagem fixos e ampliando a rede de fiscalização das cargas transportadas no Brasil.

Embora a flexibilização das tolerâncias tenha como justificativa a adequação das medições aos erros máximos admissíveis, inerentes a qualquer dispositivo de medição, um possível efeito colateral seria a utilização dessas margens de tolerância como uma extensão do limite legal de cargas. Isso é particularmente problemático se considerarmos que o avanço natural das tecnologias tende a diminuir os potenciais erros de medição dos equipamentos, o que diminuiria a necessidade de tolerâncias para cobrir estes erros de leitura. Em decorrência, diversos estudos apontam para um número considerável de veículos com excessos de carga acima dos limites legais brasileiros. Em uma campanha de pesagens utilizando um sistema de pesagem em movimento na BR-290/RS, Brito et al. (2013) observaram que, dentre os mais de 100.000 veículos pesados, cerca de 10% apresentavam excesso em pelo menos um de seus eixos. Em outro estudo, Bosso et al. (2019) concluíram, por meio de um modelo de árvore de regressão, que a probabilidade de um caminhão apresentar sobrecarga na Fernão Dias – BR-381, trecho entre Contagem/MG e Guarulhos/SP – é de 28,9%. Já Romeiro Júnior et al. (2020) retrataram que os percentuais de eixos acima da CML seriam de cerca de 20% para os ESRS e ETD, de 7,5% para os ESRD e de quase 30% para os ETT.

Em consonância, dados de autos de infração de trânsito lavrados por meio do Sistema Integrado de Fiscalização, Autuação, Multa e Arrecadação (SIFAMA), publicados pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), retratam que 98.640 veículos foram autuados no ano de 2020 por excessos acima das tolerâncias de eixo, PBT ou ambas (BRASIL, 2021f), conforme representado pelas figuras 6 a 8. Em 2014, o número relatado pela Agência foi de 83.810 veículos autuados – um aumento de 17,7% no período. O estado do Rio de Janeiro é o que apresenta maior número de autos em todas as categorias, seguido dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Entretanto, vale ressaltar que os valores absolutos podem ser fruto da maior abrangência da fiscalização nesses períodos e estados, e não necessariamente de um perfil mais sobrecarregado da frota. A recíproca é verdadeira para os estados em que não há dados de multa disponíveis, retratados pela área escura do mapa.

Figura 6 - Número de autos lavrados no SIFAMA em 2020 por excesso de carga no eixo

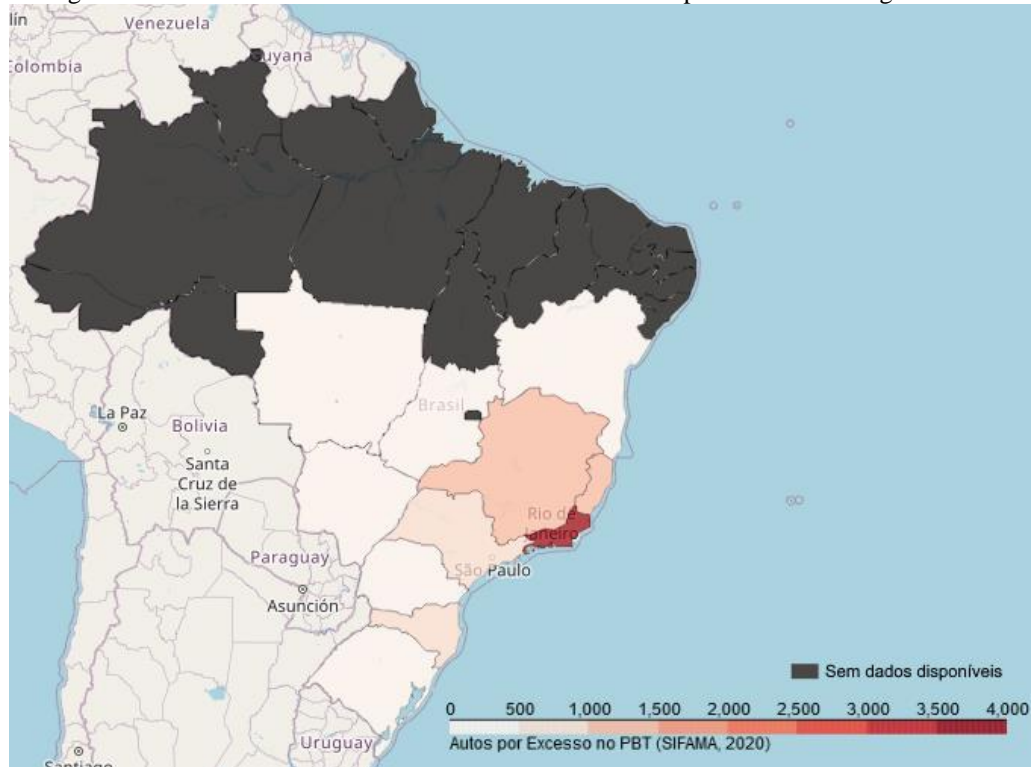


(fonte: baseado em BRASIL, 2021)

Em resumo, percebe-se que a Legislação Brasileira vem se tornando cada vez mais flexível com relação às tolerâncias admitidas na pesagem veicular no país. Como consequência, estudos e projetos de pavimentos desenvolvidos nas últimas décadas podem ter sido penalizados por essas alterações. Esse é o caso de estudos desenvolvidos entre 1985 e 1999, por exemplo, que previam um cenário de excessos máximos de 5% no PBT e nos eixos. Também podem ter sido afetados estudos realizados entre 2009 e 2014 – período no qual havia expectativa do retorno da tolerância máxima de 5% na pesagem por eixo – e aqueles desenvolvidos entre 2015 e 2021 –

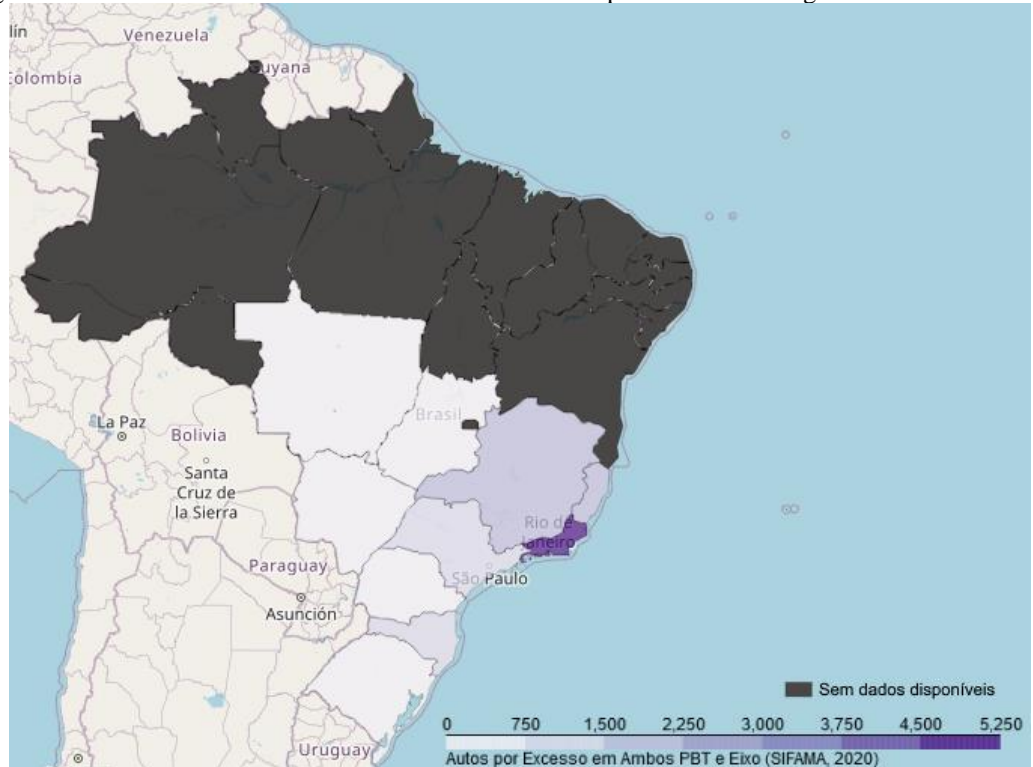
com um cenário de tolerância de 10% no eixo –, ainda que nesse período houvesse o conhecimento de cargas até 12,5% poderiam continuar rodando sem necessidade de transbordo.

Figura 7 - Número de autos lavrados no SIFAMA em 2020 por excesso de carga no PBT



(fonte: baseado em BRASIL, 2021)

Figura 8 - Número de autos lavrados no SIFAMA em 2020 por excesso de carga em ambos eixo e PBT



(fonte: baseado em BRASIL, 2021)

2.3.2 Limites de Carga Adotados ao Redor do Mundo

A Legislação Brasileira não é a única a apresentar limitações com relação às cargas máximas transportadas em rodovias por veículos comerciais, tampouco é a única a ser flexibilizada com o tempo. Em 1956, o *Federal-Aid Highway Act* estipulou cargas máximas admissíveis no sistema rodoviário interestadual dos Estados Unidos, sendo de 18.000 lb (8,16 t) para os eixos simples, 32.000 lb (14,51 t) para os eixos tandem duplos e 73.280 lb (33,24 t) para o peso bruto total dos veículos (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2020). Quase 20 anos mais tarde, em 1975, o Congresso Americano flexibilizou os limites anteriores para 20.000 lb (9,07 t), 34.000 lb (15,42 t) e 80.000 lb (36,29 t), respectivamente, ficando a critério de cada estado a adoção dos novos limites. As dificuldades impostas ao transporte de cargas interestadual pelo fato de alguns estados – principalmente ao longo do Rio Mississippi – se oporem a adotar os novos limites fez com que o Congresso alterasse novamente a legislação em 1982. Desde então, os novos limites passaram a ser obrigatórios em todo o território americano, ficando permitido a cada estado ser mais flexível do que os valores mínimos estabelecidos. A Tabela 2 apresenta as cargas máximas toleradas atualmente em cada estado americano para veículos de até 6 eixos.

Tabela 2 - Cargas máximas legais em vigor nos Estados Unidos

Estado	PBT [kg]		Eixo Simples [kg]		Eixo Tandem Duplo [kg]	
	Inter-estaduais	Outras Rodovias	Inter-estaduais	Outras Rodovias	Inter-estaduais	Outras Rodovias
Alabama	36.287	38.102	9.072	9.072	15.422	18.144
Alaska	-	40.823	-	9.072	-	17.237
Arizona	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Arkansas	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Califórnia	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Colorado	36.287	38.555	9.072	9.072	16.329	18.144
Connecticut	36.287	36.287	10.160	10.160	16.329	16.329
Delaware	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	18.144
D.C.	36.287	36.287	9.979	9.979	17.237	17.237
Flórida	36.287	36.287	9.979	9.979	19.958	19.958
Geórgia	36.287	36.287	9.226	9.226	16.783	16.937
Havaí	36.650	39.916	10.206	10.206	15.422	15.422
Idaho	36.287	47.854	9.072	9.072	15.422	15.422
Illinois	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Indiana	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Iowa	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Kansas	36.287	38.782	9.072	9.072	15.422	15.422
Kentucky	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422

continua

Estado	PBT [kg]		Eixo Simples [kg]		Eixo Tandem Duplo [kg]	
	Inter-estaduais	Outras Rodovias	Inter-estaduais	Outras Rodovias	Inter-estaduais	Outras Rodovias
Louisiana	36.287	36.287	9.072	9.979	15.422	16.783
Maine	36.287	36.287	9.072	10.160	15.422	17.237
Maryland	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Massachusetts	36.287	36.287	10.160	10.160	16.329	16.329
Michigan	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Minnesota	36.287	36.287	9.072	8.165	15.422	15.422
Mississippi	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Missouri	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Montana	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Nebraska	36.287	43.091	9.072	9.072	15.422	15.422
Nevada	36.287	58.513	9.072	9.072	15.422	15.422
New Hampshire	36.287	36.287	9.072	10.160	15.422	16.329
New Jersey	36.287	36.287	10.160	10.160	15.422	15.422
New Mexico	39.190	39.190	9.798	9.798	15.567	15.567
New York	36.287	36.287	9.072	10.160	15.422	16.329
North Carolina	36.287	36.287	9.072	9.072	17.237	17.237
North Dakota	36.287	47.854	9.072	9.072	15.422	15.422
Ohio	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Oklahoma	36.287	40.823	9.072	9.072	15.422	15.422
Oregon	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Pennsylvania	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Rhode Island	36.287	36.287	10.160	10.160	16.329	16.329
South Carolina	36.287	36.287	9.072	9.979	15.422	17.962
South Dakota	36.287	58.513	9.072	9.072	15.422	15.422
Tennessee	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Texas	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Utah	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Vermont	36.287	36.287	9.072	10.160	15.422	16.329
Virginia	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Washington	36.287	47.854	9.072	9.072	15.422	15.422
West Virginia	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Wisconsin	36.287	36.287	9.072	9.072	15.422	15.422
Wyoming	53.070	53.070	9.072	9.072	16.329	16.329
Média	36.697	38.707	9.239	9.346	15.712	15.980

(fonte: adaptado de FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2020)

A operação de combinações veiculares mais longas – *longer combination vehicles (LCVs)* –, com 7 ou mais eixos, ainda é bastante discutida nos Estados Unidos (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2020). Apenas 21 dos 50 estados americanos permitem a circulação de tais veículos, com cargas máximas que variam entre 86.400 lb (39,19 t) no Novo México até 164.000 lb (74,39 t) no estado de Michigan.

Assim como seu vizinho norte americano, a legislação de cargas canadense também é ditada por normas individuais de cada província. Entretanto, os esforços para uniformizar o transporte interprovincial são consideravelmente mais recentes. Em fevereiro de 1988, o *Council of Ministers Responsible for Transportation and Highway Safety* endossou um Memorando de Conhecimento com o intuito de uniformizar a legislação de cargas e dimensões dos veículos comerciais operando entre províncias e territórios no Canadá. Este memorando resultou, através de esforços da *Task Force on Vehicle Weights and Dimensions Policy* (CANADÁ, 2019), em um compilado dos limites para operações interprovinciais no país. Nele, são descritos os seguintes limites de carga por eixo, variáveis dependendo do tipo de veículo:

- a) para eixos direcionais, entre 5,5 e 7,3 t;
- b) para eixos simples, 9,1 t;
- c) para eixos duplos sem equalizador de cargas, 15,1 t;
- d) para eixos tandem duplos, 17,0 t;
- e) para eixos tandem triplos, entre 21,0 e 24,0 t.

Na União Europeia, os limites legais de carga são dados pela Diretiva 96/53/EC, de 25 de julho de 1996 (THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 1996), ainda que internamente cada país possa ter regulamentação mais flexível. Além de estabelecer os limites de PBT para diferentes composições veiculares, a diretiva apresenta também os limites de carga por eixo e por grupo de eixo (variável em função da distância d entre os eixos do grupo), sendo:

- a) para eixos simples, 10 t;
- b) para eixos duplos com $d < 1,0$ m, 11 t;
- c) para eixos duplos com $1,0 \text{ m} \leq d < 1,3$ m, 16 t;
- d) para eixos duplos com $1,3 \text{ m} \leq d < 1,8$ m, 18 t;
- e) para eixos duplos com $1,8 \text{ m} \leq d$, 20 t;
- f) para eixos triplos com $d \leq 1,3$ m, 21 t;
- g) para eixos triplos com $1,3 \text{ m} < d \leq 1,4$ m, 24 t;
- h) para eixos motores simples, 11,5 t;
- i) para eixos motores duplos com $d < 1,0$ m, 11,5 t;
- j) para eixos motores duplos com $1,0 \text{ m} \leq d < 1,3$ m, 16 t;
- k) para eixos motores duplos com $1,3 \text{ m} \leq d < 1,8$ m, 18-19 t.

Tal como a União Europeia, embora cada país possua sua própria legislação vigente, os membros do MERCOSUL também possuem acordos multilaterais com relação aos limites de

cargas nas rodovias. A Resolução nº 65 do MERCOSUL/GMC (MERCOSUL, 2008), de 28 de novembro de 2008, resumiu os limites de pesos permitidos para a circulação de veículos de transporte de carga e de passageiros no âmbito do MERCOSUL, conforme disposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites de carga por eixo no âmbito do MERCOSUL

Tipo de Eixo	Quantidade de Rodas	Limite [t]
Simplex	2	6,0
Simplex	4	10,5
Duplo	4	10,0
Duplo	6	14,0
Duplo	8	18,0
Triplex	6	14,0
Triplex	10	21,0
Triplex	12	25,5

(fonte: MERCOSUL, 2008)

Em comparação aos limites legais brasileiros, nota-se que a legislação norte-americana é mais rigorosa no controle de cargas, ainda que possam se encontrar limites mais flexíveis a depender do estado, província ou território. Com relação às normas da União Europeia, a comparação com o Brasil não é direta devido às várias subcategorias de eixos, mas de forma geral pode-se dizer que os limites são similares em ambas as legislações, com pequenas diferenças para mais ou para menos, de acordo com a configuração dos eixos. Por fim, ao analisar os limites impostos internacionalmente aos países do MERCOSUL, percebe-se que os limites são iguais ou até 5% superiores aos brasileiros. Isso dificulta ou até mesmo inviabiliza a redução dos limites de carga no Brasil, por vezes discutida no meio técnico, uma vez que a legislação brasileira não poderia ser mais rígida do que o estabelecido pelo acordo do MERCOSUL.

2.4 PESAGEM VEICULAR E A FISCALIZAÇÃO DE CARGAS

Conforme discutido nas seções anteriores, à medida que elevamos as cargas transmitidas ao pavimento, os danos causados crescem vertiginosamente – na ordem de uma curva de quarta potência (Equação 1). Com isso, limitar as cargas torna-se necessário para a mitigar os danos causados ao pavimento. Embora os limites legais de carga impostos por diferentes legislações ao redor do mundo, retratados na seção 2.3, tenham este propósito, a sua eficácia é altamente dependente da fiscalização imposta sobre a frota através de pesagens. Além disso, as pesagens veiculares também são fator de suma importância na caracterização adequada da frota para projetos e avaliações de pavimentos.

Diversas tecnologias vêm sendo utilizadas ao longo dos anos para a pesagem veicular em rodovias. De forma geral, elas podem ser divididas em dois tipos principais: pesagem estática e pesagem dinâmica. Na pesagem estática, é necessário que os veículos parem completamente sobre a balança para a aferição de seu peso. Esse tipo de pesagem é bastante utilizado na indústria e no agronegócio (BRASIL, 2018), tanto para efeitos de controle de carga – evitando que os transportadores sejam multados – quanto para efeitos de quantificação e precificação de cargas a granel, por exemplo. Dependendo do modelo da balança, a pesagem estática é capaz de aferir o peso bruto total (PBT) do veículo como um todo, ou ainda realizar a pesagem de cada um dos eixos de forma individual (BOSSO, 2018) – ainda que a primeira seja a mais comum. Inclusive, na experiência do autor, muito se discute sobre as dificuldades de embarcadores aferirem a distribuição da carga por eixo do veículo, já que a pesagem por PBT é a forma mais comum de pesagem dos veículos comerciais na origem do seu embarque.

Já a pesagem dinâmica – ou *weigh-in-motion (WIM)*, como é bastante conhecida – se propõe a realizar as pesagens com os veículos em movimento, sendo muito mais adequada para a fiscalização em rodovias com grande volume de tráfego, evitando que os veículos tenham que parar completamente para a aferição de suas cargas. Pesagens dinâmicas podem ser subdivididas em pesagens dinâmicas de alta velocidade – *high speed weigh-in-motion (HS-WIM)* –, quando o equipamento é capaz de verificar as cargas dos veículos em velocidades próximas à velocidade operacional da rodovia, ou de baixa velocidade – *low speed weigh-in-motion (LS-WIM)* –, quando é necessária a redução da velocidade dos veículos, ainda que não precisem parar por completo. Em ambos os casos, normalmente a pesagem é feita de forma individual por eixo, com o PBT do veículo sendo estimado através da soma do peso de cada um de seus eixos (BRITO et al., 2013).

Embora existam registros de pesagem em movimento já na década de 1950 (SUJON; DAI, 2021), sua popularidade e aplicabilidade vem ganhando maior destaque com o avanço de novas tecnologias. Em 2002, a *European Cooperation in Science and Technology (COST)* publicou a COST 323, que viria a ser um marco da aplicação da pesagem dinâmica em rodovias, com recomendações para seleção de local, instalação, operação e calibração de sistemas WIM (JACOB; O'BRIEN; JEHAES, 2002). No Brasil, vale destacar os convênios firmados entre o DNIT e o Laboratório de Transportes e Logística da Universidade Federal de Santa Catarina (LABTRANS/UFSC) para o desenvolvimento de pesquisas no tema. A parceria resultou em uma série de trabalhos, incluindo a implantação de um sistema de múltiplos sensores

piezoelétricos para testes na BR-101/SC, incluindo 16 piezo-quartzo, 16 piezo-cerâmicos e 16 piezo-polímeros (BRASIL, 2009). Outros exemplos de aplicação de sistemas WIM no Brasil podem ser encontrados na BR-290/RS (BRITO et al., 2013) e na BR-381/MG (BOSSO, 2018). Além dos sensores piezoelétricos mencionados acima, tubos pneumáticos, laços indutivos e sensores magnéticos e de fibra ótica são outros exemplos de tecnologias utilizadas em sistemas WIM, que podem ser instalados sobre ou sob o pavimento, ou até mesmo acoplados a obras de arte especiais como pontes e viadutos (BRITO et al., 2013; KAWAKATSU et al., 2019).

Apesar das claras vantagens da pesagem dinâmica, desde a capacidade de pesar grandes volumes de veículos – garantindo uma amostragem mais completa ou até mesmo o total levantamento das cargas da frota – até a mitigação da necessidade de parada ou de redução da velocidade dos caminhões – diminuindo os tempos e, conseqüentemente, o custo do transporte de cargas – (BOSSO et al., 2020), também existem desvantagens associadas a esse tipo de pesagem. Conforme pontuado por Sujon e Dai (2021), os principais obstáculos para a implantação generalizada do WIM ainda são os custos de implantação e manutenção destes sistemas, assim como a sua precisão na leitura das pesagens. Com relação ao primeiro, é natural que o desenvolvimento de novas tecnologias tenda a reduzir os custos de implantação, como já vem sendo observado. Além disso, como destacado por Brito et al. (2013), o custo de implantação de um sistema HS-WIM pode até ser baixo quando comparado ao custo de toda infraestrutura necessária para o funcionamento de postos de pesagem tradicionais.

Por outro lado, a precisão dos sistemas WIM é um ponto de devida atenção, sendo fortemente impactada pelos cuidados na sua instalação e calibração. Conforme pontuado por Otto et al. (2020) na implantação de um sistema WIM na BR-101/SC, próximo a Araranguá, temperatura do pavimento e velocidade e posição lateral do veículo são alguns dos fatores que afetam a precisão da pesagem de sensores WIM. Entretanto, quando devidamente instalados, sistemas LS-WIM apresentam excelentes resultados, sendo, inclusive, comumente usados nas chamadas “balanças de precisão” de postos de fiscalização de cargas no Brasil (BRASIL, 2018). Os sistemas de alta velocidade (HS-WIM), por outro lado, têm maiores limitações quanto a sua precisão, principalmente devido às cargas dinâmicas geradas pelos veículos em alta velocidade (BOCK, 2016; RYS, 2021).

Atento aos níveis de precisão dos sistemas de pesagem veicular, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) propôs, por meio da Portaria INMETRO nº 375/2013, valores de erro máximo admissível (EMA) para a pesagem de PBT – sendo de

$\pm 0,5\%$ na aprovação do modelo e de $\pm 1,0\%$ na verificação inicial, subsequente e em serviço – e para a pesagem por eixo isolado ou conjunto de eixos – de $\pm 1,5\%$ e $\pm 3,0\%$, respectivamente. Em 2016, o texto foi alterado pela Portaria INMETRO nº 47, ficando o EMA para o PBT estabelecido como $\pm 2,5\%$ na aprovação do modelo, verificação inicial e subsequente, e como $\pm 3,0\%$ na inspeção em serviço. Para a pesagem por eixo, os valores foram alterados para $\pm 4,0\%$ e $\pm 5,0\%$, respectivamente. Mais recente, em dezembro de 2020, considerando a necessidade de ampliação das políticas públicas de monitoramento e fiscalização de peso dos veículos das rodovias nacionais apresentada pelo Ministério da Infraestrutura, o Instituto introduziu, por meio da Portaria INMETRO nº 367/2020 (BRASIL, 2020a), o conceito de classes de exatidão para balanças de pesagem veicular, de modo a viabilizar a utilização de sistemas HS-WIM como ferramenta de fiscalização de cargas no Brasil. Os valores de EMA assim definidos são apresentados nas tabelas 4 a 6.

Tabela 4 - Erro máximo admissível, como percentagem do valor verdadeiro convencional da massa do veículo

Classe de exatidão	Aprovação de Modelo, verificação inicial e verificação subsequente (\pm)	Inspeção em serviço (\pm)
1	2,50%	5,00%
2	3,50%	7,00%
3	5,00%	10,00%

(fonte: BRASIL, 2020)

Tabela 5 - Erro máximo admissível, como percentagem do valor verdadeiro convencional da carga estática de referência por eixo isolado

Classe de exatidão	Aprovação de Modelo, verificação inicial e verificação subsequente (\pm)	Inspeção em serviço (\pm)
A	4,00%	8,00%
B	6,00%	12,00%
C	8,00%	16,00%

(fonte: BRASIL, 2020)

Tabela 6 - Erro máximo admissível, como percentagem da média corrigida da carga por eixo e conjunto de eixos

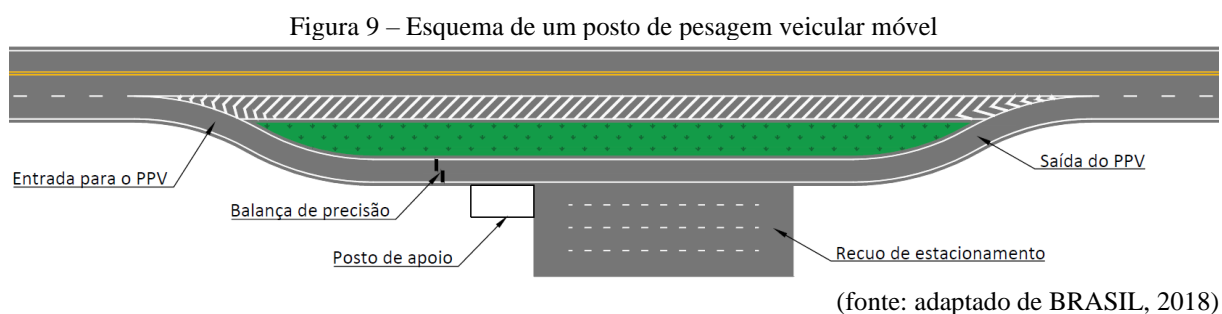
Classe de exatidão	Aprovação de Modelo, verificação inicial e verificação subsequente (\pm)	Inspeção em serviço (\pm)
A	4,00%	8,00%
B	6,00%	12,00%
C	8,00%	16,00%

(fonte: BRASIL, 2020)

Na data de publicação do presente documento (fevereiro de 2022), prevê-se que a Portaria nº 375 seja substituída pela Portaria INMETRO nº 19/2022, que aguarda entrada em vigor. Entretanto, embora a nova redação altere vários pontos da antiga portaria, os valores de EMA apresentados seguem inalterados. Além dos valores de EMA dados pelo INMETRO, outras recomendações e normativas acerca do tema pesagem em movimento podem ser encontradas na NBR ISO 15638-20, que versa sobre tipos de pesagem em movimento (embarcada ou na

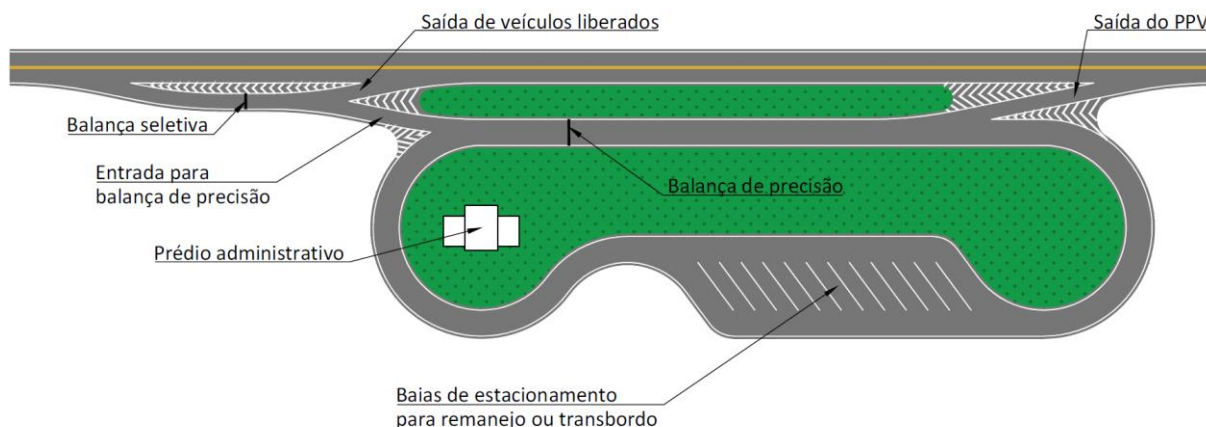
rodovia), armazenamento de dados, inspeção de sistemas WIM, entre outros (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021).

Apesar da intenção do Ministério da Infraestrutura em implementar a fiscalização de cargas de forma remota por meio de sistemas HS-WIM, a realidade brasileira ainda se baseia em postos de pesagem veicular (PPVs), normalmente com a necessidade da presença de agentes fiscalizadores. No Brasil, existem dois tipos principais de postos de pesagem: móvel e fixa. Ao contrário do que o nome sugere, ambas necessitam de uma infraestrutura fixa instalada próximo à rodovia, seja ela mais simples, no caso dos postos móveis, ou mais completa, como no caso dos postos fixos. A diferença fica a cargo dos equipamentos de pesagem, que são instalados de forma permanente em PPVs fixos, enquanto os PPVs móveis operam com equipamentos portáteis. Segundo a ANTT, por conta da estrutura precária dos postos móveis, a fiscalização nesses pontos é limitada (BRASIL, 2018), ao passo que os postos fixos permitem operações mais consistentes dos agentes. As figuras 9 e 10, apresentam um desenho esquemático de um posto de pesagem veicular móvel e fixo, respectivamente.



Em um PPV móvel (Figura 9), os veículos de carga são solicitados para saírem da rodovia, sendo direcionados diretamente para uma balança de precisão, que pode ser do tipo estática ou dinâmica de baixa velocidade (LS-WIM). Com isso, todos os veículos abordados são obrigados a parar ou reduzir significativamente sua velocidade, independentemente de estarem carregados ou não. Frequentemente, para evitar o acúmulo de filas nas balanças, a fiscalização nesses pontos é feita de forma amostral – fato que acaba, por vezes, sendo explorado por transportadores que querem evitar a fiscalização (BRITO et al., 2013). Os PPVs móveis ainda contam com uma pequena área de estacionamento, para onde veículos são direcionados quando da necessidade de sanarem eventuais irregularidades, realizando transbordo ou remanejamento das cargas.

Figura 10 - Esquema de um posto de pesagem veicular fixo



(fonte: baseado em BRASIL, 2016, 2018)

Os postos fixos (Figura 10), em contrapartida, contam com infraestrutura mais completa, que inclui uma balança seletiva instalada na própria rodovia ou em faixa destinada a veículos de carga, onde todos os veículos são aferidos. Tais balanças operam com tecnologia WIM a velocidades entre 30 e 60 km/h, e têm a função de identificar possíveis infratores na frota (BRASIL, 2018). Veículos com cargas próximas aos limites legais são direcionados para a balança de precisão para a aferição de eventuais infrações, enquanto veículos sem excesso têm sua viagem liberada. Na balança de precisão, as pesagens são comumente realizadas por um sistema LS-WIM a velocidades de 5 a 10 km/h, onde, constatadas irregularidades, os veículos são multados e, a depender dos excessos, só são liberados após realizado transbordo ou remanejamento da carga excedente.

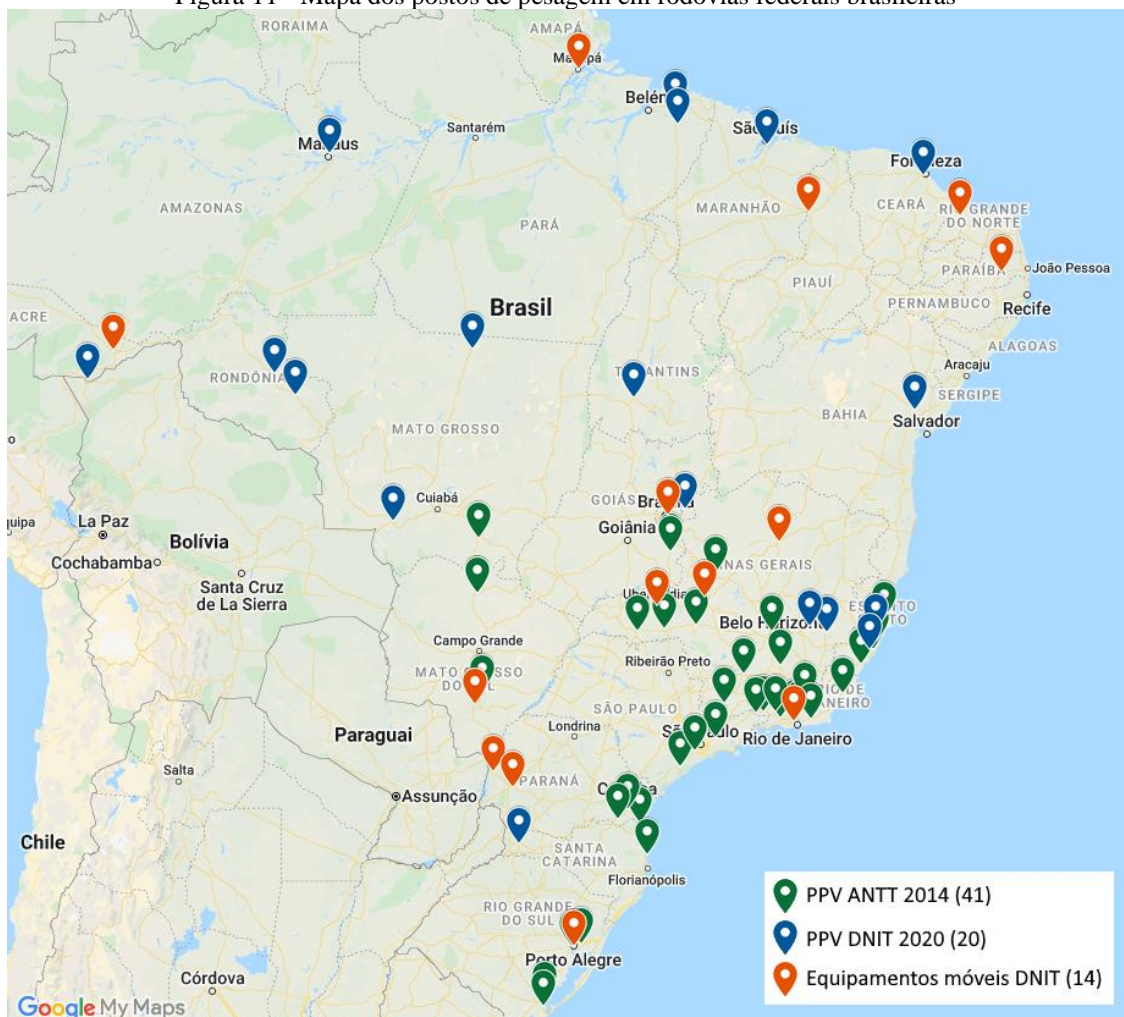
Dado que a balança seletiva tem como propósito pesar todos os veículos da frota durante sua operação – em contraste à balança fixa, que pesa apenas os potenciais infratores –, a primeira foi utilizada como fonte de dados no presente estudo, como será melhor abordado na seção 3.2 *DADOS DE PESAGEM UTILIZADOS*. Importante notar que as balanças seletivas não costumam identificar as placas dos veículos, o que torna difícil uma comparação direta entre a massa de dados da seletiva com a de precisão.

Apesar de muitos postos fixos serem equipados com balanças seletivas automáticas, capazes de coletar dados de forma contínua, a fiscalização só é efetiva nesses pontos quando da presença do agente fiscalizador. Caso contrário, mesmo veículos infratores são liberados para continuar viagem. Além das balanças seletiva e de precisão, postos fixos mais modernos – também conhecidos como postos integrados automatizados de fiscalização (PIAF) – são equipados com instrumentos para registro de velocidade, leitura automática de placas, detecção de excesso de altura/comprimento, entre outros, permitindo que a fiscalização em PIAFs pode ser feita de

forma remota, com o agente locado em um centro de controle operacional (BRASIL, 2016). Entretanto, essa ainda não é uma realidade amplamente difundida nos postos brasileiros.

A operação dos postos de pesagem e fiscalização no Brasil vem sendo bastante discutida nos últimos anos. Em 2004, havia 13 postos de pesagem em operação em rodovias federais pavimentadas no Brasil, com plano por parte do Ministério dos Transportes de recuperar e modernizar outros postos, aumentando esse número para 150 balanças fixas e móveis (ALBANO, 2005). Em 2008, em seu *Anuário Estatístico dos Transportes Terrestres* (BRASIL, 2008), a ANTT indicava que até 2007 havia um total de 135 postos de pesagem no país, dos quais apenas 50 operavam normalmente. Do restante, 19 operavam apenas de forma educativa – quando é feita a pesagem, mas não são aplicadas multas aos infratores –, 33 estavam inoperantes ou paralisadas, e outras 32 diziam respeito a postos localizados em trechos concedidos ou delegados, sobre os quais não haviam mais informações. Das 103 balanças com detalhes do tipo de pesagem, 58 seriam postos móveis e 45, fixos.

Figura 11 - Mapa dos postos de pesagem em rodovias federais brasileiras



(fonte: adaptado de BRASIL, 2014b, 2020b)

Atualmente, as balanças em rodovias federais brasileiras são operadas, em parte, pela ANTT – no caso das rodovias federais concedidas –, e em outra, pelo DNIT. O dado mais recente encontrado no *website* da Agência acerca do assunto, um mapa em arquivo do tipo *.kml de 2014 (BRASIL, 2014b), indica a localização 41 PPVs da ANTT no país, mas deixa aberto à interpretação se estes seriam todos os postos em operação na época. Além das balanças operadas pela ANTT, o DNIT indica em seu *website* a localização de outras 34 balanças, sendo 20 referentes a PPVs do Departamento e outros 14 equipamentos móveis localizados em suas sedes e unidades (BRASIL, 2020b). Um mapa contendo a localização dessas balanças é reproduzido na Figura 11.

2.5 CONSIDERAÇÕES DE CARGA PARA PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO

Conforme retratado até aqui, dada a importância e o impacto do nível de carga dos veículos sobre os pavimentos, torna-se necessário discutir como os conhecimentos adquiridos são utilizados na prática em projetos e avaliações de pavimentos. Como brevemente citado na seção 2.2.2 *Fatores de Equivalência de Carga*, diversos métodos de dimensionamento foram desenvolvidos ao longo do tempo, dos quais a grande maioria baseada no conceito de um número equivalente de passagens de um eixo ou roda padrão – chamado *número N* ou *ESAL*.

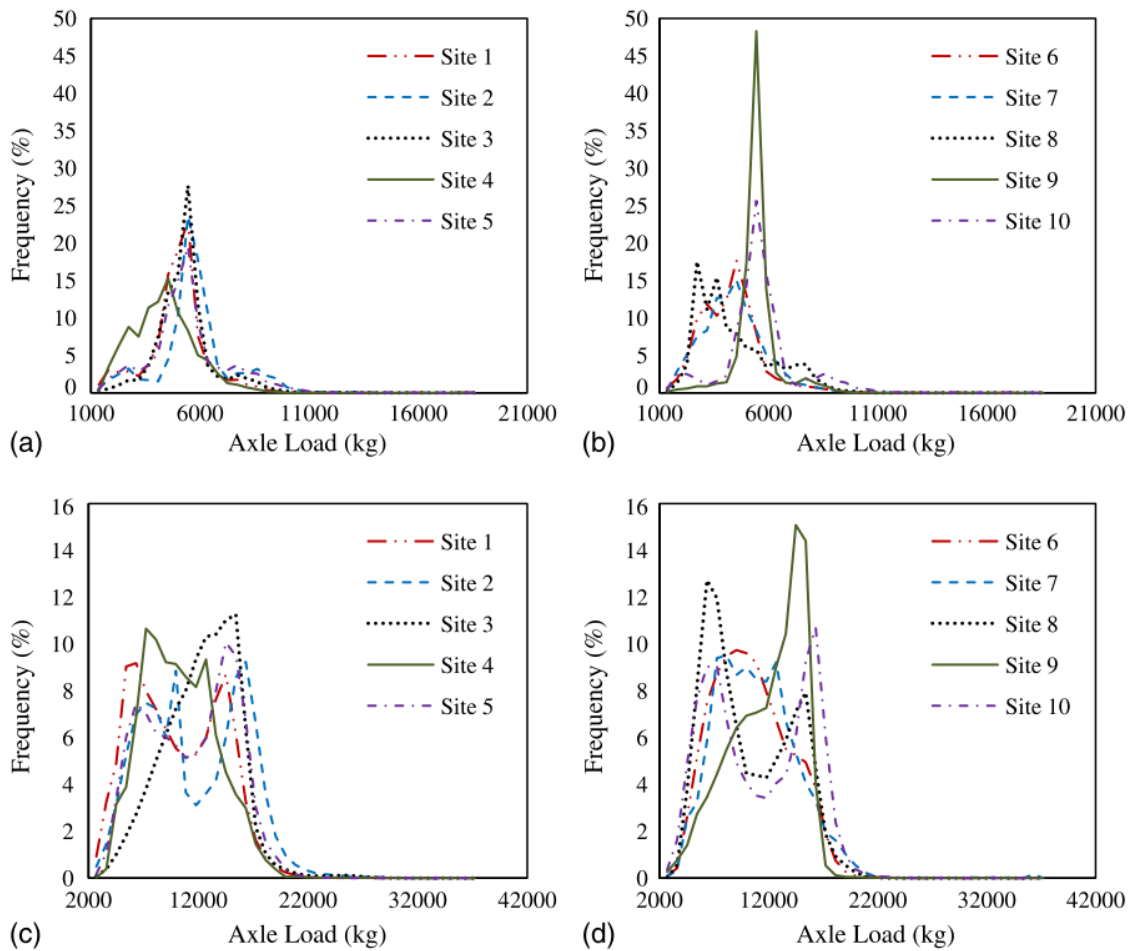
Para a aplicação de tais métodos de dimensionamento – como é o caso do Método da AASHTO de 1993, ou do Método do CBR revisado pela USACE e posteriormente adaptado para o Brasil, discutidos na seção 2.2.2 – é necessário que se conheçam ou que se estimem as distribuições de carga esperadas durante a vida 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* desenvolvidas em cooperação entre o FHWA e diversos estados norte-americanos, que incluem as distribuições de carga por eixo em intervalos de 2.000 lb (907,2 kg), normalmente agrupados por classe de veículo (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993). Uma abordagem similar é indicada no *Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis* do DNER (SOUZA, 1981), que recomenda que os dados de pesagem sejam agrupados segundo os diferentes tipos de eixo em intervalos de carga, representados pelo seu ponto central. Um exemplo dessa abordagem é dado na Tabela 7.

Tabela 7 - Exemplo de agrupamento de dados de pesagem

Intervalo [t] (1)	Carga central [t] (2)	Porcentagem (3)	FC (4)	Equivalência de operações (5)
ESRS				
0,5-1,0	0,75	% de eixos no intervalo (1)	FC calculado conforme Quadro 2, com $P = (2)$	produto entre (3) e (4)
1,0-1,5	1,25			
⋮	⋮			
ETD				
2,0-3,0	2,50			
3,0-4,0	3,50			
⋮	⋮			
			FV_{frota}	$\sum(5)$

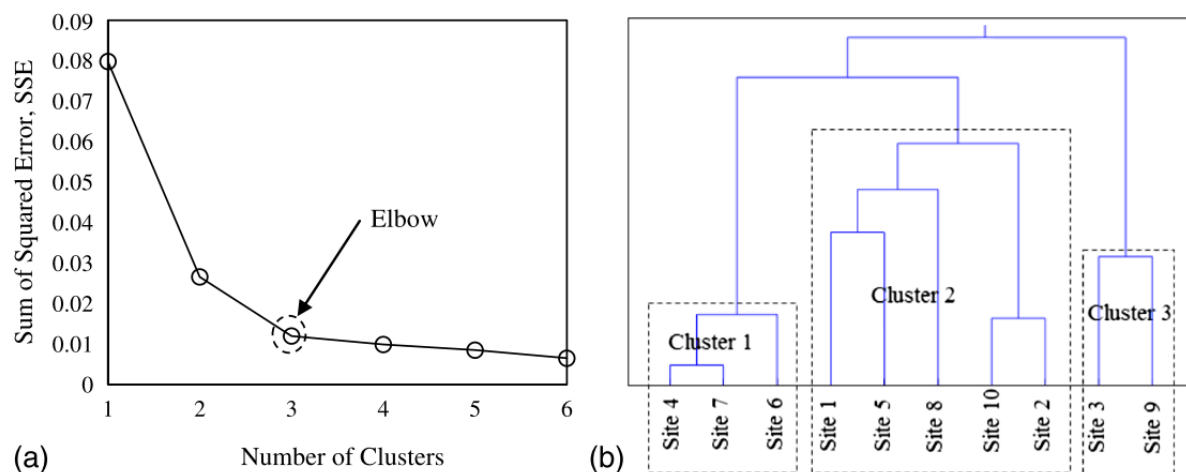
(fonte: adaptado de SOUZA, 1981)

Figura 12 - Espectros de cargas observados no Novo México, EUA: (a) eixo simples (estações 1 a 5); (b) eixo simples (estações 6 a 10); (c) eixo tandem (estações 1 a 5); (d) eixo tandem (estações 6 a 10)



(fonte: HASAN; ISLAM; TAREFDER, 2016)

Figura 13 - Processo de *clustering* dos espectros de carga utilizando o método do cotovelo (a) e a análise de um dendrograma (b)



(fonte: HASAN; ISLAM; TAREFDER, 2016)

As pesagens por intervalo de carga também podem ser resumidas graficamente em forma de histogramas, criando o conceito de *espectros de carga*. 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. Os espectros de carga observados pelos autores para eixo simples e tandem duplo são apresentados na Figura 12. Pelos gráficos é possível notar diferentes comportamentos de carregamento dos eixos dependendo do ponto de coleta dos dados, ainda que todos tenham origem em um mesmo estado. A partir dos dados, os autores buscaram agrupar as rodovias com perfis semelhantes de carregamento, através de algoritmos de agrupamento (ou *clustering*). A metodologia por trás dessa abordagem será melhor discutida na seção 3.4.5 *Algoritmos de Agrupamento (Clustering)*. Em resumo, os autores concluíram que, para as estações de pesagem estudadas, o número ideal de grupos (*clusters*) seria 3 (Figura 13 (a)), divididos conforme o dendrograma da Figura 13 (b).

A análise detalhada dos espectros de carga – seja na forma gráfica de histogramas, como os da Figura 12, ou na forma de intervalos de carga e suas frequências, como os da Tabela 7 – permite um melhor entendimento acerca das cargas rodantes na frota, em contraste à metodologia 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 (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 2015). No

software são consideradas as distribuições de carga discriminadas por tipo de eixo, classe de veículo e mês do ano, por exemplo, em intervalos:

- a) de 1.000 lb (453,6 kg), variando entre 3.000 lb (1.370,8 kg) e 40.000 lb (18.143,7 kg), para os eixos simples;
- b) de 2.000 lb (907,2 kg), variando entre 6.000 lb (2.721,6 kg) e 80.000 lb (36.287,4 kg), para eixos tandem duplo;
- c) de 3.000 lb (1.379,8 kg), variando entre 12.000 lb (5.443,1 kg) e 102.000 lb (46.266,4 kg), para eixos tandem triplo.

A entrada dos dados de pesagem no software também pode ser feita em unidades do Sistema Internacional (SI), com intervalos:

- a) de 500 kg, variando entre 1.000 kg e 20.000 kg, para os eixos simples;
- b) de 1.000 kg, variando entre 2.000 kg e 40.000 kg, para eixos tandem duplo;
- c) de 1.500 kg, variando entre 4.500 kg e 49.500 kg, para eixos tandem triplo.

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. 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 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).

Entretanto, 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, como grande em parte dos países da América Latina, por exemplo, que ainda utilizam o método da AASHTO/93. 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.

Embora os métodos baseados no conceito de número N recomendem que sejam realizadas pesagens veiculares e que os dados sejam agrupados em intervalos, como no exemplo da Tabela 7, 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. A Tabela 8 ajuda a justificar as dificuldades envolvidas na estimativa das cargas de projeto. Para se ter um alto nível de confiança na estimativa, com baixo erro, pode ser necessário que a campanha de pesagens dure vários meses por ano.

Devido a essas dificuldades, é comum que estudos de pavimentos no Brasil utilizem percentuais de veículos cheios e vazios – ainda que o conceito de “cheio” e “vazio” seja altamente 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 CML+7,5% e 40% com CML+10% no eixo dianteiro e CML+20% nos demais eixos (Quadro 7).

Tabela 8 - Tamanho mínimo da amostra (dias por ano) para estimar a distribuição de cargas com dados WIM

Erro Padrão [±%]	Nível de confiança ou significância [%]				
	80	90	95	97,5	99
20	1	1	1	1	1
10	1	1	2	2	3
5	2	3	5	7	10
2	8	19	30	43	61
1	32	74	122	172	242

(fonte: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 2015)

Quadro 7 - Hipóteses de carregamento da frota utilizadas por Albano (2005)

Nível de carga	Percentual da frota		Carga adotada
Vazio	30%	30%	não relatado
Carregado	70%	42%	CML+7,5%
		28%	CML+10% (eixo dianteiro) CML+20% (demais eixos)

(fonte: baseado em ALBANO, 2005)

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 ANTT (BRASIL, 2022). Para o projeto denominado *Rodovias Integradas do Paraná*, que engloba 3.312 km de rodovias no estado, os Estudos de Tráfego (Volume 1 – Tomo I) 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 o cálculo do número N, 70% dos veículos foram considerados na sua CML, com 30% vazios.

Outra concessão presente na lista de novos projetos da Agência, atualmente em processo de licitação, é a do trecho da BR-163 entre o Mato Grosso e o Pará, com mais de 1.000 km de rodovias. Aqui, os resultados das pesquisas OD no quesito cargas são apresentadas de forma um pouco mais detalhada, conforme Tabela 9. Porém, de acordo com as memórias de cálculo do projeto, estes não foram os valores utilizados 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 (Tabela 10).

Quando da ausência ou impossibilidade de se realizarem 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 valores padrão para serem adotados no dimensionamento de pavimentos do município. Na IP-02/2004 (SÃO PAULO (Município), 2004) são estabelecidos quatro grupos de carga para os veículos da frota, sendo eles:

- a) veículos vazios (carga útil = 0 kg);
- b) veículos com 75% da CML;
- c) veículos com 100% da CML;
- d) veículos com 105% da CML.

Tabela 9 - Proporção de veículos carregados e vazios resultante de pesquisas OD em estudos de viabilidade para a concessão da BR-163/MT-PA

Posto	Veículos	Carregado	Vazio
P1 norte	2-5 eixos	72%	28%
P1 norte	6+ eixos	96%	4%
P1 sul	2-5 eixos	54%	46%
P1 sul	6+ eixos	41%	59%
P4 norte	6+ eixos	94%	6%
P4 sul	6+ eixos	21%	79%

(fonte: baseado em BRASIL, 2022)

Tabela 10 - Distribuição de carga adotada para o cálculo do número N apresentado nos estudos de viabilidade para a concessão da BR-163/MT-PA

Veículo	Cargas Atuantes		
	Vazios	Máx. Legal	Máx. c/ Tol.
Ônibus	25%	50%	25%
Cam. Leves	25%	50%	25%
Cam. Médios	25%	50%	25%
Cam. Pesados	25%	50%	25%
Semi-Reboques	25%	50%	25%
Reboques	25%	50%	25%
	Cargas Adotadas [t]		
	ESRS	ESRD	ETD
ESRS	3,00	6,00	6,60
ESRD	5,00	10,00	11,00
ETD	8,50	17,00	18,70
ETT	12,80	25,50	28,05

(fonte: baseado em BRASIL, 2022)

A instrução ainda estabelece diferentes distribuições dentro desses quatro grupos de carga, de acordo com a classe do veículo. As distribuições propostas pela Prefeitura estão resumidas na Tabela 11. Para os veículos “vazios”, as cargas utilizadas como tara seriam (SÃO PAULO (Município), 2004):

- a) 3,5 t para ESRS de caminhões;
- b) 2,7 t para ESRS de ônibus;
- c) 3,0 t para ESRD;
- d) 4,5 t para ETD;
- e) 8,5 t para ETT.

Tabela 11 - Distribuição de cargas proposta pela Prefeitura de São Paulo

Classe	Nível de carregamento			
	1,05·CML	1,00·CML	0,75·CML	Vazio
2C	4%	65%	18%	13%
3C	4%	65%	18%	13%
4C	4%	66%	20%	10%
2S3	4%	66%	20%	10%
3S3	4%	66%	20%	10%
Ônibus	20%	35%	40%	10%

(fonte: baseado em SÃO PAULO (Município), 2004)

O Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo (DER/SP) recomenda, na Instrução de Projeto IP-DE-P00/001 (SÃO PAULO (Estado), 2006), que sejam realizadas campanhas de pesagem para a elaboração de projetos de pavimentação. Entretanto, na impossibilidade da obtenção de dados de pesagem, o órgão também propõe cargas e fatores veiculares (FV) pré-estabelecidos, de acordo com a classe do veículo, conforme apresentado na

Tabela 12. Ao utilizar tais premissas, Engelke (2019) concluiu que os fatores propostos pelo DER/SP aproximam uma consideração de cargas do tipo 70% carregados (na CML) e 30% vazios.

Tabela 12 - Cargas e fatores veiculares propostos pelo DER/SP

Classe	Carga [kN] e percentual da CML				Fator Veicular	
	ESRS	ESRD	ETD	ETT	USACE	AASHTO
2C (16)	40,00 (68%)	45,00 (46%)	- (-)	- (-)	0,09	0,11
2C (22)	55,00 (93%)	95,00 (97%)	- (-)	- (-)	2,78	1,89
3C (20)	45,00 (76%)	- (-)	130,00 (78%)	- (-)	2,28	0,55
3C (22)	55,00 (93%)	- (-)	160,00 (96%)	- (-)	5,44	1,27
2S1	50,00 (85%)	95,00 (97%)	- (-)	- (-)	4,09	2,81
2S2	55,00 (93%)	95,00 (97%)	160,00 (96%)	- (-)	8,70	3,14
2S3	55,00 (93%)	95,00 (97%)	- (-)	245,00 (98%)	10,27	3,32
3S3	55,00 (93%)	- (-)	150,00 (90%)	224,00 (90%)	9,42	1,90
3D4	55,00 (93%)	- (-)	160,00 (96%)	- (-)	17,28	4,09
3D6	55,00 (93%)	- (-)	150,00 (90%)	- (-)	14,02	3,27
2CB	55,00 (93%)	95,00 (97%)	- (-)	- (-)	2,81	1,88
3BC	55,00 (93%)	- (-)	130,00 (78%)	- (-)	2,21	0,71

(fonte: adaptado de SÃO PAULO (Estado), 2006)

Quanto à definição de tara para veículos e eixos considerados vazios, alguns valores podem ser encontrados na literatura. Medina e Motta (2005) afirmam que a razão entre carga útil e 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 13, ao lado dos demais valores de tara citados até aqui.

Tabela 13 - Valores de tara por eixo, em toneladas, estimados pela literatura e utilizados na prática

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

(fonte: elaborado pelo autor)

Com o intuito de obter valores de referência para o estado do Paraná, Peterlini (2006) analisou dados de sete postos de pesagem ao longo do ano de 2002. Em cada ponto, foram coletados dados de pesagem em dois dias de cada mês do ano, escolhidos de forma aleatória. O autor calculou os fatores veiculares para 13 classes de caminhões para cada um dos postos estudados, obtendo resultados variados. Na ausência de um fator veicular médio da frota comercial (FVc) calculado pelo autor, a Tabela 14 apresenta, de forma ilustrativa, o FVc para o PPV 6/3

estudado por Peterlini (2006), localizado no km 63 da BR-277, sentido leste, na proximidade do porto de Paranaguá/PR.

Tabela 14 - Fator veicular médio da frota comercial (FVc) no PPV 6/3 estudado por Peterlini (2006)

Veículo	Percentual da frota	FV USACE
2C	11,98%	0,26
3C	9,30%	5,23
2S1	0,83%	1,01
2S2	5,23%	2,27
2I2	0,39%	1,22
3S1	0,08%	8,23
2S3	42,88%	13,50
3S2	0,26%	10,18
2I3	0,33%	16,71
3I2	0,06%	7,01
3S3	14,14%	12,10
3D4	14,08%	19,14
3T6	0,44%	32,90
	FVc	11,08

(fonte: baseado em PETERLINI, 2006)

Em estudo similar, Fontenele (2011) analisou dados de pesagem de 2008 de um PPV localizado no km 28 da Rodovia dos Imigrantes (SP-160), sentido sul. A autora também apresentou fatores discriminados por classe de veículo, e obteve valores médios de *FVc* de 4,13 (AASHTO) e 16,33 (USACE). Mais recentemente, Vallejo (2021) utilizou dados entre 2011 e 2017 coletados em uma importante rodovia federal no estado de São Paulo, cujos resultados foram segmentados em um período pré-2014 e outro pós-2014, obtendo-se *FVc* (USACE) médios de 8,87 e 11,99, respectivamente. Os fatores para alguns dos veículos estudados pela autora são apresentados na Tabela 15, ao lado de outros valores encontrados na literatura. Também são apresentados 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 15 - Fatores veiculares USACE por veículo encontrados na literatura e calculados por considerações de carga

Classe (2006)	Peterlini Médio	Fontenele (2011)	Vallejo (2021) Pré-2014	Vallejo (2021) Pós-2014	DER/SP	Prefeitura São Paulo	70c-30v	80c-20v
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

(fonte: elaborado pelo autor)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista a relevância do conhecimento das cargas rodantes para a estimativa das solicitações de projeto, conforme observado na revisão da literatura realizada, o presente estudo buscou desenvolver uma metodologia que permitisse definir, a partir de dados de pesagem veículo a veículo, níveis de carregamento da frota para serem utilizados como referência em projetos e sistemas de gerenciamento de pavimentos em diferentes regiões do Brasil. Neste capítulo, são apresentados os dados utilizados no estudo e o tratamento dado a eles, assim como são descritas as análises que permitiram concluir sobre os objetivos da pesquisa.

3.1 FERRAMENTAS DE PROGRAMAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS EM MASSA

Parte significativa deste estudo foram a organização dos dados de pesagem obtidos e a sistematização de análises que permitissem obter resultados a partir de muitas variáveis de entrada. Potencialmente a ferramenta mais conhecida para esse fim, o *Microsoft Excel* permite ao usuário o armazenamento de dados em forma tabular, a programação e automatização de análises através de fórmulas e códigos em linguagem VBA (*Visual Basic for Applications*) e a geração de gráficos altamente personalizáveis. Com isso, grande parte das análises finais deste trabalho foram realizadas utilizando uma versão do *Microsoft Excel 2016 64 bits*. Entretanto, apesar das excelentes funcionalidades disponibilizadas, o *software* tem limitações na manipulação de grandes *datalakes*. Cada planilha da ferramenta é limitada em 1.048.576 (ou 2^{20}) linhas e 16.384 (ou 2^{14}) colunas, com cada coluna limitada à largura de 255 caracteres (MICROSOFT, 2022). Além disso, a programação do *software* não é otimizada para o processamento de dados em massa, trazendo alguns desafios para o estudo proposto.

Tendo isso em vista, e sabendo de antemão que o volume de dados brutos a serem processados nesta pesquisa seria da ordem de milhões de pesagens, outras ferramentas foram consideradas para o estudo. Assim, a linguagem *Python* foi escolhida como a principal ferramenta de análise de dados nesta pesquisa. *Python* é uma poderosa linguagem de programação orientada a objetos (*object-oriented*), comparável com outras como Perl, Ruby, Scheme ou Java. Dentre outras vantagens, essa ferramenta contém recursos avançados otimizados para processamento e análise de grandes volumes de dados simultaneamente, muito bem alinhada com as propostas da presente pesquisa. Além disso, *Python* é uma linguagem gratuita desenvolvida sob uma licença de código aberto (*open-source*), permitindo que múltiplas bibliotecas especializadas

sejam desenvolvidas por terceiros, ampliando as ferramentas disponíveis na plataforma. Dentre as principais bibliotecas utilizadas neste trabalho, destacam-se:

- a) *pandas*, para manipulação e organização de dados em forma tabular;
- b) *seaborn*, para a geração de gráficos e análises visuais;
- c) *tkinter*, para a criação de GUI (*Graphic User Interface*);
- d) *sqlite*, para a execução de comandos SQL (*Structured Query Language*);
- e) *SciPy* e *scikit-learn*, para análises baseadas em aprendizado de máquina (*machine learning*).

A instalação da linguagem Python e das bibliotecas utilizadas foi feita com o auxílio da plataforma *Anaconda*, também com licença livre de código aberto. Além de facilitar a instalação da linguagem Python, a plataforma conta com outras linguagens de programação, como *R*, e apresenta várias interfaces para programação e execução dos códigos. Dentre as opções, os códigos foram desenvolvidos utilizando a interface *Jupyter Notebook*.

A elaboração e execução de todos os códigos desenvolvidos neste trabalho foram feitas em um *Windows 10 Pro v. 20H2* com as seguintes configurações:

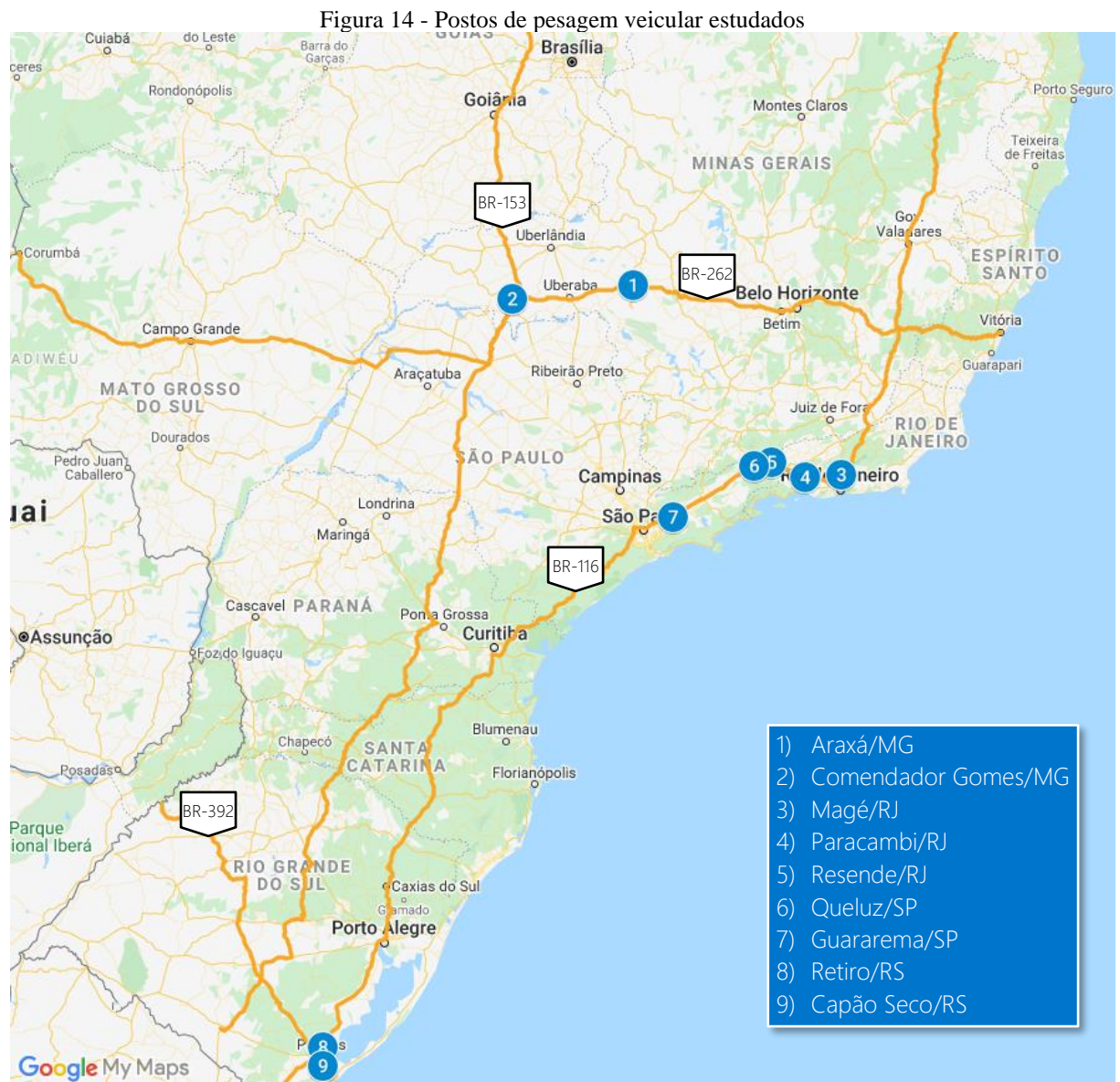
- a) processador Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3,20GHz;
- b) 32,0 GB de memória RAM;
- c) sistema operacional de 64 bits;
- d) processador baseado em x64.

3.2 DADOS DE PESAGEM UTILIZADOS

Os dados de pesagem veicular são o principal material utilizado nesta pesquisa. 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 estudo⁵ realizado pelo Laboratório de Pavimentação da Universidade

⁵ 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”, também conhecida como RDT-LEA.

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 localizações são indicadas no mapa da Figura 14 e detalhadas na Tabela 16.



(fonte: elaborado pelo autor)

Como brevemente discutido na seção 2.4, os dados de pesagem utilizados foram coletados em balanças seletivas instaladas nos referidos postos de pesagem veicular (PPVs). Balanças seletivas costumam operar com tecnologia de pesagem em movimento de baixa velocidade (*low speed weigh-in-motion – LS-WIM*) e têm a função de selecionar veículos próximos do limite de

infração para serem aferidos na balança punitiva, de menor velocidade e maior precisão (BRITO et al., 2013). Embora possam ser consideradas menos precisas que as balanças lentas de precisão – ainda que apresentem excelentes resultados quando propriamente instaladas e aferidas –, as balanças seletivas instaladas em postos de pesagem possuem a vantagem de coletarem dados de todos os veículos de carga que passam pela rodovia – ou ao menos de grande parte da frota –, permitindo uma análise geral dos veículos que trafegam pela rodovia, e não limitada àqueles próximos dos limites de infração (ALBANO; LINDAU, 2006). A Tabela 17 resume os períodos de abrangência dos dados obtidos, assim como o número de veículos pesados em cada uma das balanças.

Tabela 16 - Postos de pesagem analisados

Posto de Pesagem	Rodovia	UF	km	Sentido	Latitude	Longitude
Araxá	BR-262	MG	673	leste	-19,54748	-46,84460
Comendador Gomes	BR-153	MG	175	norte	-19,75823	-48,96677
Magé	BR-116	RJ	131	sul	-22,65056	-43,16811
Paracambi	BR-116	RJ	217,5	sul	-22,68805	-43,80634
Resende	BR-116	RJ	301	sul	-22,45661	-44,41050
Queluz	BR-116	SP	1	norte	-22,51821	-44,70661
Guararema	BR-116	SP	179,4	sul	-23,33233	-46,13834
Retiro	BR-116	RS	509	norte	-31,61910	-52,31077
Capão Seco	BR-392	RS	48	sudeste	-31,88917	-52,31970

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 17 - Períodos de abrangência dos dados e número de veículos pesados

Posto de Pesagem	Data Início	Data Fim	Período [dias]	Veículos	Veículos [%]
Araxá	18/09/2015	08/03/2020	1.633	766.958	2,01%
Comendador Gomes	16/07/2015	06/03/2020	1.695	583.473	1,53%
Magé	02/01/2015	31/08/2018	1.337	3.516.008	9,23%
Paracambi	01/01/2015	31/08/2018	1.338	5.438.677	14,28%
Resende	01/01/2015	30/08/2018	1.337	7.144.065	18,75%
Queluz	01/01/2013	31/08/2018	2.068	14.146.645	37,13%
Guararema	01/01/2015	26/09/2018	1.364	5.634.194	14,79%
Retiro	07/04/2018	27/11/2018	234	256.911	0,67%
Capão Seco	21/02/2018	31/10/2018	252	609.383	1,60%
Total			11.258	38.096.314	100,00%

(fonte: elaborado pelo autor)

Ao todo, os nove postos abrangem 38.096.314 veículos aferidos, com cerca de 100 milhões de pesagens por eixo e outros 300 milhões de metadados a serem processados. Esses metadados (ou “dados sobre dados”) trazem informações complementares às pesagens propriamente ditas, como data e hora da pesagem, classe do veículo e velocidade, por exemplo. 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, surgiu a motivação de criar-se um banco de dados unificado utilizando uma Linguagem de Consulta Estruturada (ou *Structured Query Language*

– *SQL*), assim como o uso da linguagem *Python* para o processamento e análise dos dados. Para tal, rotinas computacionais foram desenvolvidas ao longo do trabalho, descritas a seguir.

3.2.1 Organização dos Dados Recebidos

Dado que as pesagens obtidas têm origem em diversos PPVs, operados por diferentes empresas e armazenados em diferentes bancos, é de se esperar que a estrutura das informações ali contidas, assim como sua forma de armazenamento sejam igualmente diversificadas. Os dados foram recebidos em arquivos Excel (.xlsx, .xls, .xlsm, etc.) e arquivos de valores separados por vírgula – *comma-separated values* (.csv). Além dos diferentes formatos, não era raro encontrar uma mesma variável com nomes distintos entre os arquivos. A variável “CLASSE”, por exemplo, contendo a classe do veículo de acordo com a classificação do DNIT – essencial para as análises do estudo –, podia ser encontrada como “Classe”, “Classificação”, “Classificacao”, entre outros. Variáveis como data e hora da pesagem eram por vezes encontradas juntas, como uma única informação de DATA-HORA, ou separadas em DATA e HORA. Datas podiam estar armazenadas na forma dd/mm/aa, aaaa-mm-dd, etc., muitas vezes sem padronização dentro de um mesmo arquivo.

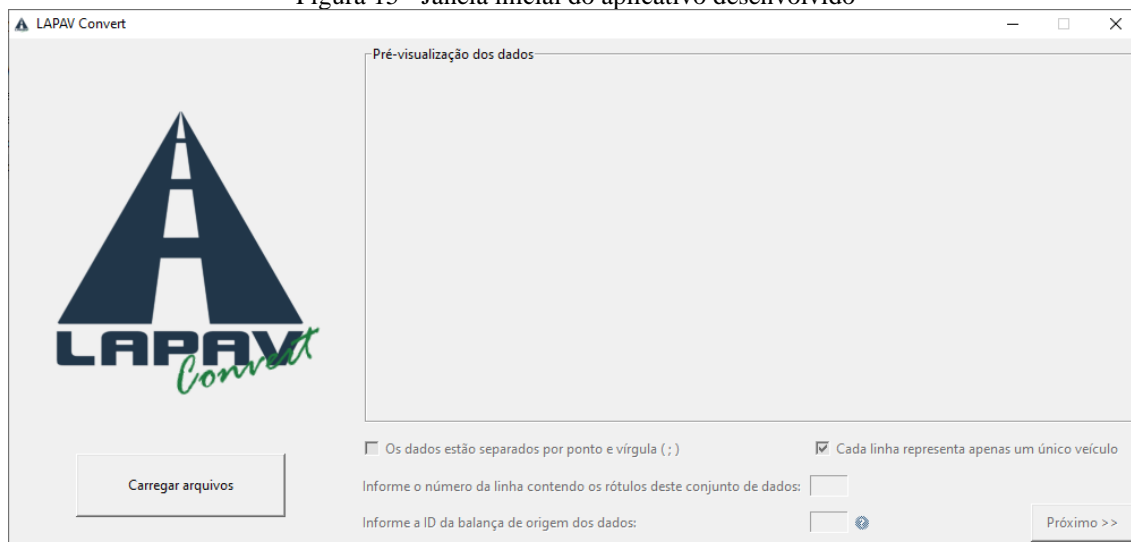
Para organizar e padronizar todos os dados recebidos em um mesmo formato para posterior implementação de um banco unificado, foi desenvolvido um aplicativo com uso de linguagem *Python*, simbolicamente batizado de *LAPAV Convert* (Figura 15). O programa foi concebido com auxílio da biblioteca *tkinter* para solucionar seis principais problemas encontrados:

- a) diferentes formatos entre os arquivos que continham os dados (Excel ou *comma-separated values*);
- b) compatibilização dos nomes de variáveis;
- c) arquivos .csv separados por ponto e vírgula;
- d) arquivos Excel contendo pesagens em múltiplas abas;
- e) pesagens dos diferentes eixos de um mesmo veículo armazenadas em diferentes linhas;
- f) arquivos com cabeçalhos contendo informações desnecessárias para a análise.

A primeira dificuldade encontrada, com relação ao formato dos arquivos recebidos, é solucionada ainda na etapa de carregamento dos arquivos no aplicativo. Ao carregar os arquivos, o usuário é apresentado a uma janela de seleção dos arquivos desejados (Figura 16), com a opção de alternar entre arquivos de Excel ou do tipo .csv. Múltiplos arquivos podem ser

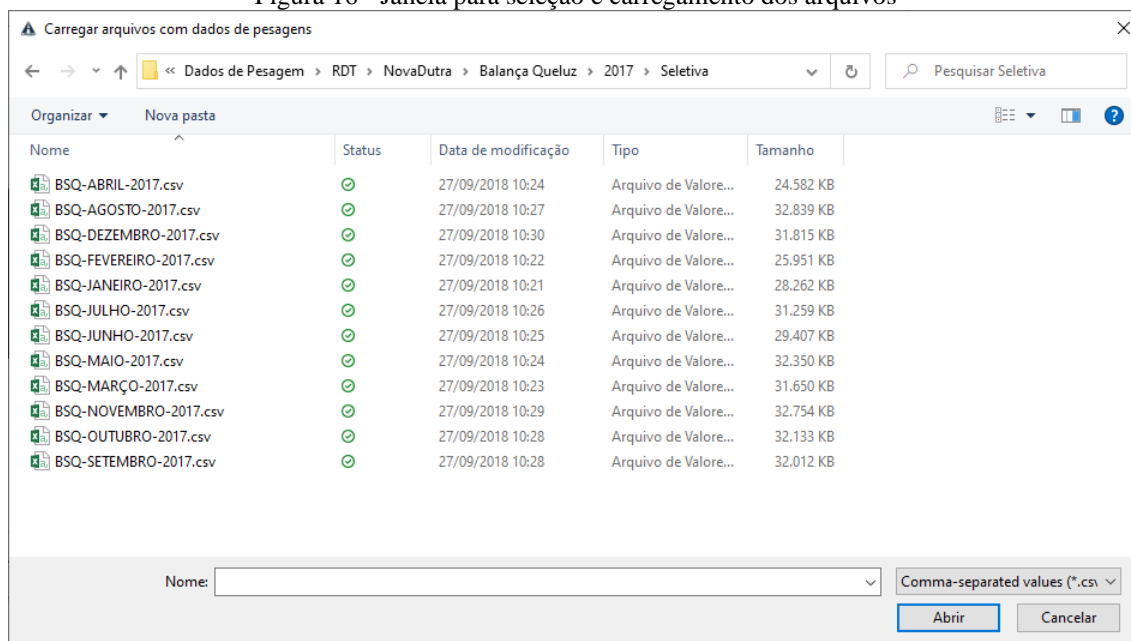
carregados simultaneamente, desde que o usuário tenha confiança de que todos sigam o mesmo padrão (i.e. mesmo formato de arquivo, mesmo nome de variáveis, etc.). Do contrário, recomenda-se que os arquivos sejam carregados individualmente. Caso arquivos com diferentes padrões sejam carregados ao mesmo tempo, o programa resulta em um erro, forçando o usuário de volta à etapa de seleção de arquivos.

Figura 15 - Janela inicial do aplicativo desenvolvido



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 16 - Janela para seleção e carregamento dos arquivos



(fonte: elaborado pelo autor)

Uma vez carregado o arquivo – ou série de arquivos –, a janela inicial do aplicativo (Figura 15) é atualizada, apresentando ao usuário uma pré-visualização dos dados carregados e ativando os campos antes inativos (Figura 17). Nessa etapa, o usuário pode identificar dados separados por

ponto e vírgula (;), qual linha do arquivo contém os rótulos das variáveis importadas e qual o código de identificação (ID) da balança de origem dos dados. Para auxiliar na identificação das balanças estudadas, uma tabela de apoio (Figura 18) foi construída no aplicativo, permitindo ao usuário consultar informações gerais das balanças previamente cadastradas, incluindo seu código ID.

Figura 17 - Pré-visualização dos dados e utilização do aplicativo

0	Pré-visualização dos dados										
0	Consulta : Seletiva - Pesagens com grupos por data										
1	Exportação gerada em 27/09/2018 10:23:49										
2	Pesagem;Data e hora;Pes. dia;Classifica;Velocidade;PBT;Limite;Viola de Altura (0=n);Opera: 1-Fora 2-Den										
3	12839630;01/04/2017 00:01:19;1;313;34;49150;47250;0;3;0;0;1;6610;6600;0;										
4	12839630;01/04/2017 00:01:19;1;313;34;49150;47250;0;3;0;0;2;15380;18700;1;										
5	12839630;01/04/2017 00:01:19;1;313;34;49150;47250;0;3;0;0;3;8840;11000;1;										
6	12839630;01/04/2017 00:01:19;1;313;34;49150;47250;0;3;0;0;4;9130;11000;1;										
7	12839630;01/04/2017 00:01:19;1;313;34;49150;47250;0;3;0;0;5;9190;11000;1;										
8	12839631;01/04/2017 00:01:50;2;253;28;35320;43570;0;3;1;1;1;5510;6600;1;										
9	12839631;01/04/2017 00:01:50;2;253;28;35320;43570;0;3;1;1;2;8410;11000;1;										

continua...

Os dados estão separados por ponto e vírgula (;) Cada linha representa apenas um único veículo

Informe o número da linha contendo os rótulos deste conjunto de dados:

Informe a ID da balança de origem dos dados:

(fonte: elaborado pelo autor)

No exemplo da Figura 17, nota-se que as duas primeiras linhas (0 e 1) do arquivo apresentam apenas informações auxiliares, com os rótulos dos dados na linha 2 e com os dados, propriamente ditos, presentes nas linhas 3 em diante. Também é possível visualizar, no caso em questão, um exemplo do problema descrito no item (e) – quando as pesagens dos múltiplos eixos de um mesmo veículo são organizadas em diferentes linhas. Neste exemplo, o veículo identificado pela pesagem nº 12839630 tem seu primeiro eixo registrado na linha 3 (6.610 kg), o segundo na linha 4 (15.380 kg), e assim por diante até a linha 7. Ao demarcar a opção “Cada linha representa apenas um único veículo”, o usuário informa ao programa que, ao converter o arquivo, as pesagens por eixo deverão ser reposicionadas em colunas referentes ao eixo 1, eixo 2, etc.

Figura 18 - Tabela de apoio para consulta de balanças previamente cadastradas no aplicativo

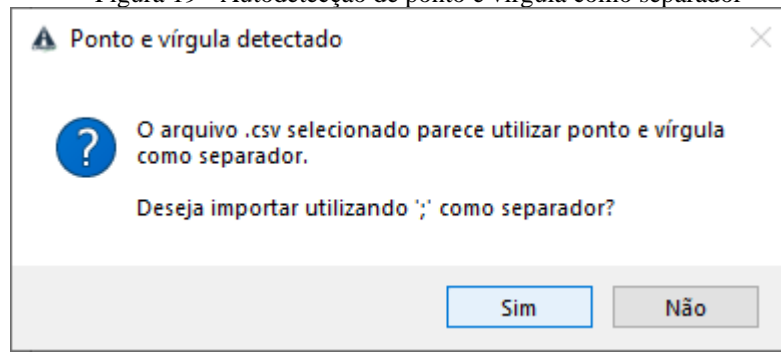
Concessão	Balança	Tipo	Rodovia	UF	km	Sentido	ID
Ecorodovias							
CRT							
CRT	Magé	seletiva	BR-116	RJ	131.0	sul	2
CRT	Magé	precisão	BR-116	RJ	131.0	sul	66
CCR							
NovaDutra	Queluz	seletiva	BR-116	SP	1.0	norte	3
NovaDutra	Guararema	seletiva	BR-116	SP	179.4	sul	67
NovaDutra	Guararema	precisão	BR-116	SP	179.4	sul	68
NovaDutra	Resende	seletiva	BR-116	RJ	301.0	sul	69
NovaDutra	Resende	precisão	BR-116	RJ	301.0	sul	70
NovaDutra	Paracambi	seletiva	BR-116	RJ	217.5	sul	71
NovaDutra	Paracambi	precisão	BR-116	RJ	217.5	sul	72
NovaDutra	Queluz	precisão	BR-116	SP	1.0	norte	84

(fonte: elaborado pelo autor)

Para o caso especial de arquivos .csv separados por ponto e vírgula nos quais os rótulos do conjunto de dados estavam na linha 0 do arquivo (i.e. sem um cabeçalho auxiliar), o programa é capaz de detectar automaticamente a marcação de separação dos dados, apresentando ao usuário a janela da Figura 19(a). Ao aceitar a importação, o aplicativo formata a pré-visualização dos dados conforme a Figura 19(b). Essa forma de apresentação dos dados, muito mais intuitiva ao usuário, também é o padrão para quando são carregados arquivos do tipo .csv separados por vírgula (,) ou arquivos Excel de uma forma geral.

Uma vez preenchidos os campos da janela inicial, o usuário pode avançar para a próxima etapa do programa, onde é feita a correspondência entre os nomes de variáveis encontrados no arquivo original e uma lista de variáveis pré-definidas (Figura 20). Essa lista buscou abranger a maioria das variáveis esperadas para o banco de dados, tais como número sequencial original das pesagens (SEQ_ORIG), data e hora (DATA_HORA), peso bruto total (PBT), pesos por eixos ou grupos de eixos, etc. Para casos excepcionais de variáveis de interesse não previstas, o aplicativo permite a adição de novas variáveis, para as quais o usuário pode definir manualmente um rótulo padrão. Para limitar o tamanho do banco final, variáveis desnecessárias podem ser ignoradas na correspondência ao selecionar “-” na lista. Esse é o caso de variáveis como PBT limite, limite de peso por eixo e identificações de veículos com excessos que, embora de interesse para as análises, podem ser inferidas a partir da classe do veículo e dos seus tipos de eixo, por exemplo. Nessa etapa tomou-se o cuidado para que não fosse permitido ao usuário prosseguir tendo atribuído um mesmo rótulo a diferentes variáveis do arquivo original. Caso isso ocorra, o usuário é informado do erro e solicitado para corrigi-lo antes de prosseguir.

Figura 19 - Autodetecção de ponto e vírgula como separador



(a)

Pré-visualização dos dados

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
0	Rodovia	Classificação	Data	Hora	Posto	PTB (kg)	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	BR101 Km 97 Norte	2S3	01/07/2017	00:01:30	Campos do Goytacazes/RJ	42130	5470	10870	25790	0	0	0
2	BR101 Km 97 Norte	3S3	01/07/2017	00:25:48	Campos do Goytacazes/RJ	44280	4960	17620	21700	0	0	0
3	BR101 Km 97 Norte	3S3	01/07/2017	00:43:54	Campos do Goytacazes/RJ	52360	6000	17000	29360	0	0	0
4	BR101 Km 97 Norte	3S3	01/07/2017	01:09:31	Campos do Goytacazes/RJ	40500	6460	16420	17620	0	0	0
5	BR101 Km 97 Norte	3S3	01/07/2017	01:09:39	Campos do Goytacazes/RJ	37140	6370	14830	15940	0	0	0
6	BR101 Km 97 Norte	2S3	01/07/2017	01:26:41	Campos do Goytacazes/RJ	40660	5460	11170	24030	0	0	0
7	BR101 Km 97 Norte	3D4	01/07/2017	01:51:21	Campos do Goytacazes/RJ	70280	5860	20980	22750	20690	0	0
8	BR101 Km 97 Norte	3I3	01/07/2017	01:55:13	Campos do Goytacazes/RJ	51850	6280	15510	11470	9310	9280	0
9	BR101 Km 97 Norte	3S3	01/07/2017	02:01:52	Campos do Goytacazes/RJ	47830	6690	17380	23760	0	0	0

continua...

Os dados estão separados por ponto e vírgula (;) Cada linha representa apenas um único veículo

(b)

(fonte: elaborado pelo autor)

Após realizar as correspondências desejadas, o aplicativo converte o arquivo – ou série de arquivos – original seguindo as premissas informadas e exporta os dados já convertidos em um arquivo do tipo .csv separado por vírgula (Figura 21(a)). Esse formato foi selecionado para essa etapa por ser computacionalmente mais leve do que um equivalente em Excel (.xlsx), conduzindo a tempos menores de processamento. Além disso, caso o usuário necessite de uma visualização mais clara dos dados, esse formato de arquivo pode ser aberto diretamente no Excel (Figura 21(b)), ainda que não seja a ferramenta mais adequada para grandes volumes de dados.

Figura 20 - Janela para correlação e padronização dos nomes de variáveis

LAPAV Convert

Selecione as variáveis do banco correspondentes a cada uma das variáveis do arquivo importado. Para ignorar alguma variável, selecione "-". Para adicionar uma nova variável, selecione "Adicionar Variável" e defina um rótulo para a variável.

Pesagem:	SEQ_ORIG	
Data e hora:	DATA_HORA	
Pes. dia:	-	
Classifica ^{◆◆} :	CLASSE_DNIT	
Velocidade:	VELOCIDADE	
PBT:	PBT	
Limite:	-	
Viola ^{◆◆} o de Altura (0=n [◆]):	ALTURA	
Opera ^{◆◆} o: 1-Fora 2-Dentro 3-A:	OPERACAO	
PBT OK:	-	
Eixos do ve [◆] culo OK:	-	
Nr. do grupo:	GRUPO	
Peso do grupo:	PESO	
Limite do grupo:	DIST_E5_E6	
Grupo OK:	DIST_E6_E7	
Unnamed: 15:	DIST_E7_E8	
	DIST_E8_E9	
	DIST_E9_E10	
	DIST_E10_E11	
	GRUPO	
	EIXO	
	PESO	
	Adicionar Variável	

Converter e exportar

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 - Arquivo de saída do aplicativo

```

pesagem_ID003_convertida_a.csv - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
SEQ_ORIG,DATA_HORA,CLASSE_DNIT,VELOCIDADE,PBT,ALTURA,OPERACAO,G1,G2,G3,G4,G5,G6,G7,G8,G9,ID_BALANCA
12430362,01/01/2017 00:05:03,3C,35,18740,0,1,5710.0,13030.0,,,,,,3
12430363,01/01/2017 00:12:21,2S2,35,27640,0,1,5110.0,8070.0,14470.0,,,,,,3
12430364,01/01/2017 00:26:35,3C,45,21820,0,1,6800.0,15010.0,,,,,,3
12430365,01/01/2017 00:29:58,2C,34,10960,0,1,2640.0,8330.0,,,,,,3
12430366,01/01/2017 00:30:01,3C,34,11330,0,1,4130.0,7200.0,,,,,,3
12430367,01/01/2017 00:30:03,2C,33,6850,0,1,3140.0,3720.0,,,,,,3
12430368,01/01/2017 00:31:42,2S2,21,30750,0,1,6050.0,6050.0,18650.0,,,,,,3
12430369,01/01/2017 00:34:38,3C,38,20070,0,1,6090.0,13980.0,,,,,,3
12430370,01/01/2017 00:46:32,2C,39,6630,0,1,3340.0,3290.0,,,,,,3
12430371,01/01/2017 00:46:35,3C,39,12530,0,1,3960.0,8570.0,,,,,,3
12430372,01/01/2017 00:47:48,2S2,42,17980,0,1,5020.0,5480.0,7470.0,,,,,,3
12430373,01/01/2017 00:51:25,2S1,38,21220,0,1,6370.0,9730.0,5120.0,,,,,,3
12430374,01/01/2017 01:06:49,3C,39,19180,0,1,5730.0,13440.0,,,,,,3
12430375,01/01/2017 01:10:17,3C,37,18470,0,1,5330.0,13140.0,,,,,,3
12430376,01/01/2017 01:11:39,2C,30,6040,0,1,2900.0,3130.0,,,,,,3
12430377,01/01/2017 01:19:30,3C,38,18180,0,1,5240.0,12940.0,,,,,,3
12430378,01/01/2017 01:28:26,3C,42,19560,0,1,5880.0,13670.0,,,,,,3
12430379,01/01/2017 01:28:51,3C,33,20060,0,1,6570,0,13540,0,,,,,3
Ln 1, Col 1      100%  Windows (CRLF)  UTF-8

```

(a)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	SEQ_ORIG	DATA_HORA	CLASSE_DNIT	VELOCIDADE	PBT	ALTURA	OPERACAO	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	ID_BALANCA
2	12430362	01/01/2017 00:05	3C	35	18740	0	1	5710	13030								3
3	12430363	01/01/2017 00:12	2S2	35	27640	0	1	5110	8070	14470							3
4	12430364	01/01/2017 00:26	3C	45	21820	0	1	6800	15010								3
5	12430365	01/01/2017 00:29	2C	34	10960	0	1	2640	8330								3
6	12430366	01/01/2017 00:30	3C	34	11330	0	1	4130	7200								3
7	12430367	01/01/2017 00:30	2C	33	6850	0	1	3140	3720								3
8	12430368	01/01/2017 00:31	2S2	21	30750	0	1	6050	6050	18650							3
9	12430369	01/01/2017 00:34	3C	38	20070	0	1	6090	13980								3
10	12430370	01/01/2017 00:46	2C	39	6630	0	1	3340	3290								3
11	12430371	01/01/2017 00:46	3C	39	12530	0	1	3960	8570								3
12	12430372	01/01/2017 00:47	2S2	42	17980	0	1	5020	5480	7470							3
13	12430373	01/01/2017 00:51	2S1	38	21220	0	1	6370	9730	5120							3
14	12430374	01/01/2017 01:06	3C	39	19180	0	1	5730	13440								3
15	12430375	01/01/2017 01:10	3C	37	18470	0	1	5330	13140								3
16	12430376	01/01/2017 01:11	2C	30	6040	0	1	2900	3130								3
17	12430377	01/01/2017 01:19	3C	38	18180	0	1	5240	12940								3
18	12430378	01/01/2017 01:28	3C	42	19560	0	1	5880	13670								3

(b)

(fonte: elaborado pelo autor)

3.2.2 Criação de um Banco SQL Unificado

Uma vez que todos os dados recebidos foram devidamente convertidos e padronizados, tornou-se possível a criação de um grande banco de dados unificado, contendo as informações referentes a todas as balanças estudadas. Para tal, optou-se por utilizar um banco SQL (*Structured Query Language*) com armazenamento local, que foi povoado com os arquivos .csv gerados na etapa anterior. As variáveis incluídas no banco são descritas na Tabela 18.

Na etapa de povoamento do banco de dados, a variável DATA_HORA, presente em muitos dos arquivos originais, foi dividida em DATA e HORA, permitindo que pesagens contendo apenas DATA ou apenas HORA mantivessem suas informações originais. Os formatos de data e hora também foram verificados e convertidos, quando necessário, para atender o formato ano-mês-dia (yyyy-mm-dd) e hora:minuto:segundo (HH:MM:SS). Nessa etapa também foi criado um

algoritmo para converter pesagens de eixos isolados em pesagem por grupo de eixos, tomando por base a classificação dos veículos e seus respectivos tipos de eixos (ESRS, EDD, ESRD, EM, ETD e ETT). O banco resultante continha as pesagens dos 38 milhões de veículos nas balanças estudadas, ocupando cerca de 5 GB em disco.

Tabela 18 - Variáveis do banco de dados SQL

Variável	Formato	Descrição	Unidade
ID	INTEGER	número de identificação único dentro do banco	-
INSERIDO	TEXT	data-hora de inserção no banco	yyyy-mm-dd HH:MM:SS
ID_BALANCA	TEXT	número de identificação da balança	-
SEQ_ORIG	INTEGER	identificação original da pesagem	-
PLACA	TEXT	placa do veículo	-
DATA	TEXT	data da pesagem	yyyy-mm-dd
HORA	TEXT	hora da pesagem	HH:MM:SS
CLASSE_DNIT	TEXT	classificação do veículo de acordo com o QFV/DNIT	-
PBT	INTEGER	peso bruto total	kg
G1	INTEGER	peso do grupo 1 de eixos	kg
G2	INTEGER	peso do grupo 2 de eixos	kg
G3	INTEGER	peso do grupo 3 de eixos	kg
G4	INTEGER	peso do grupo 4 de eixos	kg
G5	INTEGER	peso do grupo 5 de eixos	kg
G6	INTEGER	peso do grupo 6 de eixos	kg
G7	INTEGER	peso do grupo 7 de eixos	kg
G8	INTEGER	peso do grupo 8 de eixos (só ocorre em pesagens errôneas)	kg
G9	INTEGER	peso do grupo 9 de eixos (só ocorre em pesagens errôneas)	kg
E1	INTEGER	peso do eixo isolado 1	kg
E2	INTEGER	peso do eixo isolado 2	kg
E3	INTEGER	peso do eixo isolado 3	kg
E4	INTEGER	peso do eixo isolado 4	kg
E5	INTEGER	peso do eixo isolado 5	kg
E6	INTEGER	peso do eixo isolado 6	kg
E7	INTEGER	peso do eixo isolado 7	kg
E8	INTEGER	peso do eixo isolado 8	kg
E9	INTEGER	peso do eixo isolado 9	kg
E10	INTEGER	peso do eixo isolado 10	kg
VELOCIDADE	REAL	velocidade observada na balança	km/h
COMPRIMENTO	INTEGER	comprimento do veículo	m
MOTIVO	BLOB	? [depende do banco original]	-
ALTURA	BLOB	indicador de violação de altura [depende do banco original]	-
FUGA	BLOB	indicador de fuga da balança [depende do banco original]	-
OPERACAO	BLOB	indicador de operação da balança [depende do banco original]	-
FISCAL	BLOB	indicador de fiscal presente [depende do banco original]	-

(fonte: elaborado pelo autor)

3.2.3 Limpeza dos Dados

Com os dados brutos armazenados e organizados em um banco único, preocupou-se em detectar possíveis erros ou inconsistências nas informações ali contidas. Para isso, foi realizada uma etapa de limpeza dos dados, focada em detectar e sanar os seguintes problemas:

- a) entradas duplicadas no banco (DUPL);
- b) pesagens sem registro de classe DNIT (SEM_CL);
- c) pesagens com registro de peso igual a zero no primeiro e/ou segundo eixo/grupo de eixos (SEM_PES);
- d) veículos cujo número de eixos/grupos de eixos registrados era diferente do número de eixos/grupo de eixos esperado para a classe DNIT informada (ER_CL).

Dos problemas identificados acima, vale ressaltar que o primeiro pode ser inerente ao processo de importação de dados de um mesmo período armazenados em arquivos diferentes, não tendo relação direta com a coleta de dados e, portanto, não sendo indicador de má qualidade destes. Por outro lado, os outros três pontos são resultantes de problemas no processo de coleta de dados, seja por falha nos sensores ou algum outro equipamento (*hardware*) ou na lógica por trás do armazenamento original (*software*).

Ao todo, foram detectadas e removidas 4.454.228 pesagens duplicadas (12% do total inicial) – cuja absoluta maioria dizia respeito a arquivos duplicados das pesagens de Queluz –, 724.386 pesagens sem (ou com erro de) classificação (2% do total inicial), 200.975 sem peso nos eixos dianteiros (0,5% do total inicial) e 801 pesagens com número de eixos diferente do esperado para sua classe (0,002% do total). Por fim, ainda foram encontradas 50 entradas com pesagens absolutamente fora do intervalo esperado (da ordem de milhões de kg por eixo) que também foram removidas do banco. O número de pesagens removidas e restantes de cada balança estudada é apresentado na Tabela 19. Também são explicitados, para cada posto, os percentuais removidos devido a entradas duplicadas (DUPL), sem classe (SEM_CL), sem pesagem nos primeiros eixos (SEM_PES) e com erro de classificação (ER_CL), assim como o percentual de pesagens restantes, em comparação ao número de pesagens original.

Após a limpeza dos dados, percebeu-se que cerca de 30% das entradas do banco possuíam PBT diferente da soma dos pesos individuais de cada eixo/grupo de eixos, ainda que apenas 0,01% apresentassem diferenças superiores a 1%. Possivelmente, essas pequenas diferenças sejam decorrentes de arredondamentos das pesagens durante a coleta dos dados em campo. Esses valores de PBT foram então manualmente corrigidos para corresponderem exatamente à soma

dos pesos dos eixos. Feita essa correção, uma nova tabela foi criada no banco SQL para armazenar apenas as pesagens resultantes da limpeza de dados, a qual serviu de base para as análises deste trabalho.

Tabela 19 - Número de pesagens restantes após a limpeza dos dados

Balança	Pesagens Originais	Pesagens Removidas (%DUPL;%SEM_CL;%SEM_PES;%ER_CL)	Pesagens Restantes (percentual do original)
Araxá	766.958	1.540 (0%;-;0%;0%)	765.418 (100%)
Comendador Gomes	583.473	199.894 (-;0%;34%;0%)	383.579 (66%)
Magé	3.516.008	175.002 (2%;3%;0%;0%)	3.341.006 (95%)
Paracambi	5.438.677	148.959 (-;3%;-;-)	5.289.718 (97%)
Resende	7.144.065	146.123 (-;2%;-;-)	6.997.942 (98%)
Queluz	14.146.645	4.533.412 (31%;1%;-;-)	9.613.233 (68%)
Guararema	5.634.194	156.314 (-;3%;-;-)	5.477.880 (97%)
Retiro	256.911	4.515 (-;2%;0%;-)	252.396 (98%)
Capão Seco	609.383	14.682 (-;2%;0%;-)	594.701 (98%)
Total	38.096.313	5.380.441 (12%;2%;1%;0%)	32.715.873 (86%)

(fonte: elaborado pelo autor)

3.3 VISUALIZAÇÃO DE DADOS

Dada a escala do número de dados a serem analisados, torna-se inviável analisar cada um deles na sua individualidade. Por isso as etapas de preparação dos dados, descritas acima, são tão importantes na ciência de dados. É necessário garantir que a massa de dados esteja minimamente padronizada, de modo a permitir que seja analisada sob uma ótica mais ampla e assim explorar comportamentos e padrões de todo o conjunto de dados. Nessa fase, ferramentas visuais de análise podem ser extremamente poderosas, se utilizadas adequadamente, auxiliando na exploração e interpretação dos dados.

Aqui, duas escalas de abordagem foram tomadas: (i) análises comparativas considerando todas as balanças analisadas; (ii) análises detalhadas e individuais de cada uma das balanças. Para o primeiro conjunto de análises, foram observadas linhas temporais dos dados com relação às cargas e aos volumes de veículos pesados, e as distribuições de cargas para as diferentes balanças na forma de gráficos de caixa (*boxplot*), histogramas e funções de densidade do tipo KDE (*kernel density estimation*). Já para as análises detalhadas por balança, uma rotina computacional foi gerada em Python, cujas etapas são descritas a seguir.

3.3.1 Classes de Veículo Mais Comuns na Frota

A partir do banco de dados criado no item 3.2.2 *Criação de um Banco SQL Unificado*, as pesagens eram filtradas pelo número de identificação de cada balança e carregadas pela rotina. Então, a primeira etapa de análises consistia em contabilizar as classes de todos os veículos e resumi-las em uma tabela por ordem de frequência – da classe mais comum para a menos comum. As 10 classes mais comuns ainda eram apresentadas na forma de gráficos de barras.

3.3.2 Tempo de Operação da Balança e Distribuição Horária do Tráfego

Com o intuito de estimar o tempo de operação de cada uma das balanças, a próxima etapa da rotina organizava as pesagens em ordem cronológica e calculava o intervalo de tempo entre as pesagens consecutivas. Os intervalos eram então plotados na forma de um histograma de frequências acumulado com intervalos de 15 segundos, indicando uma faixa de intervalos comuns entre dois veículos consecutivos. Assim, foi possível argumentar que pesagens consecutivas que ocorressem com intervalos superiores a um dado patamar eram devidas à uma interrupção na coleta de dados e, a partir daí, estimar os períodos em que a balança estava ou não operante.

Além da estimativa do tempo de operação das balanças, utilizando as informações de hora das pesagens também foi possível construir histogramas com a distribuição horária das pesagens em cada balança. Os gráficos foram gerados de forma a apresentar o percentual de veículos observados na balança a cada hora do dia.

3.3.3 Identificação dos Tipos de Eixos e Extração de Métricas de Sobrecarga

A terceira etapa da rotina elaborada consistia em cruzar a classe de cada veículo com a classificação contida no QFV/DNIT, apresentada na seção 2.2.3 *Classificação de Veículos*, de forma a identificar o tipo de cada um dos eixos e seus respectivos limites. Para isso, uma tabela auxiliar foi montada a partir do QFV, convertendo o documento em uma tabela consultável. A lista resumo do QFV gerada pode ser encontrada no *Apêndice A*.

A partir daí, era possível contabilizar a quantidade de cada um dos diferentes tipos de eixo que compunham a frota de cada ponto estudado, assim como identificar os percentuais de excessos

observados. Também foram extraídas métricas de número de veículos com excesso no PBT, no eixo ou em ambos, e o número de veículos infratores de acordo com a Lei 13.103 – vigente até 21/10/2021 – e de acordo com a Lei 14.229 – atualmente em vigência.

3.3.4 Histogramas da Carga Real Observada

Para cada uma das balanças estudadas, foram construídos histogramas contendo os espectros de carga tanto do PBT dos veículos quando das cargas observadas por tipo de eixo. Os espectros foram normalizados com relação aos seus limites legais, de modo a facilitar a sua interpretação e a percepção dos excessos acima dos limites legais. Os espectros assim construídos também são conhecidos como *Normalized Axle Load Spectra* (NALS) e são comumente usados em algoritmos de *clustering* para agrupar espectros similares (TAHAEI et al., 2021).

Os gráficos contendo os histogramas foram construídos em intervalos de 2,5% da carga máxima permitida, cada um apresentando o percentual de eixos/veículos no dado intervalo. Ainda foram destacados nos gráficos o limite legal ($carga / carga\ máxima = 1,00$) e as tolerâncias atuais de 5% no PBT e de 12,5% no eixo.

Também foram comparados os espectros de carga entre os períodos diurno e noturno em cada balança. Essa comparação partiu da premissa de que, apesar de haver postos de pesagem em rodovias brasileiras (os deste estudo, inclusive) coletando dados de forma praticamente ininterrupta (24 h/dia, exceto em pausas por falha, manutenção ou calibração), muitos operam de forma coercitiva apenas em horário comercial. Dessa forma, pode haver um estímulo para que veículos sobrecarregados trefeguem mais durante o período noturno, o que poderia ser traduzido numa mudança do comportamento dos espectros de carga entre os períodos diurno e noturno. Foi definido como diurno o período compreendido entre 6 h e 18 h, e como noturno o período entre as 18 h e as 6 h do dia seguinte. Para os dados de pesagem que continham informação sobre a fiscalização do PPV, isso foi utilizado para gerar um comparativo adicional entre os espectros do período fiscalizado e não fiscalizado.

3.4 ANÁLISES QUANTITATIVAS

Embora a visualização dos dados na forma gráfica, descrita nos itens anteriores, permita desenvolver um bom entendimento do comportamento geral na massa de dados, este trabalho

se propôs a apresentar métricas quantitativas acerca do cenário de cargas no país. Para isso, algumas análises mais aprofundadas foram propostas, de forma que seus resultados possam contribuir de forma objetiva para o estado da prática da pavimentação nacional. Assim, as análises quantitativas realizadas são descritas a seguir.

3.4.1 Cálculo do Número N e do Fator de Veículo Médio da Frota Comercial

Apesar de não serem o ponto focal de discussão neste trabalho, entende-se que o conceito de número N e de fator de veículo é muito difundido no meio técnico da pavimentação. Assim, para caracterizar as frotas estudadas numa base comparável ao estado da prática da engenharia de pavimentos e a outros estudos que porventura venham a se basear nesse conceito, foram calculados o número N e o fator de veículo médio da frota comercial (FVc) para todas as balanças estudadas, utilizando as equações do DNIT para a metodologia USACE e AASHTO, apresentadas na seção 2.2.2 *Fatores de Equivalência de Carga*. Os fatores de equivalência de carga, FC , foram aplicados individualmente a cada eixo, j , de cada veículo, i , observados na frota, obtendo-se assim o número equivalente de passagens de um eixo padrão no período, $N_{período}$, e o fator veicular médio da frota comercial, FVc , de acordo com as equações 5 e 6 abaixo:

$$N_{período} = \sum_{i,j=0}^{i=n,j=m_i} FC_{i,j} \quad (5)$$

$$FVc = \frac{N_{período}}{n} \quad (6)$$

onde n é o número total de veículos observado na balança durante o período, e m_i é o número de eixos de cada veículo i .

Também foram avaliados diferentes cenários de carga, limitando os eixos à legislação de 2015 e à de 2021, por exemplo. Para tal, eventuais excessos acima das tolerâncias vigentes foram removidos da frota, mantendo veículos parcial ou totalmente vazios inalterados. Para as tolerâncias por eixo mais flexíveis que a tolerância no PBT, o algoritmo utilizado seguiu as seguintes etapas:

- a) remover excessos acima das tolerâncias no eixo;

- b) calcular o PBT resultante após remoção dos excessos nos eixos;
- c) se PBT resultante > tolerância permitida, dividir e remover o excesso do PBT igualmente de cada um dos eixos;
- d) recalculando o PBT resultante.

Não foi avaliada, em nenhum dos casos estudados, a realocação da carga excedente em outros veículos da frota, o que poderia, em tese, elevar os fatores calculados. Além disso, em todos os cenários a tolerância de excesso no PBT foi mantida em 5%, exceto no cenário real, onde as cargas não foram limitadas, sendo computadas tal qual registradas no banco de dados.

3.4.2 Exportação dos Espectros de Carga na Forma de Tabelas

Para permitir a utilização dos espectros de carga obtidos no presente estudo em futuros estudos de tráfego, a rotina foi programada para exportar arquivos Excel (.xlsx) contendo as frequências de eixos observados em cada intervalo de carga. Foram construídos dois arquivos para cada balança. O primeiro era gerado no formato de entrada do *AASHTOWare PavementME Desing*, divididos em eixos *single* (em intervalos de 500 kg), *tandem* (em intervalos de 1.000 kg) e *tridem* (em intervalos de 1.500 kg), conforme discutido no capítulo 2.5, para cada mês e ano contido no banco. Nesse caso, os eixos ESRS e ESRD foram considerados como *single*, e o EDD foi considerado como 2 *singles*. O segundo arquivo dividiu os eixos em ESRS, EDD, ESRD, ETD e ETT, todos em intervalos de 500 kg, variando entre 0 kg e o eixo mais pesado observado em cada balança. Os espectros de carga podem ser encontrados em forma digital no *Apêndice F*.

3.4.3 Métricas Estatísticas dos Dados de Pesagem

A extração de métricas estatísticas dos dados analisados permite resumir de forma quantitativa as distribuições visualizadas na forma de histogramas de espectros de carga. Assim, foram verificadas, tanto de forma individual por balança como de forma global, para cada tipo de eixo estudado, os seguintes parâmetros estatísticos:

- a) número total de eixos observados;
- b) carga média por eixo;
- c) desvio padrão da carga por eixo;

- d) valor mínimo de carga observado;
- e) carga correspondente ao primeiro quartil (25%) do espectro;
- f) carga correspondente ao segundo quartil (50% ou mediana) do espectro;
- g) carga correspondente ao terceiro quartil (75%) do espectro;
- h) valor máximo de carga observado.

Na tentativa de detectar leituras estranhamente incomuns na amostra estudada (i.e. *outliers*, “pontos fora da curva”), três abordagens foram utilizadas. A primeira é a mesma utilizada por padrão na geração de gráficos de caixa (*boxplots*) através da biblioteca *seaborn* utilizada no estudo, baseada 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 – comumente $1,5 \cdot IQR$. O multiplicador de 1,5 é comumente utilizado por resultar em limites inferior, LI e superior, LS , tais que abrangem aproximadamente 99% de uma distribuição normal. Assim, os limites inferior e superior para a detecção de *outliers* seriam, respectivamente:

$$LI = Q_1 - 1,5 \cdot IQR = Q_1 - 1,5 \cdot (Q_3 - Q_1) \quad (7)$$

$$LS = Q_3 + 1,5 \cdot IQR = Q_3 + 1,5 \cdot (Q_3 - Q_1) \quad (8)$$

A segunda abordagem utilizada, bastante utilizada 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), de fácil implementação com o auxílio da biblioteca *scikit-learn*. O algoritmo baseia-se no conceito de vizinhos mais próximos (ou *nearest neighbors*) e consiste em atribuir um grau de anomalia – chamado *local outlier fator (LOF)* – para cada

ponto, em comparação aos seus n vizinhos mais próximos (aqui assumido como $n = 40$), tomando por base a distância euclidiana entre os pontos avaliados.

3.4.4 Considerações de Carga Propostas para a Caracterização das Balanças Estudadas

Conforme verificado no capítulo 2.5 *CONSIDERAÇÕES DE CARGA PARA PROJETOS DE PAVIMENTAÇÃO*, 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 estudos de novas concessões discutidos naquele capítulo. 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*.

Ciente das limitações brasileiras, este estudo se propôs, além dos espectros gerados no item 3.4.2, a determinar níveis de carga que pudessem ser incorporados na metodologia atualmente em prática no Brasil, mas a partir de hipóteses mais robustas e formuladas com base em dados reais de pesagens obtidos em diversos PPVs do país. Assim, as métricas estatísticas estabelecidas no item anterior foram utilizadas como delimitadores de três grupos de carregamento para cada tipo de eixo, alinhados com o estado da prática brasileiro:

- 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.

Aqui, adotou-se a nomenclatura “descarregados” em lugar do habitual “vazios”, entendendo que a busca pela redução dos custos de frete – natural de um cenário econômico comercial – sempre priorizará a otimização do transporte de cargas, tornando viagens de veículos totalmente vazios um extremo bastante incomum em qualquer frota comercial. Uma vez determinados os grupos de carregamento que serão utilizados para caracterizar as frotas das balanças estudadas, assim como seus respectivos limites inferior e superior, foi possível extrair, a partir dos dados de pesagem, o percentual de eixos considerados descarregados, carregados e sobrecarregados.

A partir de então, a próxima etapa ocupou-se em definir que cargas seriam representativas de cada grupo proposto. Talvez a solução mais conservadora seria adotar o limite superior de cada intervalo proposto, ficando em favor da segurança ao garantir que nenhuma carga daquele grupo seria subestimada pelo valor utilizado. Entretanto, essa opção poderia facilmente superestimar as cargas da frota, principalmente com a adoção da carga máxima observada como representativa do grupo sobrecarregado. Outra opção, mais moderada, poderia sugerir a adoção do ponto médio de cada intervalo como representativo de cada grupo, entendendo que as cargas acima do ponto médio seriam compensadas pelas cargas abaixo dele. Contudo, como pontuado na seção 2.2.2, o dano causado por um dado eixo ao pavimento se relaciona com as cargas aproximadamente na forma de uma lei de quarta potência (Equação 1). Assim sendo, ao adotar o ponto médio de cada intervalo como representativo de cada grupo, as cargas da frota estariam sendo subestimadas, dada a evolução de quarta potência do dano em função das cargas aplicadas.

Foi assumindo a natureza de quarta potência do dano em função das cargas que se convencionou, neste estudo, o centro geométrico de uma função do tipo $f(x) = x^4$ como representativo das cargas de cada intervalo delimitado. Dividindo-se a área sombreada da Figura 22 entre os limites inferior, x_i , e superior, x_s , em faixas ∂A de largura infinitesimal ∂x e altura $f(x) = x^4$, o centro geométrico, x_c , de cada intervalo pode ser tomado como a média dos centros de cada faixa infinitesimal ponderada pela sua área, ∂A , conforme demonstrado a seguir.

$$x_c = \frac{\int x \cdot dA}{\int dA} = \frac{\int x \cdot f(x) \cdot dx}{\int f(x) \cdot dx} = \frac{\int x \cdot x^4 \cdot dx}{\int x^4 \cdot dx}$$

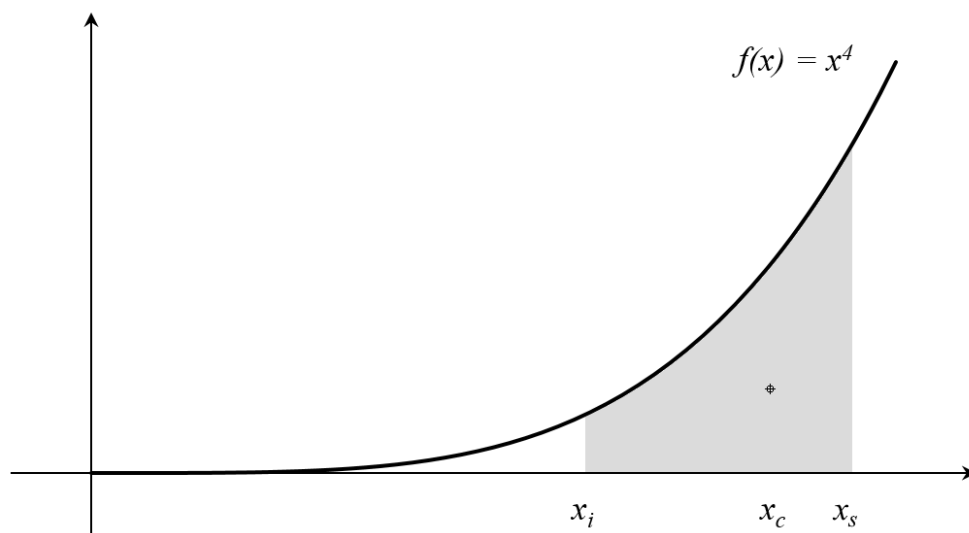
$$x_c = \frac{\int_{x_i}^{x_s} x^5 dx}{\int_{x_i}^{x_s} x^4 dx} = \frac{\frac{x^6}{6} \Big|_{x_i}^{x_s}}{\frac{x^5}{5} \Big|_{x_i}^{x_s}} = \frac{\frac{x_s^6 - x_i^6}{6}}{\frac{x_s^5 - x_i^5}{5}}$$

$$x_c = \frac{5}{6} \cdot \frac{x_s^6 - x_i^6}{x_s^5 - x_i^5} \quad (9)$$

Aplicando a premissa acima, foram calculados os centros geométricos, x_c , dos grupos *descarregados* e *carregados*, considerando como limites inferior, x_i , e superior, x_s , as métricas estatísticas globais – com base em todas as balanças estudadas – descritas anteriormente, para

cada tipo de eixo (ESRS, EDD, ESRD, ETD e 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 o limite inferior do grupo (CML) e seu limite superior (carga máxima observada) resultou em valores atípicos de carga, principalmente se considerarmos 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 $1,10 \cdot \text{CML}$, correspondente a tolerância por eixo de 10% acima da CML. Esse valor foi determinado através 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 veículo a veículo a partir dos dados de pesagem. Aqui, foram considerados os FVc calculados de acordo com as equações do DNIT para a metodologia AASHTO (Quadro 1) e USACE (Quadro 2).

Figura 22 - Centro geométrico da área sob uma curva de quarta potência



(fonte: elaborado pelo autor)

3.4.5 Algoritmos de Agrupamento (*Clustering*)

As considerações desenvolvidas no item anterior permitiram a caracterização dos níveis de carga para cada um dos pontos de pesagem estudados neste trabalho, agrupados na convenção de eixos *descarregados*, *carregados* e *sobrecarregados*. Também de acordo com o item anterior foram estimadas quais seriam as cargas representativas de cada um dos grupos de carga propostos, permitindo sua utilização na estimativa das cargas de projeto.

Esses dois pontos visam atender – consideradas as limitações do trabalho – o objetivo geral desta pesquisa: propor níveis de carregamento da frota rodante em rodovias brasileiras. Entretanto, para facilitar o uso dos resultados obtidos na prática da pavimentação rodoviária, esta etapa adicional do trabalho buscou agrupar os trechos estudados de acordo com as suas características observadas. Assim, futuros trabalhos poderão utilizar as características do ponto de interesse como comparação ou até mesmo para aplicar diretamente os resultados aqui encontrados.

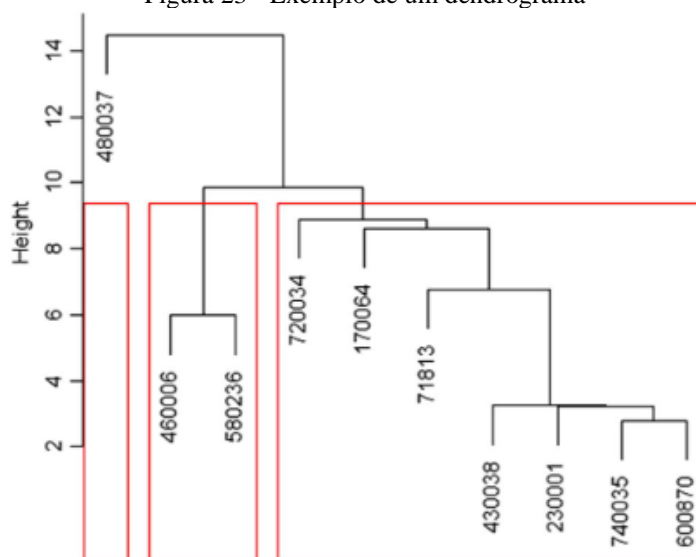
Devido à necessidade de utilização de espectros de carga como dado de entrada do *AASHTOWare PavementME* na metodologia proposta pelo MEPDG, conforme discutido brevemente no capítulo 2.5, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos recentemente nos Estados Unidos com o intuito de fornecer espectros de carga padrão para quando da inexistência do dado detalhado coletado no ponto de interesse. A proposta desses trabalhos é de agrupar dados de pesagem de diferentes pontos do país em grupos com características similares. Para tal, algoritmos de agrupamento (ou *clustering*), baseados em técnicas de aprendizado de máquina, são propostos para automatizar a segmentação dos grupos.

Hasan, Islam e Tarefder (2016) utilizaram um agrupamento hierárquico para agrupar 10 pontos de pesagem no estado do Novo México, nos EUA, visualizados na forma de um dendrograma. Os autores agruparam os trechos tanto de acordo com suas distribuições de classe veicular (*vehicle class distribution – VCD*) quanto com os espectros de carga por eixo (*axle load spectra – ALS*) propriamente ditos, produzindo resultados igualmente satisfatórios. Com metodologia bastante similar, Jasim, Wang e Bennert (2019) aplicaram um algoritmo de agrupamento hierárquico em um estudo de caso com espectros do estado de Nova Jersey. No estado de Michigan, 41 pontos de pesagem WIM foram agrupados por meio de modelos de classificação (*decision trees, random forests*), utilizando a distância euclidiana entre as variáveis estudadas (AADTT, VCD, ALS, etc.) como medida de distância entre os *clusters* (HAIDER et al., 2019). Também utilizando classes veiculares e espectros de carga, dentre outras variáveis, 20 pontos de WIM no estado de Geórgia foram agrupados em 4 *clusters*, dessa vez utilizando a técnica conhecida como *k-means* (TAHAEI et al., 2021).

Para este trabalho, os PPVs estudados foram agrupados através de um algoritmo hierárquico aglomerativo, auxiliado pela biblioteca *SciPy* para Python. O algoritmo consiste, inicialmente, em comparar os n pontos avaliados com base na distância euclidiana entre suas variáveis, agrupando o par de pontos mais próximos. O primeiro par agrupado é considerado como um

único ponto para a próxima etapa, quando os $n-1$ pontos são novamente comparados de acordo com a distância euclidiana. Assim, o segundo par de pontos é agrupado, repetindo-se os passos até que um único grande grupo seja definido. Para a comparação entre grupos já formados, a métrica utilizada para computar a distância foi a do centroide de cada grupo. Os resultados de cada iteração do processo podem ser visualizados na forma de um dendrograma (do grego antigo *déndron*, árvore) como o da Figura 23. A vantagem do agrupamento hierárquico é que ele permite diferentes “níveis de detalhamento” dos grupos, desde o mais detalhado, nas “folhas” do dendrograma (i.e. cada ponto individual analisado), até o menos detalhado, quando todos os conjuntos de dados são agrupados em um único grande grupo.

Figura 23 - Exemplo de um dendrograma



(fonte: WANG et al., 2011)

Duas formas de agrupamento foram propostas: uma com base nos espectros de carga de PBT normalizados e outra baseada nas classes veiculares observadas em cada PPV. A primeira, buscou agrupar as balanças com foco nos níveis de carga observados, foco principal do trabalho. A segunda abordagem, a partir das classes veiculares, foi proposta para verificar uma eventual correspondência entre os tipos de veículos encontrados na frota e seu comportamento de cargas. Caso a correspondência entre níveis de carga e classes fosse constatada, o enquadramento de rodovias sem dados de pesagem poderia ser facilitado com o uso dos tipos de veículos observados na frota – informação muito mais comum do que a primeira.

Por fim, os grupos obtidos nesse processo foram classificados de acordo com vocação de cada via estudada, de forma a simplificar o enquadramento de rodovias sem dados de pesagem em um dos grupos avaliados.

3.4.6 Bondade do Ajuste (*Goodness of Fit*)

Buscando avaliar a bondade do ajuste (do inglês *goodness of fit*) dado pelas cargas e pelo agrupamento propostos, os fatores de veículo comercial médios, FVc, modelados foram comparados aos fatores reais, calculados eixo a eixo de cada frota estudada. Também foram incluídos na comparação os fatores médios calculados com base nas considerações genéricas de carga discutidas no item 2.5, do tipo 70c-30v e 80c-20v. Como métricas para a avaliação, foram utilizados o erro percentual e o quadrado do coeficiente de correlação do momento do produto de Pearson⁶, r^2 , dados pelas equações 10 e 11, respectivamente. Com o auxílio do *Microsoft Excel*, a equação 11 pode ser facilmente calculada com o uso da função *PEARSON*, e seu quadrado, r^2 , com o uso da função *RQUAD*.

$$\text{erro} [\%] = \frac{FVc_{\text{calculado}}}{FVc_{\text{real}}} - 1 \quad (10)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

onde n é o número de fatores avaliados, x e y são o FVc calculado e real, e \bar{x} e \bar{y} são a média dos FVc calculados e reais.

⁶ Não confundir com o quadrado do coeficiente de determinação, R^2 .

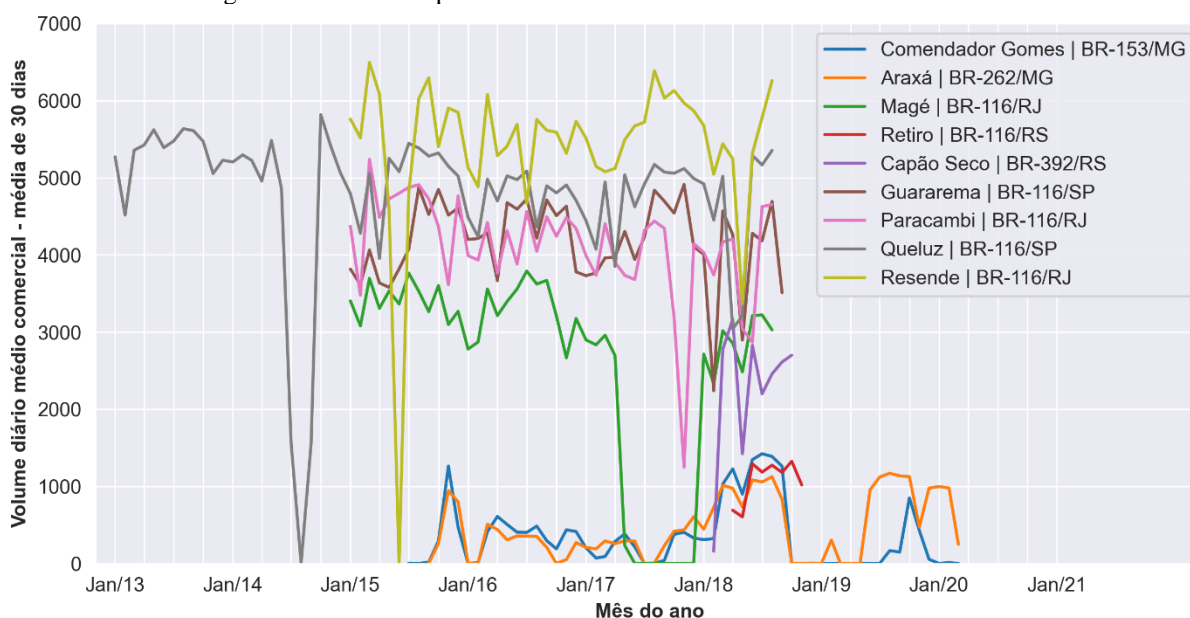
4 RESULTADOS

Este capítulo é destinado para a apresentação e discussões dos resultados das análises do estudo. A metodologia aplicada por trás de cada um dos resultados ora apresentados pode ser encontrada em detalhe no capítulo 3 *MATERIAIS E MÉTODOS*. Será apresentado de forma conjunta uma análise crítica dos resultados para encaminhamento das conclusões do trabalho.

4.1 MÉTRICAS GERAIS OBSERVADAS

A postura exploratória adotada – comum em projetos de ciências de dados – buscou, inicialmente, visualizar e interpretar os dados sob uma perspectiva mais ampla, visando melhor entender a massa de dados estudada. Assim, as figuras 24 e 25 apresentam uma linha do tempo contendo o volume médio mensal de veículos comerciais observados e a carga acumulada por mês, respectivamente, em cada uma das balanças estudadas.

Figura 24 - Linha temporal do volume médio mensal de veículos comerciais



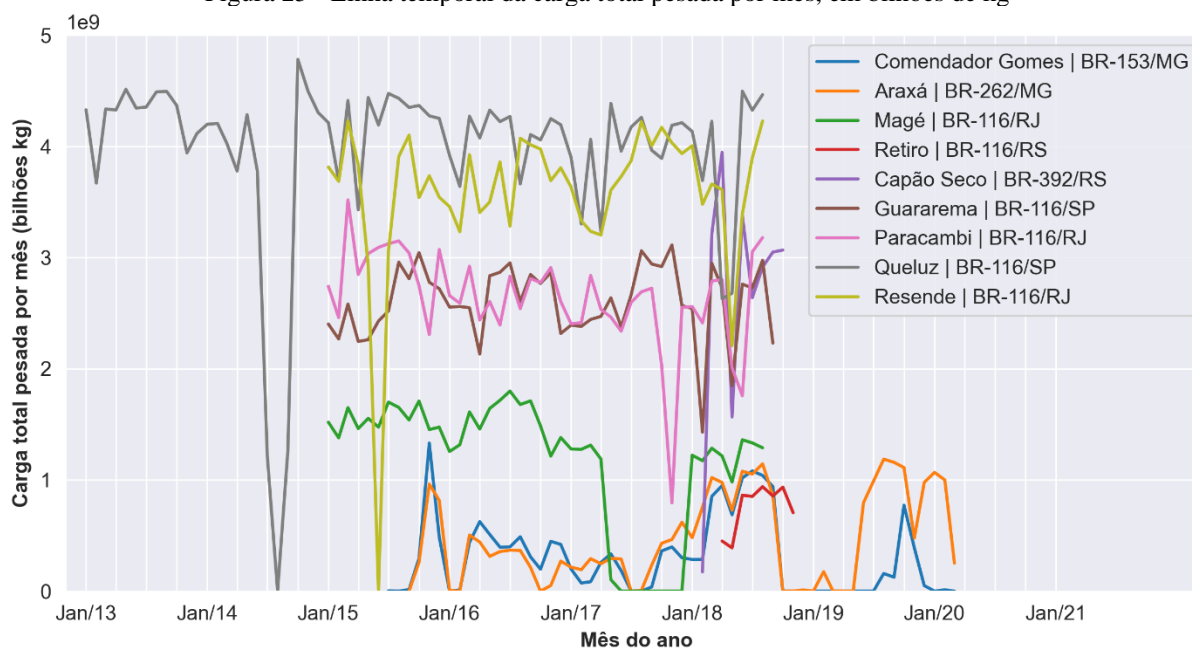
(fonte: elaborado pelo autor)

Embora a balança de Queluz seja a com maior quantidade de dado no banco, fica claro pela Figura 24 que isso se deve ao fato de ela abranger um maior período, sendo a balança de Resende a que apresenta maior número de veículos observados por dia. Ainda assim, nota-se que as quatro balanças do trecho RJ-SP da BR-116 apresentam volumes médios dentro de uma mesma faixa de 4.000 a 6.000 veículos comerciais dia – o que era esperado dada a proximidade entre as balanças –, sendo as que apresentam maior tráfego dentre os pontos estudados. No

outro extremo, as balanças do estado de Minas Gerais são as que apresentam menores volumes médios, seguidas da balança de Retiro, na BR-116/RS.

Com relação à carga total pesada por mês nas balanças (Figura 25), embora seja a segunda mais volumosa em termos de tráfego, Queluz se mostra o ponto com a maior quantidade de cargas transportadas, seguida de perto por Resende. Considerando o menor volume de tráfego e maiores cargas de Queluz em relação a Resende, espera-se que Queluz apresente uma frota composta ou por veículos maiores (i.e. com mais capacidade de carga), ou mais carregados, ou ambos, quando em comparação com Resende. Em termos de carga, ambas se afastam de suas vizinhas do eixo RJ-SP, reforçando a teoria de que elas apresentem um perfil de cargas mais elevadas do que as demais.

Figura 25 - Linha temporal da carga total pesada por mês, em bilhões de kg



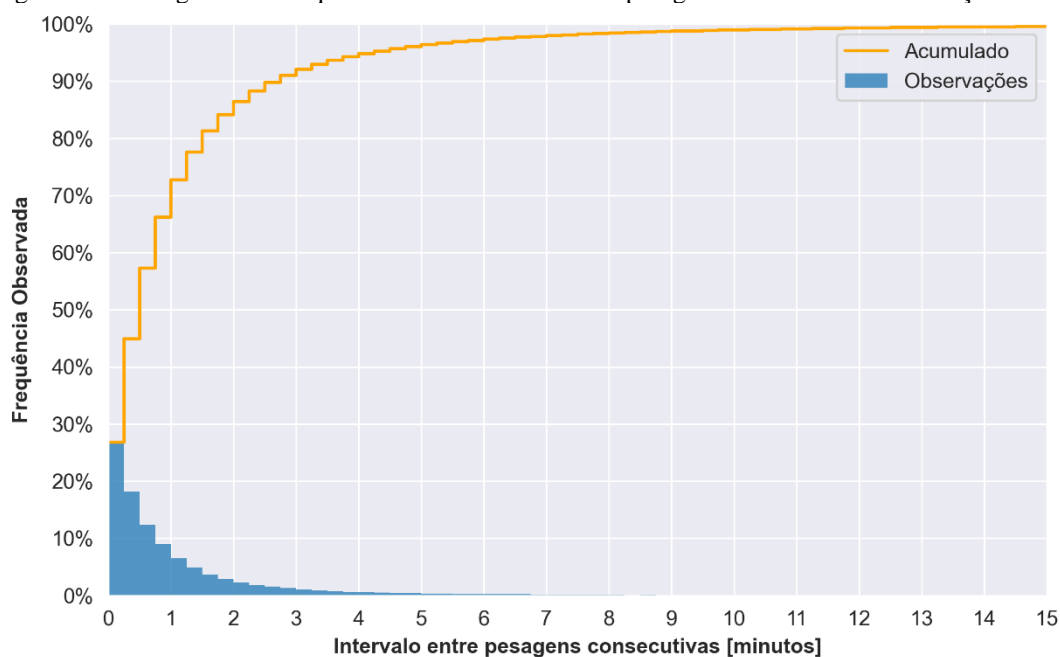
(fonte: elaborado pelo autor)

Tanto para os volumes de tráfego (Figura 24) quanto para as cargas transportadas por mês (Figura 25), é natural esperar leves oscilações entorno de um valor médio. Entretanto, picos ou vales muito acentuados podem indicar inconsistências ou anomalias na coleta de dados. Embora não sejam registrados grandes picos nas amostras estudadas, é possível observar um número considerável de vales nos gráficos. Isso pode ser justificado por períodos de falha na operação das balanças, seja por problemas técnicos, pausas previstas para calibração, entre outros motivos, conforme discutido a seguir. Exemplos podem ser observados nos meses de julho, agosto e setembro de 2014 na balança de Queluz, ou entre meados de 2018 e de 2019 nas balanças de Araxá e Comendador Gomes. Tais falhas dificultam análises de tendências de

sazonalidade ou de evolução das cargas transportadas ao longo dos anos. Entretanto, de forma bastante preliminar, algumas balanças parecem retratar leves tendências de queda no VDMc e de alta nas cargas, como é o caso de Resende, enquanto outras apresentam ligeira redução tanto no tráfego quanto nas cargas transportadas, como observado em Magé e Paracambi.

Na tentativa de estimar o tempo de operação das balanças estudadas, foram gerados histogramas de frequências dos intervalos entre pesagens consecutivas como o da Figura 26, para a balança do Retiro, na BR-116/RS. Os histogramas gerados indicaram que intervalos superiores a 15 minutos entre pesagens são extremamente raros ($< 0,45\%$) nas rodovias estudadas, e assim esse limite foi estabelecido como divisor na delimitação do tempo de operação das balanças. Apesar de algumas balanças, como a do exemplo da Figura 26, sugerirem que o limite considerado poderia ser até menor – da ordem de 8 minutos – optou-se por 15 minutos para se dar vasta segurança ao se conferir a balança como inoperante a partir deste período de tempo sem pesagens. Assim, intervalos entre pesagens consecutivas superiores a 15 minutos foram considerados como decorrência de uma falha na operação da balança, e acumulados para a estimativa do tempo inoperante de cada PPV do estudo. Os resultados assim obtidos são apresentados na Tabela 20, ordenados do maior percentual de operação para o menor. A operação de Magé não pôde ser estimada pois os dados recebidos não continham informação de hora das pesagens neste PPV.

Figura 26 - Histograma de frequências dos intervalos entre pesagens consecutivas na balança do Retiro/RS



(fonte: elaborado pelo autor)

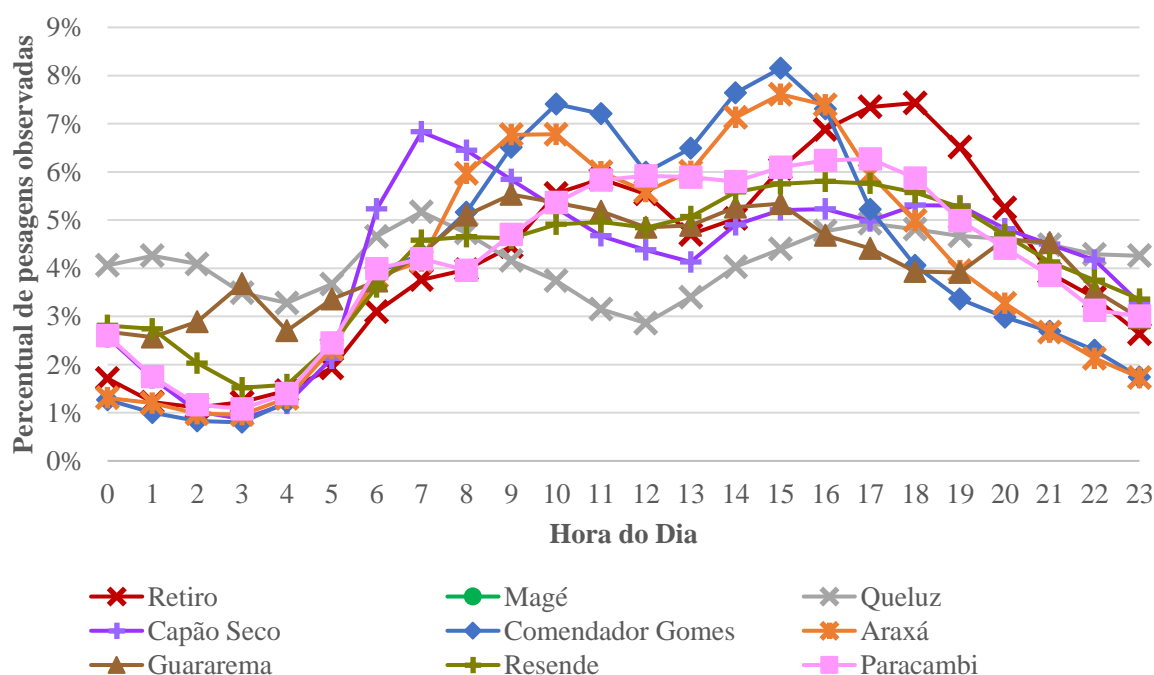
Tabela 20 - Tempo estimado de operação das balanças

Balança	Intervalos > 15 min [%]	Tempo operante	Tempo inoperante
Queluz	0,01%	93,10%	6,90%
Guararema	0,02%	92,44%	7,56%
Resende	0,01%	90,58%	9,42%
Paracambi	0,01%	88,49%	11,51%
Retiro	0,45%	86,53%	13,47%
Capão Seco	0,09%	86,23%	13,77%
Araxá	0,42%	39,00%	61,00%
Comendador Gomes	0,37%	16,31%	83,69%
Magé	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Além da estimativa dos tempos de operação de cada balança, os dados de hora das pesagens também permitiram a análise da distribuição das pesagens ao longo do dia em cada uma das balanças (Figura 27). Nota-se que todas as balanças estudadas apresentam pesagens nas 24h do dia, com naturais flutuações. A balança de Queluz, na fronteira entre os estados do Rio de Janeiro e São Paulo, foi a que apresentou menores oscilações ao longo do dia, com grande volume de pesagens no período da noite. De forma geral, o tráfego de caminhões nas balanças se demonstra maior no período da tarde, com uma diminuição visível no intervalo do almoço e, na maioria das balanças, um volume bastante reduzido entre 1h e 5h da madrugada. Mais uma vez, Magé não pode ser incorporada nessa etapa por não apresentar informações sobre hora de pesagem.

Figura 27 - Distribuição das pesagens ao longo do dia



(fonte: elaborado pelo autor)

Após as observações mais superficiais sobre os dados, as análises foram aprofundadas para focar nos tipos de veículos presentes nas frotas estudadas. Essa foi uma etapa essencial do estudo, uma vez que a maioria dos dados de pesagem continham apenas a classe dos veículos, e não os seus respectivos tipos de eixo. Assim, as classes veiculares foram cruzadas com aquelas contidas no QFV/DNIT (BRASIL, 2021a), resumidas na tabela consultável do *Apêndice A*. Com essa correspondência, foi possível verificar os tipos de veículos e de eixos mais comuns na frota de cada um dos pontos estudados. A distribuição dos tipos de veículos presentes em cada PPV é apresentada na Tabela 21, em termos do número de eixos. O PPV de Magé/RJ destaca-se com o maior percentual de veículos de 2 eixos, com Paracambi, Resende, Guararema e Retiro também apresentando um grande número de veículos de 2 e 3 eixos. No outro extremo aparecem Araxá, Comendador Gomes e Capão Seco, com elevado percentual de veículos com 6 ou mais eixos.

Tabela 21 - Tipos de veículo na frota, caracterizados pelo número de eixos

PPV	Número de Eixos							
	2	3	4	5	6	7	8	9
Araxá	15,71%	23,71%	13,62%	7,60%	22,80%	10,46%	0,08%	6,01%
Comendador Gomes	13,17%	20,59%	12,49%	11,41%	29,30%	8,58%	0,10%	4,36%
Magé	45,26%	21,58%	13,72%	10,01%	7,23%	1,36%	0,07%	0,77%
Paracambi	27,48%	25,42%	21,68%	12,72%	10,08%	1,70%	0,05%	0,87%
Resende	25,18%	26,16%	20,05%	12,42%	13,32%	1,83%	0,05%	1,00%
Queluz	13,91%	27,99%	15,69%	19,38%	19,12%	2,49%	0,05%	1,37%
Guararema	29,82%	29,40%	16,16%	11,82%	11,17%	1,04%	0,03%	0,56%
Retiro	28,14%	18,00%	21,81%	9,86%	17,52%	3,82%	0,07%	0,76%
Capão Seco	14,73%	8,26%	8,11%	7,17%	34,93%	21,54%	0,13%	5,14%
Média Ponderada	24,54%	26,14%	17,29%	13,93%	14,35%	2,48%	0,05%	1,22%

(fonte: elaborado pelo autor)

Além da caracterização por tipo de eixo, as dez classes DNIT mais comuns em cada PPV foram retratadas em forma gráfica no *Apêndice B*. Como regra geral, essas dez classes mais frequentes representam entre 90% e 95% de todos os veículos observados em cada ponto. Além disso, 45 das 90 classes de caminhão contidas no QFV/DNIT apresentaram frequências inferiores a 0,1% – somando 0,47% do total de veículos do banco –, e outras 22 sequer foram observadas nos PPVs estudados.

Nesse ponto, vale destacar algumas características da classificação proposta pelo QFV. Das 90 classes únicas de caminhão encontradas no quadro de fabricantes, 21 possuem uma ou mais duplicatas em termos de tipo e ordem dos eixos. É o caso das classes 2I2 (caminhão trator mais semirreboque), 2C2 (caminhão mais reboque) e 2DL (caminhão trator mais dois

semirreboques), por exemplo, todas compostas por um ESRS seguido por três ESRD. Embora sua silhueta seja diferente, contadores automáticos instalados no pavimento – e o próprio pavimento, em termos de carga transferida – são incapazes de distinguir entre essas classes. Com isso, apenas 64 das 90 classes de caminhões são únicas em termos de eixos. Algo similar ocorre na classificação dos ônibus, onde apenas 17 das 30 classes são exclusivas. Ao ignorar a ordem dos eixos (i.e. considerar um 3LD – ESRS, ETD, ETD, ESRD – equivalente a um 2D4 – ESRS, ESRD, ETD, ETD –, por exemplo), esse número fica ainda mais restrito para as classes de caminhões, sendo observadas apenas 49 classes únicas. Entretanto, é possível que tais distinções existam para adequação aos modelos de veículos fabricados, por necessidade de particularização para efeitos de fiscalização (aplicação de multas), ou outras razões.

A distribuição dos diferentes tipos de eixo observados nas frotas dos PPVs estudados é resumida na Tabela 22 e apresentada de forma gráfica na Figura 28. Alguns pontos em comum são a grande presença de ESRS – algo esperado, por ser o eixo dianteiro da absoluta maioria dos veículos comerciais – e a baixa ocorrência de EDD. A maior proporção de veículos de grande porte para Araxá, Comendador Gomes e Capão Seco, observada na Tabela 21, aqui é traduzida em um maior percentual de eixos do tipo ETD e ETT. Eixos mistos (EM) foram observados apenas no PPV de Magé, com baixíssima frequência (0,005% de todos os eixos observados), e por isso foram desconsiderados nessa análise.

Tabela 22 - Distribuição dos tipos de eixos observados nos PPVs estudados

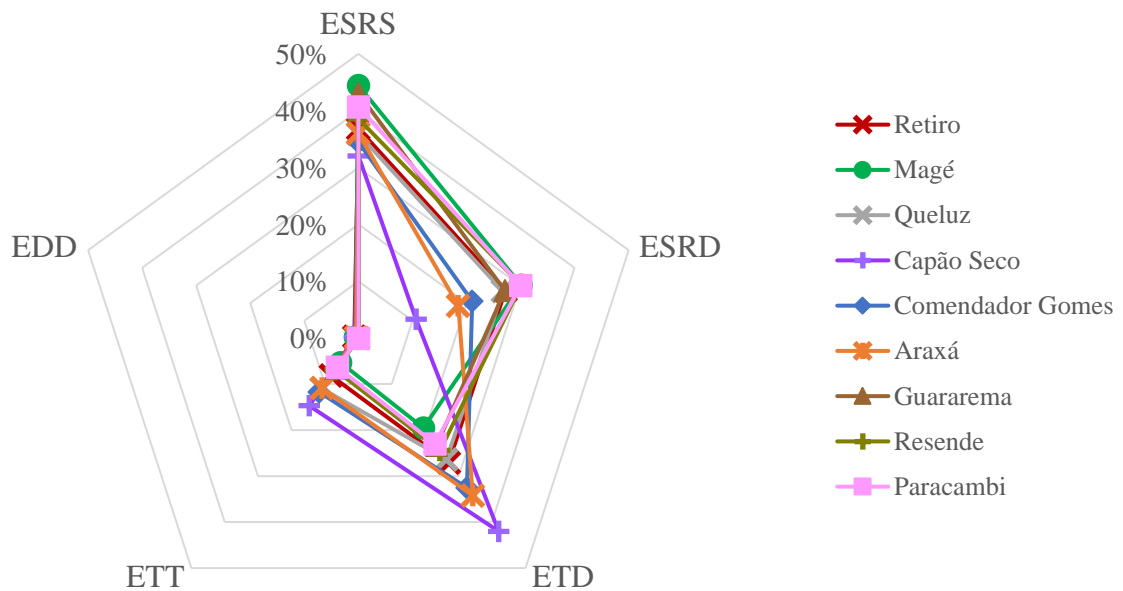
PPV	ESRS	ESRD	ETD	ETT	EDD
Araxá	36,01%	18,48%	34,25%	10,85%	0,41%
Comendador Gomes	34,48%	21,06%	32,53%	11,74%	0,18%
Magé	44,46%	30,10%	19,51%	5,33%	0,59%
Paracambi	40,67%	30,05%	22,96%	6,31%	-
Resende	38,57%	30,11%	24,43%	6,90%	-
Queluz	35,91%	26,75%	26,37%	10,97%	-
Guararema	43,06%	27,11%	23,36%	6,47%	-
Retiro	36,85%	27,21%	27,07%	8,15%	0,72%
Capão Seco	32,05%	10,70%	41,99%	14,68%	0,58%
Média Ponderada	39,09%	27,75%	24,90%	8,17%	0,09%

(fonte: elaborado pelo autor)

Com cada uma das pesagens por eixo vinculada a seu respectivo tipo de eixo, passou-se a analisar o perfil de carregamento das diferentes frotas estudadas. Inicialmente, foram calculados, para cada balança e ano de análise, número N e FVc, conforme equações 5 e 6. Embora o propósito deste trabalho seja a determinação de níveis de carregamento da frota – e não de fatores veiculares –, entende-se que a apresentação de tais métricas é importante para

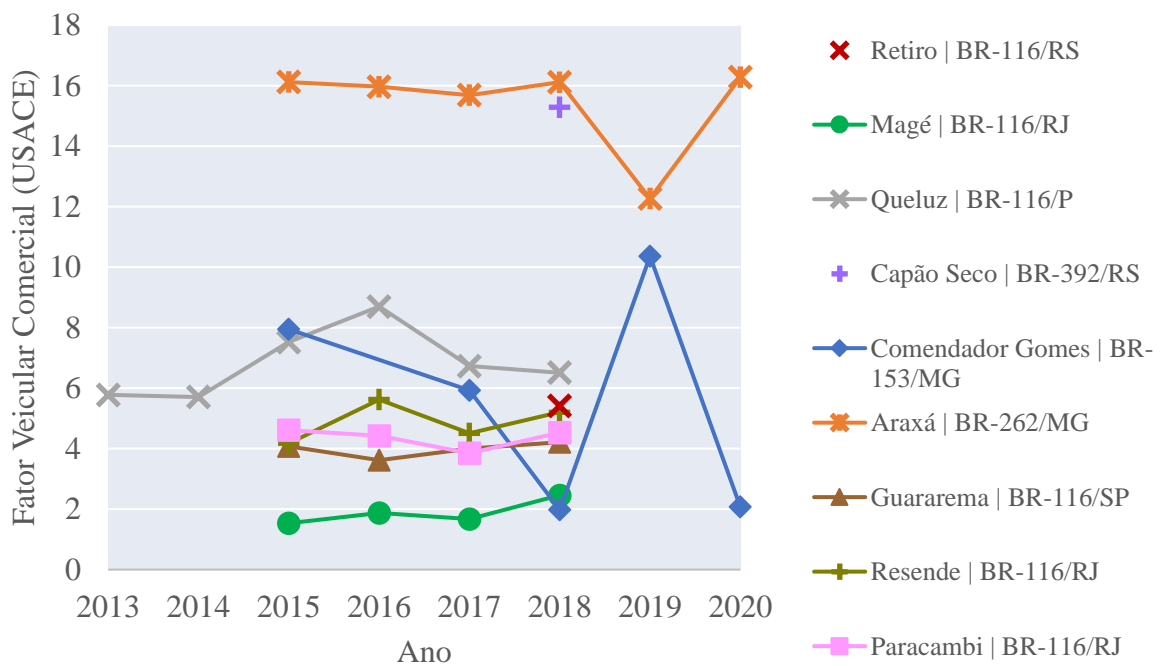
servir de base comparativa entre este e outros trabalhos da área. Assim, os fatores veiculares médios das frotas comerciais de cada balança estudada são apresentados, ano a ano, na Figura 29. Importante notar que os FVc demonstrados abaixo foram calculados a partir da média dos fatores veículo a veículo; ou seja, eles consideram a média de cargas discretas de cada veículo na frota e podem, portanto, serem considerados o mais próximo do real da mesma.

Figura 28 - Distribuição dos tipos de eixos observados nos PPVs estudados



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 - Evolução do fator veicular comercial ao longo dos anos



(fonte: elaborado pelo autor)

Com relação à evolução anual dos fatores veiculares, cabe chamar atenção ao marco temporal estabelecido pela Lei nº 13.103, que entrou em vigor em março de 2015 elevando as tolerâncias na pesagem por eixo de 7,5% para 10%. Para o PPV de Queluz, o único no banco com dados pregressos à lei, nota-se um aumento considerável do FVc entre 2014 e 2016, assim como entre 2015 e 2016 para o PPV de Resende. Porém, para os anos seguintes observa-se uma forte queda no fator, indicando que pode haver outros fatores (e.g. questões econômicas, sociais, políticas, etc.) que podem justificar a variação do FVc no período. Nos outros postos de pesagem, o fator médio se manteve aproximadamente constante, à exceção dos postos de Minas Gerais no ano de 2019. Ali, uma possível justificativa é a falha na operação durante grande parte do ano, conforme constatado nas figuras 24 e 25, o que pode ter afetado as médias anuais dos PPVs.

Para comparar os resultados ora obtidos com os valores encontrados na literatura (Tabela 15), foram calculados os fatores veiculares USACE médios por classe de veículo para cada um dos postos de pesagem estudados. Os valores mínimos e máximos das médias encontradas em cada PPV são apresentados na Tabela 23, ao lado dos valores já apresentados anteriormente. Nota-se que os valores de FV encontrados por Peterlini (2006), Fontenele (2011) e Vallejo (2021), todos baseados em pesagens reais, encontram-se dentro dos valores médios mínimos e máximos observados no presente estudo. Também se observa que, para os veículos de até 4 eixos – 2C, 3C, 2S1 e 2S2 –, os valores recomendados pelo DER/SP e pela Prefeitura de SP, assim como os valores calculados com base nas considerações 70%-30% e 80%-20% (cheio-vazio), tendem a ser superiores aos reais observados tanto nesta pesquisa quanto nas demais (FONTENELE, 2011; PETERLINI, 2006; VALLEJO, 2021). Importante salientar, ainda, a amplitude entre os valores médios mínimos e máximos encontrados nesta pesquisa. Os fatores veiculares médios máximos são da ordem de 5 vezes os fatores mínimos, ressaltando as diferenças entre frotas estudadas e os perigos da adoção de valores genéricos para o dimensionamento de pavimentos.

Tabela 23 - Comparação entre os valores de FV encontrados nesta pesquisa e aqueles apresentados na Tabela 15

Classe	FV		Peterlini (2006)	Fontenele (2011)	Vallejo (2021) Médio	DER/SP	Prefeitura São Paulo	70c-30v	80c-20v
	Médio Mínimo	Médio Máximo							
2C	0,39	1,61	0,80	0,63	0,70	2,78	2,60	2,50	2,85
3C	1,65	8,47	6,06	4,59	5,34	5,44	6,56	6,18	7,07
2S1	0,54	2,37	1,88	1,12	-	4,09	-	4,80	5,49
2S2	1,01	5,13	3,78	1,79	5,13	8,70	-	8,49	9,70
2S3	2,55	13,25	15,43	10,29	9,03	10,27	10,47	9,01	10,30
3S3	5,34	22,15	12,63	12,91	20,72	9,42	14,04	12,70	14,51
3D4	8,86	38,18	18,75	24,57	65,37	17,28	-	18,16	20,75
2CB	4,69	16,44	-	-	-	2,81	0,69	2,50	2,85

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 24 - Fator veicular médio da frota comercial para diferentes cenários de sobrecarga, calculado com os fatores USACE

Balança	CML+0%	CML+5%	CML+7,5%	Lei 13.103/2015	CML+12,5%	Lei 14.229/2021	REAL
Araxá	9,46	11,31 (+19,5%)	11,90 (+5,2%)	12,28 (+3,2%)	12,54 (+2,1%)	13,00 (+3,7%)	15,40 (+18,5%)
Comendador Gomes	4,45	4,82 (+8,3%)	4,92 (+2,0%)	4,99 (+1,4%)	5,03 (+1,0%)	5,18 (+3,0%)	5,66 (+9,2%)
Magé	1,59	1,67 (+5,1%)	1,69 (+1,5%)	1,71 (+1,1%)	1,73 (+0,8%)	1,77 (+2,7%)	1,89 (+6,4%)
Paracambi	3,33	3,68 (+10,7%)	3,79 (+2,9%)	3,86 (+1,9%)	3,91 (+1,2%)	4,04 (+3,4%)	4,35 (+7,7%)
Resende	3,74	4,12 (+10,3%)	4,25 (+3,0%)	4,33 (+2,0%)	4,39 (+1,3%)	4,52 (+3,0%)	4,88 (+7,9%)
Queluz	5,60	6,05 (+8,1%)	6,17 (+2,0%)	6,25 (+1,3%)	6,30 (+0,8%)	6,49 (+2,9%)	6,82 (+5,2%)
Guararema	3,42	3,72 (+8,9%)	3,80 (+2,1%)	3,84 (+1,1%)	3,87 (+0,6%)	3,90 (+0,9%)	3,98 (+1,9%)
Retiro	4,39	4,81 (+9,5%)	4,92 (+2,3%)	4,98 (+1,4%)	5,03 (+0,9%)	5,16 (+2,6%)	5,41 (+4,9%)
Capão Seco	12,35	13,95 (+12,9%)	14,35 (+2,9%)	14,57 (+1,5%)	14,67 (+0,7%)	14,83 (+1,1%)	15,28 (+3,1%)
Média Ponderada		(+9,2%)	(+2,5%)	(+1,5%)	(+1,0%)	(+2,6%)	(+6,1%)

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 25 - Fator veicular médio da frota comercial para diferentes cenários de sobrecarga, calculado com os fatores AASHTO

Balança	CML+0%	CML+5%	CML+7,5%	Lei 13.103/2015	CML+12,5%	Lei 14.229/2021	REAL
Araxá	2,42	2,72 (+12,5%)	2,81 (+3,2%)	2,86 (+1,9%)	2,89 (+1,2%)	2,96 (+2,3%)	3,29 (+11,0%)
Comendador Gomes	1,40	1,48 (+5,4%)	1,50 (+1,4%)	1,51 (+1,0%)	1,53 (+0,7%)	1,60 (+5,0%)	1,68 (+5,2%)
Magé	0,61	0,63 (+3,0%)	0,64 (+0,9%)	0,64 (+0,6%)	0,65 (+0,5%)	0,66 (+1,8%)	0,68 (+2,8%)
Paracambi	1,29	1,36 (+5,8%)	1,38 (+1,5%)	1,39 (+0,9%)	1,40 (+0,6%)	1,42 (+1,4%)	1,47 (+3,5%)
Resende	1,30	1,37 (+5,4%)	1,40 (+1,6%)	1,41 (+1,0%)	1,42 (+0,6%)	1,44 (+1,2%)	1,48 (+2,8%)
Queluz	1,84	1,93 (+5,0%)	1,95 (+1,2%)	1,96 (+0,7%)	1,97 (+0,5%)	2,00 (+1,3%)	2,05 (+2,5%)
Guararema	1,27	1,34 (+5,0%)	1,35 (+1,1%)	1,36 (+0,6%)	1,37 (+0,3%)	1,38 (+0,6%)	1,39 (+1,1%)
Retiro	1,37	1,45 (+6,1%)	1,47 (+1,5%)	1,49 (+0,9%)	1,49 (+0,6%)	1,52 (+1,4%)	1,55 (+2,6%)
Capão Seco	2,77	3,03 (+9,2%)	3,09 (+2,1%)	3,12 (+1,1%)	3,14 (+0,5%)	3,16 (+0,6%)	3,23 (+2,2%)
Média Ponderada		(+5,3%)	(+1,3%)	(+0,8%)	(+0,5%)	(+1,3%)	(+2,8%)

(fonte: elaborado pelo autor)

Além dos FVc reais observados em cada PPV, foram calculados FVc virtuais, limitados a diferentes cenários de sobrecarga no eixo, conforme descrito na seção 3.4.1. Para todos os cenários (exceto real) foi mantida a tolerância de 5% no PBT. Os resultados são resumidos na Tabela 24, calculados com os fatores USACE, e na Tabela 25, com os fatores AASHTO. Também é apresentado, entre parêntesis, o acréscimo no valor de FVc em relação ao cenário anterior. Nota-se que, tanto para os fatores USACE quanto AASHTO, as maiores diferenças percentuais são observadas entre o cenário sem nenhum excesso (CML+0%) e o cenário onde foram permitidos excessos de até 5% no eixo ou PBT. Esta observação deflagra uma importante discussão sobre a consideração das tolerâncias em projetos de engenharia, tendo em vista que o descolamento que existe na consideração da tolerância é significativo e não deve ser negligenciado. Além disso, chama a atenção o aumento de quase 63% no FVc USACE de Araxá entre a frota limitada à CML e a frota real, reforçando a importância da fiscalização de cargas.

Depois de verificados os fatores veiculares das frotas estudadas, foi contabilizado o número de veículos do banco de dados que apresentavam algum tipo de excesso de carga. Os percentuais de veículos com excesso são apresentados na Tabela 26, ao lado das médias ponderadas pelo número de veículos de cada balança, levando em consideração veículos:

- i. com excesso em pelo menos um eixo (ExcEx);
- ii. com excesso no PBT (ExcPBT);
- iii. com excesso superior a 10% em pelo menos um eixo (ExcEx10);
- iv. com excesso superior a 12,5% em pelo menos um eixo (ExcEx12,5);
- v. com excesso superior a 5% no PBT (ExcPBT5);
- vi. com excesso acima de 10% no eixo e de 5% no PBT, simultaneamente (ExcExPBT);
- vii. com PBT limite acima de 50 t (>50t);
- viii. com PBT limite acima de 50 t que apresentam excesso superior a 12,5% no eixo (>50tExcEx);
- ix. com PBT limite acima de 50 t que apresentam excesso superior a 5% no PBT (>50tExcPBT);
- x. com PBT limite acima de 50 t que apresentam excesso acima de 12,5% no eixo e de 5% no PBT, simultaneamente (>50tExcExPBT);
- xi. com PBT limite de até 50 t que apresentam excesso superior a 5% no PBT (<50tExcPBT);
- xii. com PBT limite de até 50 t que apresentam excesso no eixo e no PBT, simultaneamente (<50tExcExPBT);
- xiii. infratores segundo a Lei nº 13.103/2015 (Infrat2015);
- xiv. infratores segundo a Lei nº 14.229/2021 (Infrat2021).

Tabela 26 - Percentuais de veículos com excessos na frota estudada

Código	Araxá	Comend. Gomes	Magé	Paracambi	Resende	Queluz	Guararema	Retiro	Capão Seco	Média
ExcEx	52,02%	15,68%	7,20%	23,71%	20,89%	30,92%	22,64%	29,76%	61,85%	24,67%
ExcPBT	35,26%	3,66%	1,82%	9,93%	7,84%	10,16%	8,34%	10,88%	37,70%	9,49%
ExcEx10	26,22%	7,18%	2,24%	7,01%	5,94%	7,13%	4,28%	8,57%	19,84%	6,57%
ExcEx12,5	19,37%	5,45%	1,64%	4,73%	3,96%	4,76%	2,51%	5,57%	11,50%	4,37%
ExcPBT5	18,79%	1,98%	0,82%	4,28%	2,90%	3,48%	2,02%	3,65%	8,29%	3,40%
ExcExPBT	16,53%	1,86%	0,70%	3,38%	2,45%	2,79%	1,26%	3,10%	6,71%	2,73%
>50t	21,05%	18,63%	4,01%	5,64%	7,45%	9,43%	5,53%	5,30%	26,93%	7,85%
>50tExcEx	7,20%	1,19%	0,22%	0,84%	0,92%	0,81%	0,41%	0,72%	4,75%	0,94%
>50tExcPBT	7,45%	0,48%	0,08%	0,53%	0,38%	0,47%	0,19%	0,32%	2,99%	0,58%
>50tExcExPBT	5,23%	0,40%	0,05%	0,39%	0,29%	0,28%	0,10%	0,22%	1,23%	0,38%
<50tExcPBT	11,34%	1,51%	0,74%	3,76%	2,51%	3,01%	1,82%	3,33%	5,31%	2,81%
<50tExcExPBT	8,27%	1,29%	0,54%	2,23%	1,65%	1,91%	0,70%	2,36%	3,85%	1,74%
Infrat2015	28,48%	7,30%	2,36%	7,91%	6,39%	7,82%	5,04%	9,12%	21,42%	7,24%
Infrat2021	20,75%	2,77%	0,99%	4,74%	3,52%	4,00%	2,33%	4,15%	11,82%	3,95%

(fonte: elaborado pelo autor)

De forma geral, os maiores percentuais de veículos com excesso de carga foram observados em Capão Seco e Araxá, onde mais da metade dos veículos da frota apresentaram excesso acima da CML em pelos menos um de seus eixos. Essas também são as balanças onde é mais comum encontrar veículos com PBT regulamentar acima de 50 t, com 26,9% e 21,1%, respectivamente. Magé, por outro lado, foi a balança que apresentou as menores quantidades de veículos acima da CML. Também são comparados os percentuais de veículos que poderiam ser considerados infratores de acordo com a Lei nº 13.103/2015 e com a Lei nº 14.229/2021. Em grande parte das balanças, o número de veículos infratores pela nova lei reduziu em aproximadamente 50%, quando comparado com a lei anterior, com a média global de infrações passando de 7,24% para 3,95%.

Aqui, vale ressaltar a utilização de parte do banco de dados nas interações entre o Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV/UFRGS), a Secretaria Nacional dos Transportes Terrestres (SNTT) e o Ministério da Infraestrutura (MINFRA) nas discussões prévias a alteração da Lei nº 14.229/2021. À época, em meados de 2020, foram tomados os dados de Queluz como representativos para as análises, salientando as limitações da extrapolação dos resultados para outras rodovias. Ali, a frota se dividia em 90% com PBT regulamentar até 50 t, e 10% acima de 50 t. Entretanto, ao incorporar as demais balanças no banco de dados, nota-se que existem trechos nos quais a presença de veículos pesados é superior, como o caso de Araxá, Comendador Gomes e Capão Seco. Nesses pontos, é possível que os impactos da alteração da tolerância de 10% para 12,5% no eixo sejam superiores àqueles antecipados.

Com relação ao PBT, além dos percentuais de veículos com excesso acima do peso regulamentar, também foram computados os níveis médios de sobrecarga acima de tal limite, considerando apenas os veículos com excesso (Tabela 27). Observa-se que, apesar de apresentarem os menores percentuais de veículos com excesso no PBT, Comendador Gomes e Magé apresentaram os maiores excessos médios acima do peso regulamentar. Na média ponderada de todos os postos, o valor observado foi de 5,5% acima dos limites, bastante próximo à tolerância de 5% considerada para efeitos de multa.

Tabela 27 - Excesso médio observado no PBT

Balança	Veículos com excesso no PBT	Percentual do total de veículos	Excesso médio acima do peso regulamentar
Araxá	269.882	35,26%	7,25%
Comendador Gomes	14.042	3,66%	8,06%
Magé	60.789	1,82%	7,30%
Paracambi	525.439	9,93%	6,16%
Resende	548.837	7,84%	5,31%
Queluz	976.756	10,16%	5,47%
Guararema	456.817	8,34%	3,76%
Retiro	27.451	10,88%	4,78%
Capão Seco	224.229	37,70%	3,70%
Média Ponderada		9,49%	5,48%

(fonte: elaborado pelo autor)

O número de eixos com excessos acima da CML também foi aferido, e é apresentado na Figura 30 para ESRD, ETD e ETT, e na Figura 31 para ESRS, EDD e EM. Os maiores percentuais de eixos com excesso foram observados para o primeiro grupo, novamente com destaque para as balanças de Araxá – onde mais da metade dos ETD e ETT apresentaram carga acima da CML – e Capão Seco. De forma geral, os eixos que mais apresentaram sobrecarga foram os ETT e ETD, embora possam ser encontrados grandes percentuais de excesso de forma pontual em outros eixos. É o caso do ESRS em Capão Seco, por exemplo, onde mais de 40% dos eixos aferidos estava acima da CML. Apesar de excessos se tornarem mais raros à medida que aumentamos as margens de tolerância acima da CML, percebe-se que essa redução é menos acentuada para os eixos da balança de Araxá, onde mais de 15% do ETD ainda apresentam excessos acima da tolerância de 12,5%. Como será melhor abordado a seguir, isso pode ter relação com a fiscalização mais flexível nesse PPV, em contraste à fiscalização dos demais postos. Chama atenção, ainda, o PPV de Comendador Gomes, que apresenta baixos percentuais de excesso para a maioria dos tipos de eixo, à exceção do EDD.

Figura 30 - Percentual de eixos do tipo ESRD (a), ETD (b) e ETT (c) com excesso

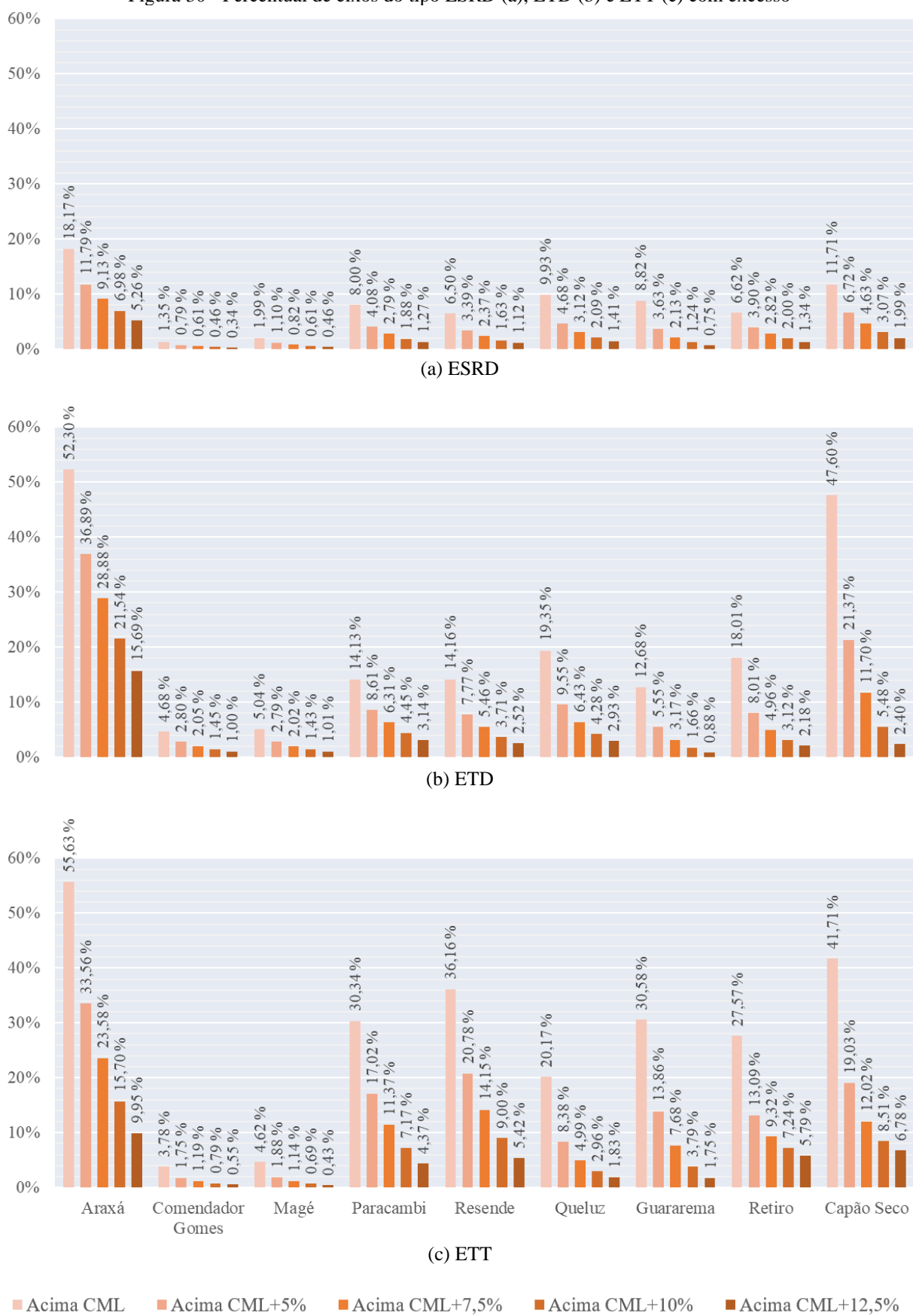
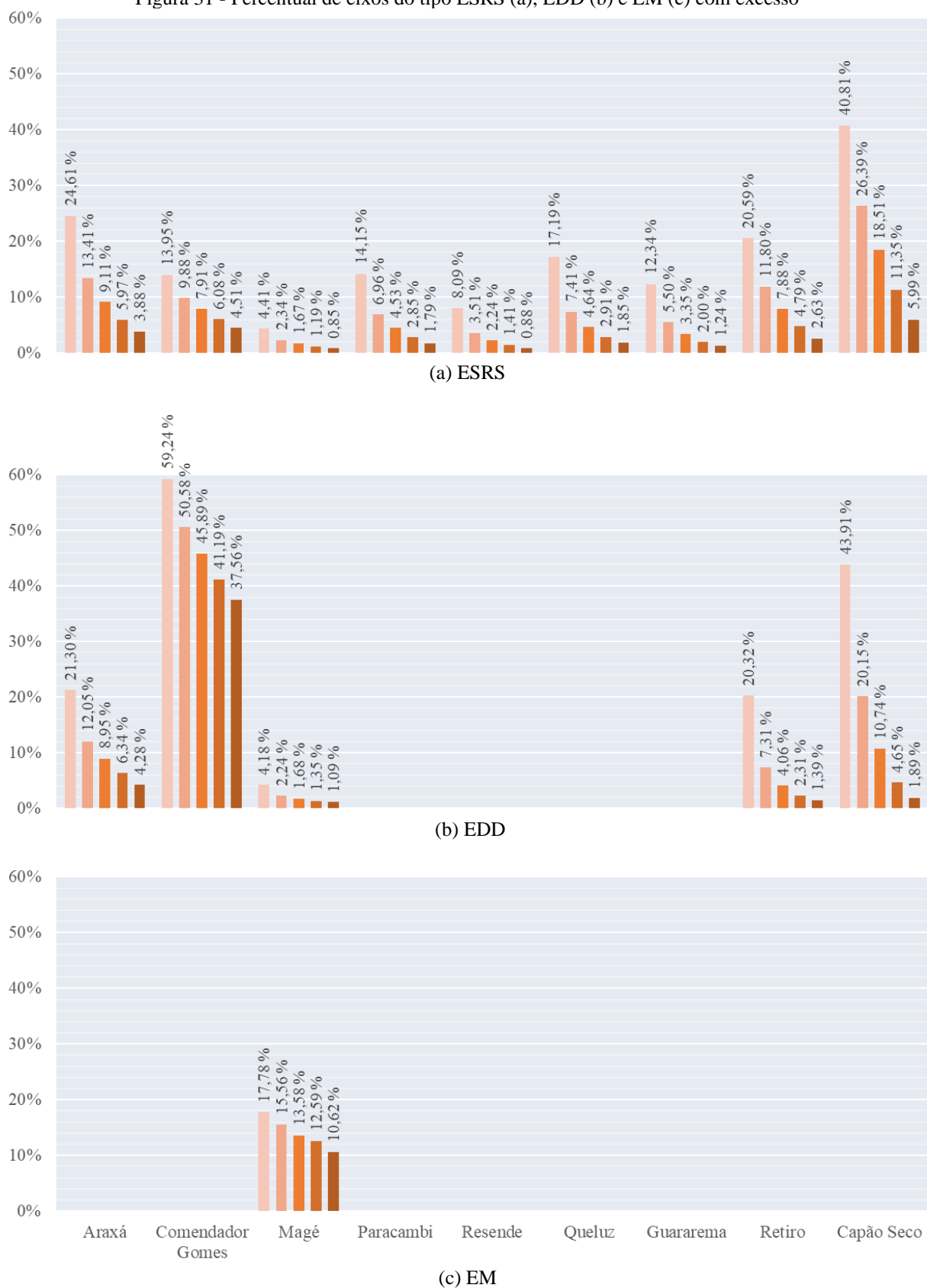


Figura 31 - Percentual de eixos do tipo ESRS (a), EDD (b) e EM (c) com excesso



(fonte: elaborado pelo autor)

4.2 ESPECTROS DE CARGAS OBTIDOS

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. Os histogramas individuais de cada PPV podem ser encontrados no *Apêndice C* deste estudo, para os espectros detalhados por tipo de eixo, e no *Apêndice D*, para os espectros gerais por PBT. Nos apêndices, os espectros também são representados na forma de histograma acumulado, evidenciando o percentual de eixos e veículos acima dos limites legais e das respectivas tolerâncias aplicadas. Na tentativa de apresentar um panorama geral e comparativo entre os pontos de pesagem estudados, as figuras 32 e 33 resumem os espectros na forma de curvas de distribuição de frequências para as cargas por eixo e por peso bruto total, respectivamente. Em todos os casos, as cargas são normalizadas pela sua CML, com excessos de carga traduzidos por valores acima da unidade. Os limites legais e as tolerâncias (de 5% no PBT e de 12,5% no eixo) são representados em linhas verticais tracejadas.

Apesar do perfil naturalmente distinto entre os pontos estudados, algumas semelhanças podem ser observadas nos espectros de carga. De forma geral, os ESRD, EDD e EM tendem a gerar um espectro mais distribuído, enquanto ESRS, ETD e ETT produzem espectros mais concentrados – normalmente em torno dos seus respectivos limites legais ($Carga/CML = 1,0$). Outro ponto em comum entre as diferentes balanças é que a maioria tende a produzir um segundo pico para o ETD, próximo a 40% da CML. Aqui, a possível justificativa está relacionada com a presença de eixos suspensos em veículos descarregados. Assim, um ETT trafegando parcialmente carregado poderia suspender um dos eixos de sua composição, sendo registrado como um ETD descarregado. De forma análoga, um ETT ou ETD vazio pode trafegar com apenas um eixo em contato com o pavimento, sendo registrado como um ESRD. Isso explicaria a dispersão observada no espectro dos ESRD, uma vez que sua distribuição seria composta de ESRD somados a ETD e ETT vazios. Em contraste, a dispersão das curvas de EDD e EM se deve, provavelmente, à falta de definição das curvas devido à pequena quantidade desses tipos de eixos. Vale salientar que os pontos em comum entre os diferentes espectros obtidos também guardam certa semelhança com aqueles observados na literatura, como os apresentados na Figura 12, por exemplo. Como pontuado acima, lá também era possível

perceber os picos duplos em ETD, assim como encontrar cargas mais concentradas em torno da CML para eixos simples.

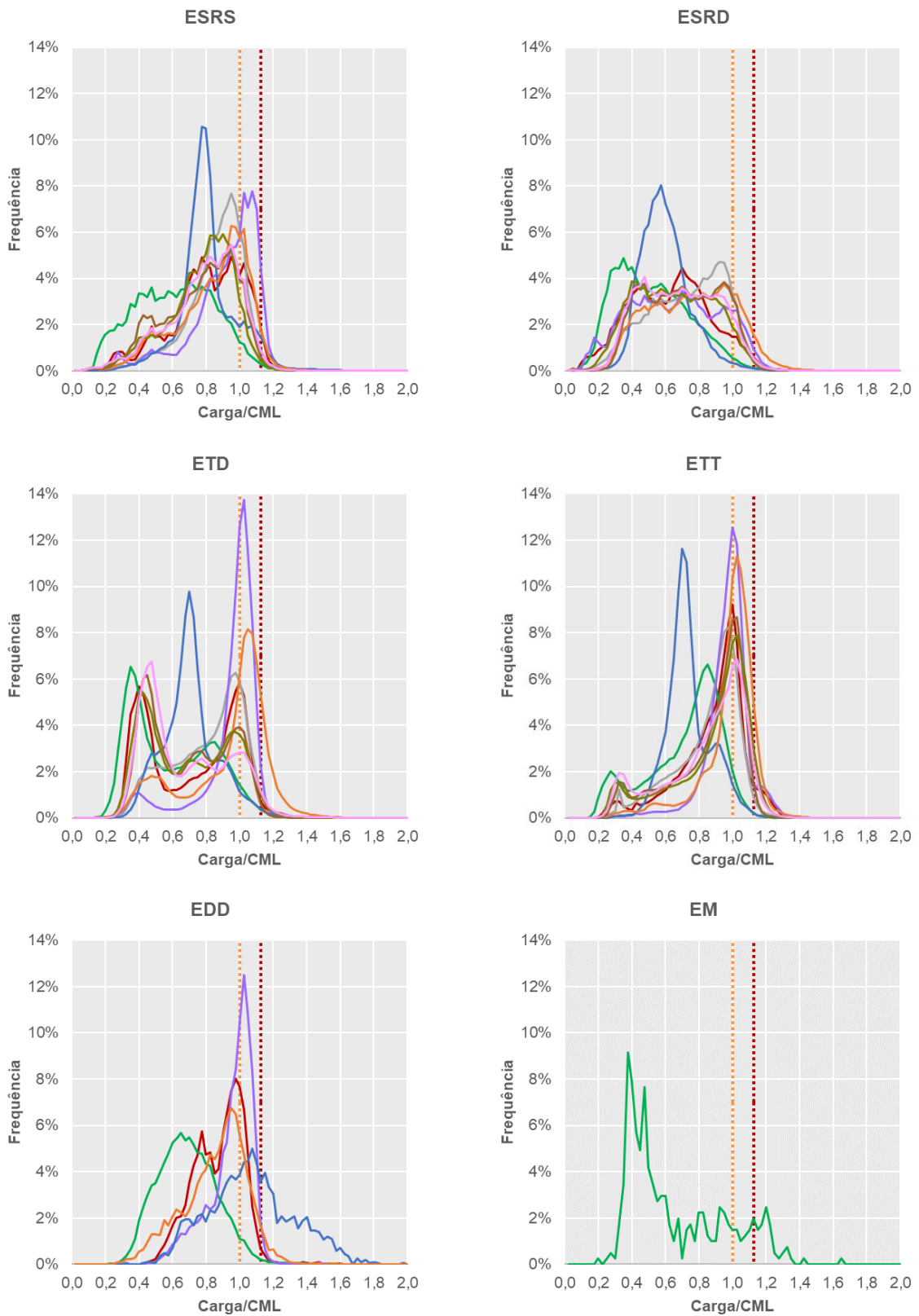
Das nove balanças estudadas, Magé foi a única com registros de EM. Uma possível razão para isso é que a detecção desse eixo só é possível em equipamentos capazes de verificar o tipo de rodado dos eixos (rodas simples ou duplas). O conjunto de eixo misto é composto por um eixo de rodas duplas e outro de rodas simples, totalizando 6 rodas. Porém, na incapacidade de aferir o tipo de rodado, o eixo seria computado como um conjunto de ETD, com 2 eixos de 4 rodas cada. Apesar do baixo volume de EM observado, ressalta-se a importância da adequação dos equipamentos para a correta aferição das características da frota.

Outro ponto interessante de discussão, mais evidente nos ETD e ETT, é o fato de que a alta concentração de eixos em torno da CML diminui acentuadamente antes do limite estabelecido pela tolerância de 12,5%. Isso reforça a importância e o poder da fiscalização de cargas nas rodovias brasileiras. Na balança de Araxá, por exemplo, o maior número de ETD acima da tolerância de 12,5% talvez seja decorrente da menor fiscalização de cargas no trecho, como será melhor discutido adiante.

Embora os espectros de carga por eixo da Figura 32 apresentem um melhor detalhamento das diferenças dos perfis de cada tipo de eixo, um entendimento mais geral do nível de carregamento frota de cada ponto pode ser obtido através da análise dos espectros do peso bruto total dos veículos, resumidos na Figura 33. Aqui, fica mais claro que os veículos que são 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 tanto em relação às pesagens por eixo quanto por PBT apresenta um comportamento bastante descolado das demais.

Além dos espectros gerais de cargas gerados a partir da totalidade dos dados do banco, as distribuições de carga com relação ao PBT foram divididas entre período diurno (06-18 h) e noturno (18-06 h). Essa comparação partiu da hipótese de que há menor fiscalização no período da noite, o que poderia mudar o comportamento das cargas frente aos limites legais.

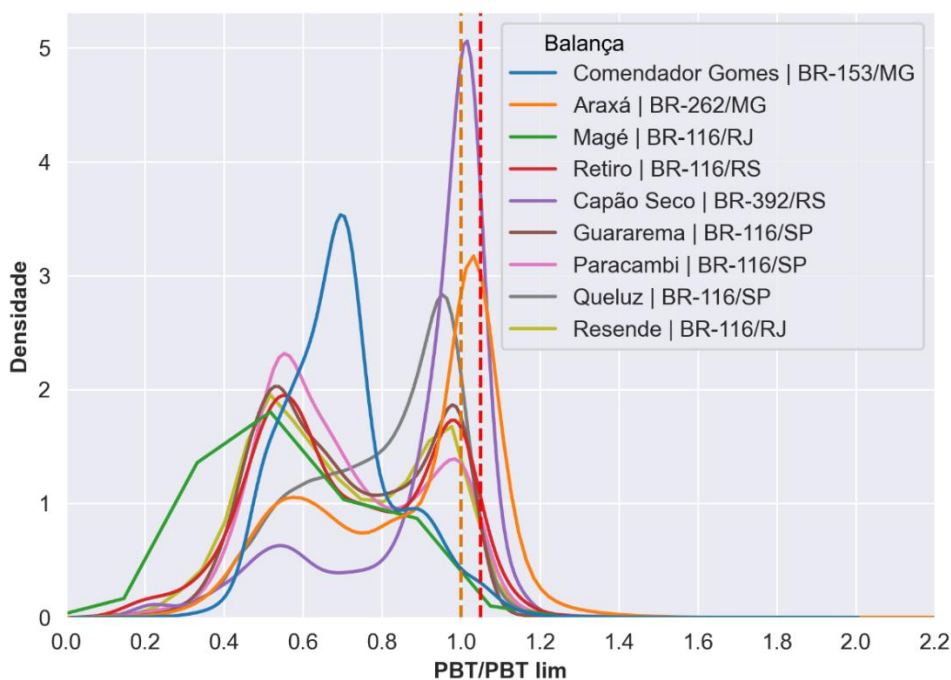
Figura 32 - Espectros de carga por eixo nos pontos estudados



- | | | |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| — Retiro BR-116/RS | — Magé BR-116/RJ | — Queluz BR-116/SP |
| — Capão Seco BR-392/RS | — Comendador Gomes BR-153/MG | — Araxá BR-262/MG |
| — Guararema BR-116/SP | — Resende BR-116/RJ | — Paracambi BR-116/RJ |

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 33 - Espectros de carga por peso bruto total nos pontos estudados



(fonte: elaborado pelo autor)

Os histogramas gerados para cada uma das balanças podem ser encontrados no *Apêndice D*. Com exceção do PPV de Comendador Gomes, é possível notar uma leve tendência de elevação dos níveis de carga e sobrecarga durante o período noturno em todas as balanças estudadas. As diferenças mais expressivas são observadas nos PPVs de Paracambi e Resende, retratados na Figura 34, onde é possível perceber uma redução dos veículos que trafegam descarregados (em torno de 50% do PBT limite) e um aumento dos veículos que trafegam próximo ao PBT limite durante o período noturno. Os histogramas foram normalizados pelo total de veículos em cada período, de forma que a soma da área sob a curva de cada período totalize 100% dos veículos observados no respectivo período.

Para o PPV de Araxá, onde os dados de pesagem incluíam um metadado com a indicação da presença ou não do agente fiscalizador no momento de cada pesagem, foi possível replicar a lógica comparativa da Figura 34, agora entre os períodos fiscalizado e não fiscalizado (Figura 35). Aqui, a mudança do comportamento é menos perceptível, com leve redução da proporção de veículos descarregados (entre 50% e 60% do PBT limite) e aumento de veículos cheios (entre 80% e 100% do PBT limite) durante o período não fiscalizado. Surpreende que veículos com excessos entre 5% e 10% da carga máxima são mais comuns no período fiscalizado, mas excessos acima de 10% ocorrem mais no período não fiscalizado.

Figura 34 - Comparação entre os espectros de carga diurno e noturno nos PPVs de Paracambi (a) e Resende (b)

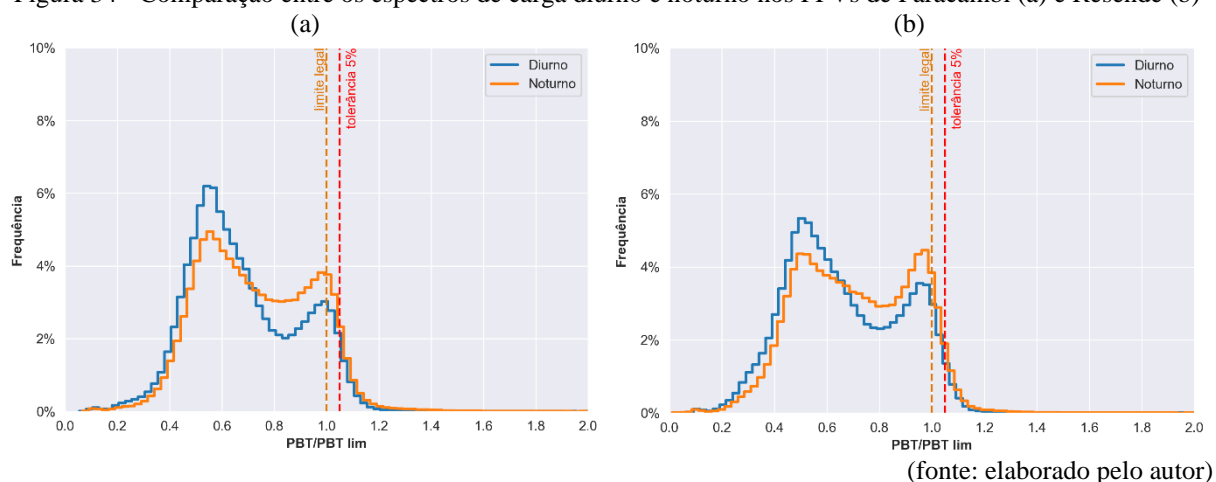
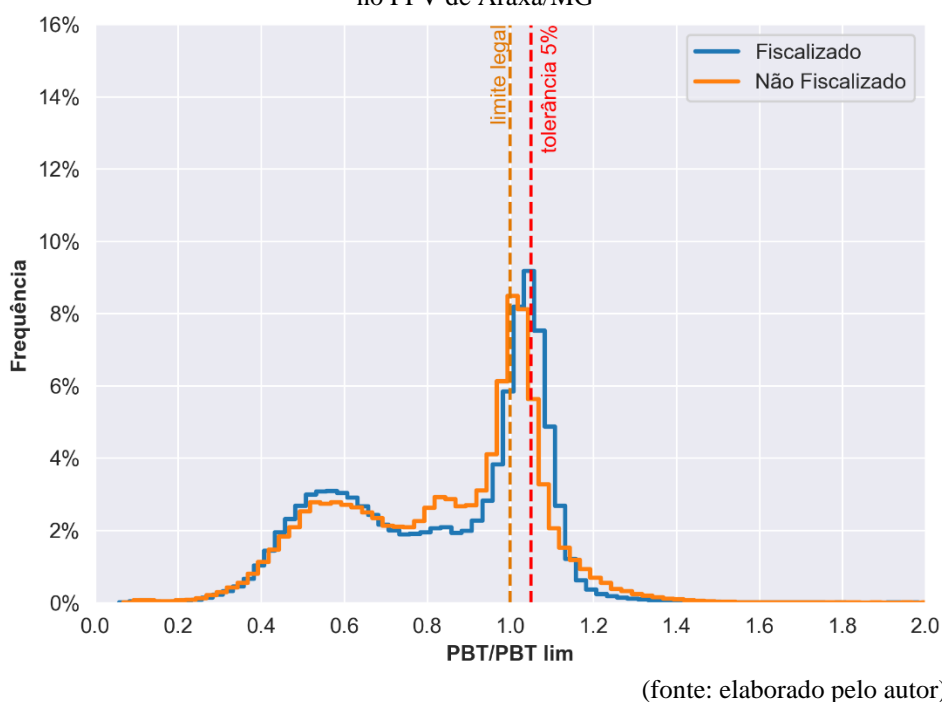
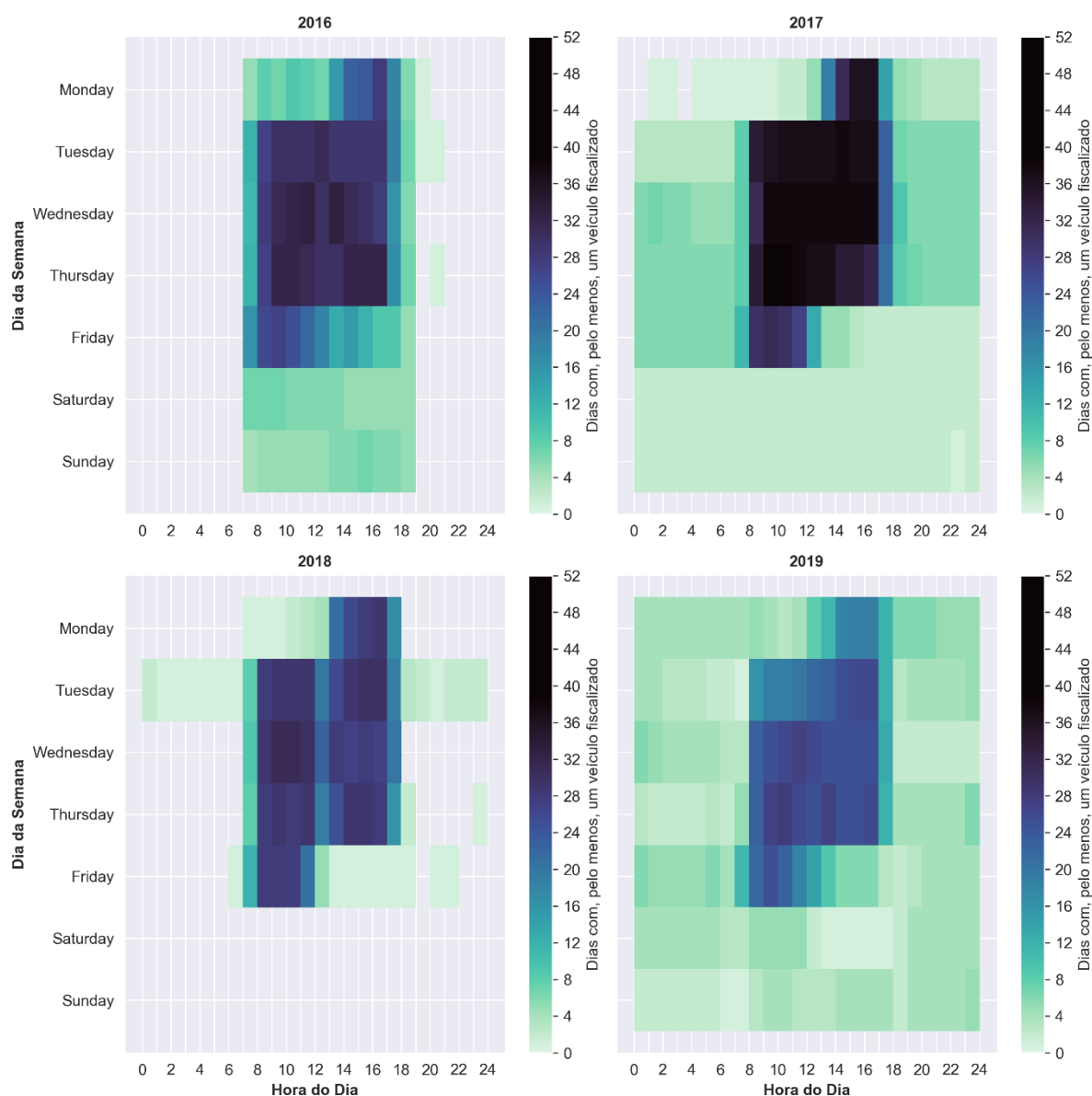


Figura 35 - Comparação entre os espectros de carga durante os períodos fiscalizado e não fiscalizado no PPV de Araxá/MG



Os metadados sobre a presença de agente no posto de Araxá possibilitaram ainda uma análise mais profunda dos períodos de fiscalização na rodovia. Assim, para uma análise visual, foram elaborados os mapas de calor das figuras 36 e 37, contendo o número de dias com, pelo menos, um veículo fiscalizado em cada hora do dia. Através da Figura 36 é possível perceber que há um horário quase fixo de fiscalização no posto entre 2016 e 2019: de terça à quinta-feira, das 8 h às 18 h, segundas das 13 h às 18 h e sextas das 8 h às 12 h. Veículos fiscalizados aos fins de semana foram bastante raros nos anos de 2016, 2017 e 2019, e inexistentes no ano de 2018.

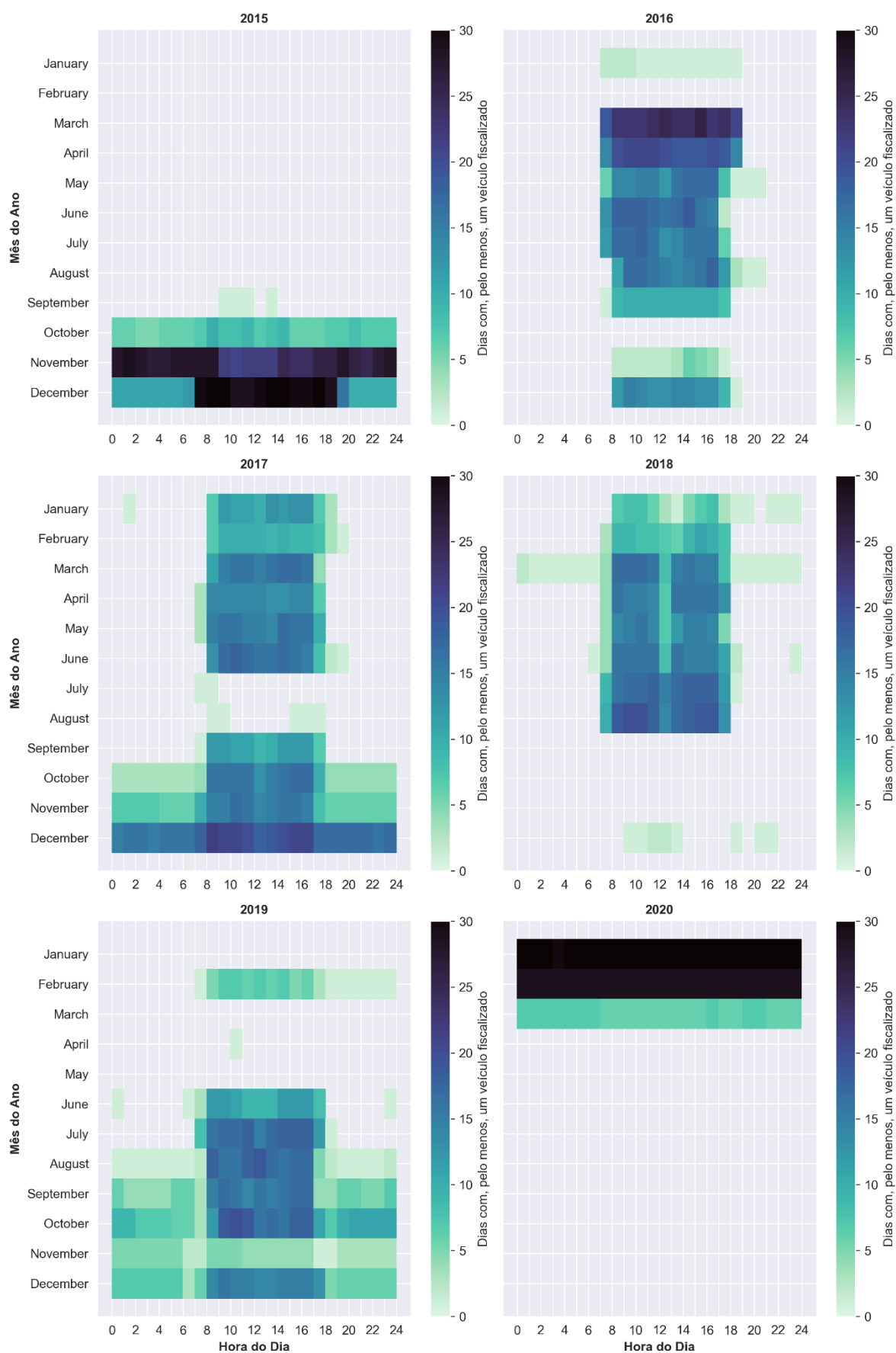
Figura 36 - Períodos de fiscalização no PPV de Araxá/MG, por dia da semana



(fonte: elaborado pelo autor)

Ao avaliar a presença de agente ao longo dos meses do ano em Araxá (Figura 37), ficam claros os pontos de início e fim das pesagens do banco, em setembro/15 e março/20, respectivamente. Também é possível observar períodos em que houve falhas na operação da balança e, consequentemente, na fiscalização do PPV. De acordo com os dados, tais falhas parecem ocorrer com mais frequência nos primeiros meses de cada ano. Os mapas de calor ainda indicam que a fiscalização parecia ocorrer 24 h/dia, 7 dias por semana até o fim de 2015 (~30 dias por mês com veículos fiscalizados em todas as horas do dia), migrando para o horário das 8 h às 18 h de 2016 a 2019 e retornando para o formato 24/7 em 2020. Entretanto, ressalta-se que para a maioria dos anos estudados neste PPV a fiscalização ocorreu quase exclusivamente durante o horário comercial, reforçando a hipótese de que existem balanças que só fiscalizam durante o

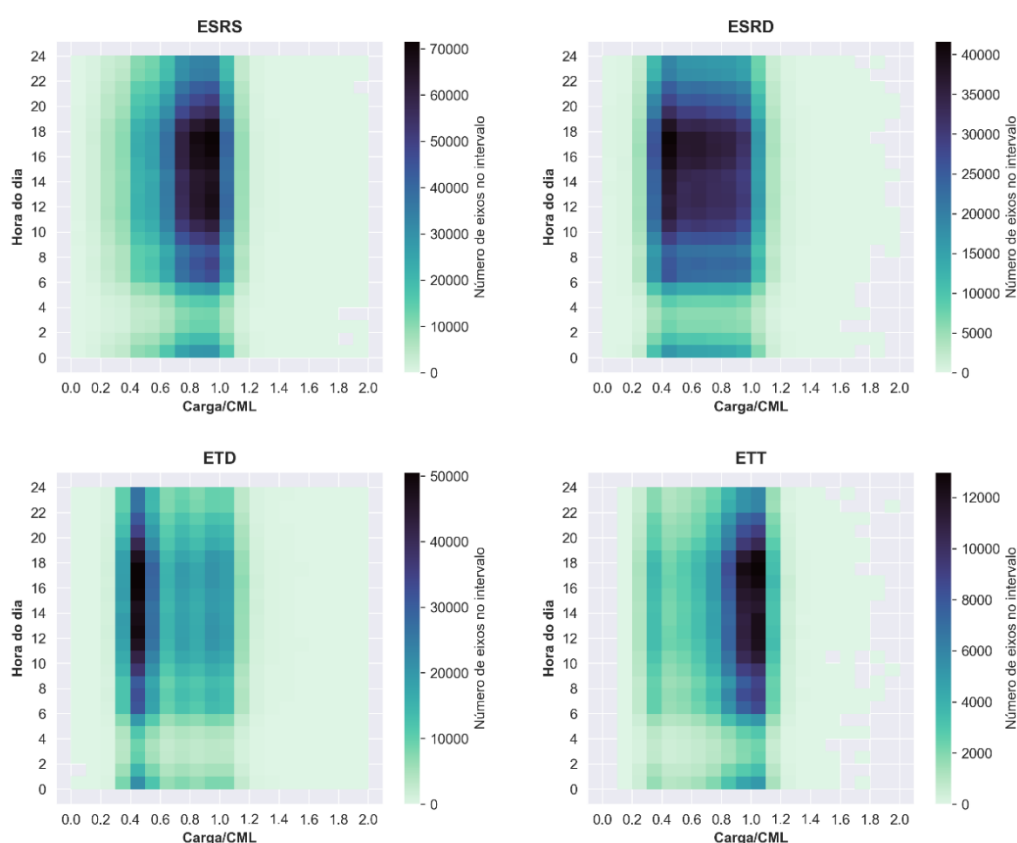
Figura 37 - Períodos de fiscalização no PPV de Araxá/MG, por mês do ano



(fonte: elaborado pelo autor)

período diurno. Do total de pesagens registrado em Araxá, 57,19% foram observadas durante a presença do agente fiscalizador, enquanto os 42,81% restantes da frota não foram fiscalizados. Entretanto, houve períodos em que os veículos fiscalizados não passaram de 25% do total, como registrado no ano de 2018. As mesmas análises puderam ser realizadas para o PPV de Comendador Gomes, retornando resultados bastante similares, principalmente em relação aos horários de fiscalização – segunda-feira, das 10 h às 18 h, de terça a quinta, das 8 h às 18 h, e sexta-feira, das 8 h às 15 h. Neste PPV, 46,51% dos veículos da frota foram fiscalizados no período, com 53,49% de veículos não fiscalizados.

Figura 38 - Espectros de carga ao longo das horas do dia, no PPV de Paracambi

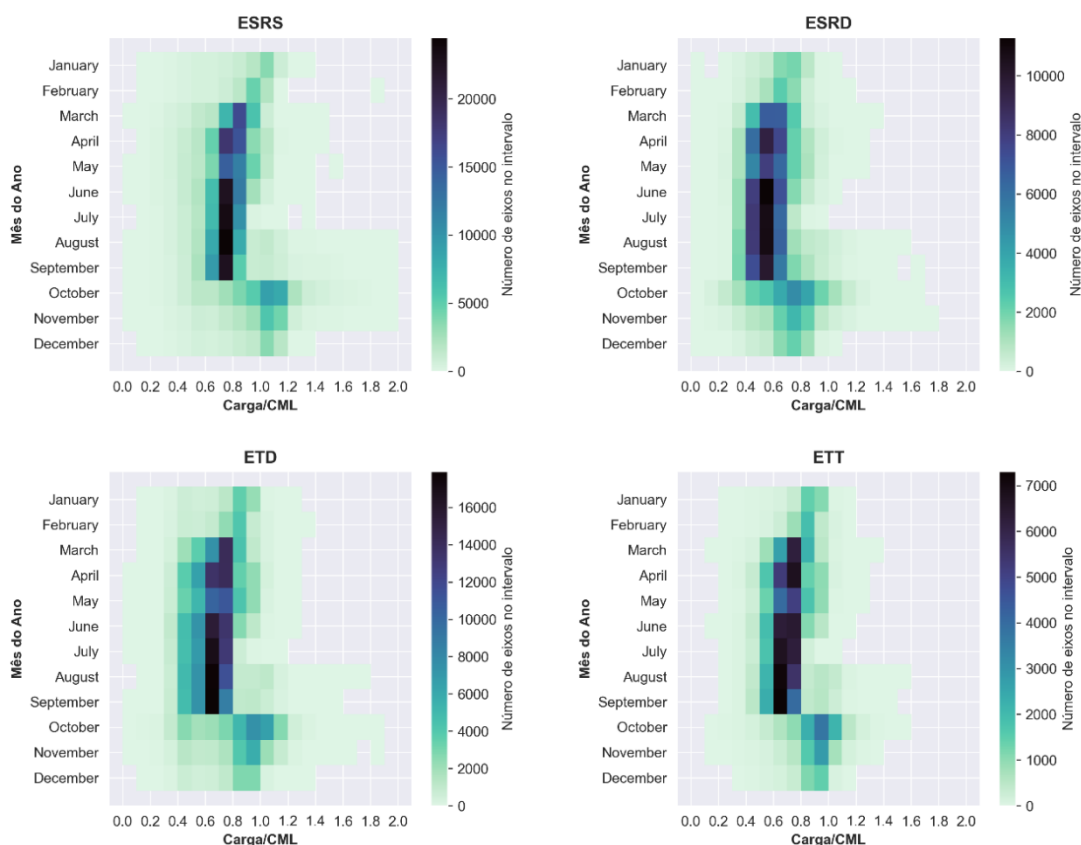


(fonte: elaborado pelo autor)

Por fim, os espectros de carga ainda foram avaliados em termos de hora do dia e mês do ano. Aqui, o objetivo seria identificar mudanças no comportamento da frota similares ao da Figura 34, discretizados para cada hora do dia e para cada mês do ano. As análises são apresentadas no *Apêndice E*, na forma de mapas de calor, onde também é possível verificar períodos do dia e do ano em que há maior quantidade de eixos observada na frota. Para a maioria das balanças, não são observadas grandes alterações no comportamento dos espectros ao longo das horas do dia. O destaque se dá no PPV de Paracambi (Figura 38), onde os gráficos parecem indicar uma leve tendência de ESRS e ETT mais carregados em torno de 6 h da manhã e 21 h. Já a variação

dos espectros ao longo do ano é um pouco mais perceptível, com Resende apresentando maiores níveis de carga em janeiro e agosto, e Magé com maiores cargas no inverno, por exemplo. Nesse quesito, chama atenção a sazonalidade no PPV de Comendador Gomes, com uma diferença abrupta no espectro de cargas entre os meses de setembro e outubro (Figura 39).

Figura 39 - Espectros de carga ao longo do ano, no PPV de Comendador Gomes



(fonte: elaborado pelo autor)

4.3 MODELO DE NÍVEIS DE CARGA PROPOSTO

Neste subcapítulo visa-se chegar a uma proposta de níveis de carregamentos para vias brasileiras através do agrupamento dos dados apresentados até aqui. Para isso, serão utilizadas as métricas propostas no item 3.4.3, as considerações de carga definidas no item 3.4.4 e um algoritmo de agrupamento hierárquico, conforme discutido no item 3.4.5.

A Figura 40 apresenta um diagrama de caixa (*boxplot*) com a distribuição das cargas observadas em cada balança estudada, detalhada por tipo de eixo. Para cada distribuição, a caixa representa o primeiro quartil (extremo inferior da caixa), a mediana ou segundo quartil (divisão central da caixa) e o terceiro quartil (extremo superior da caixa), com bigodes inferior e superior que se

Figura 40 - Distribuição das cargas por eixo

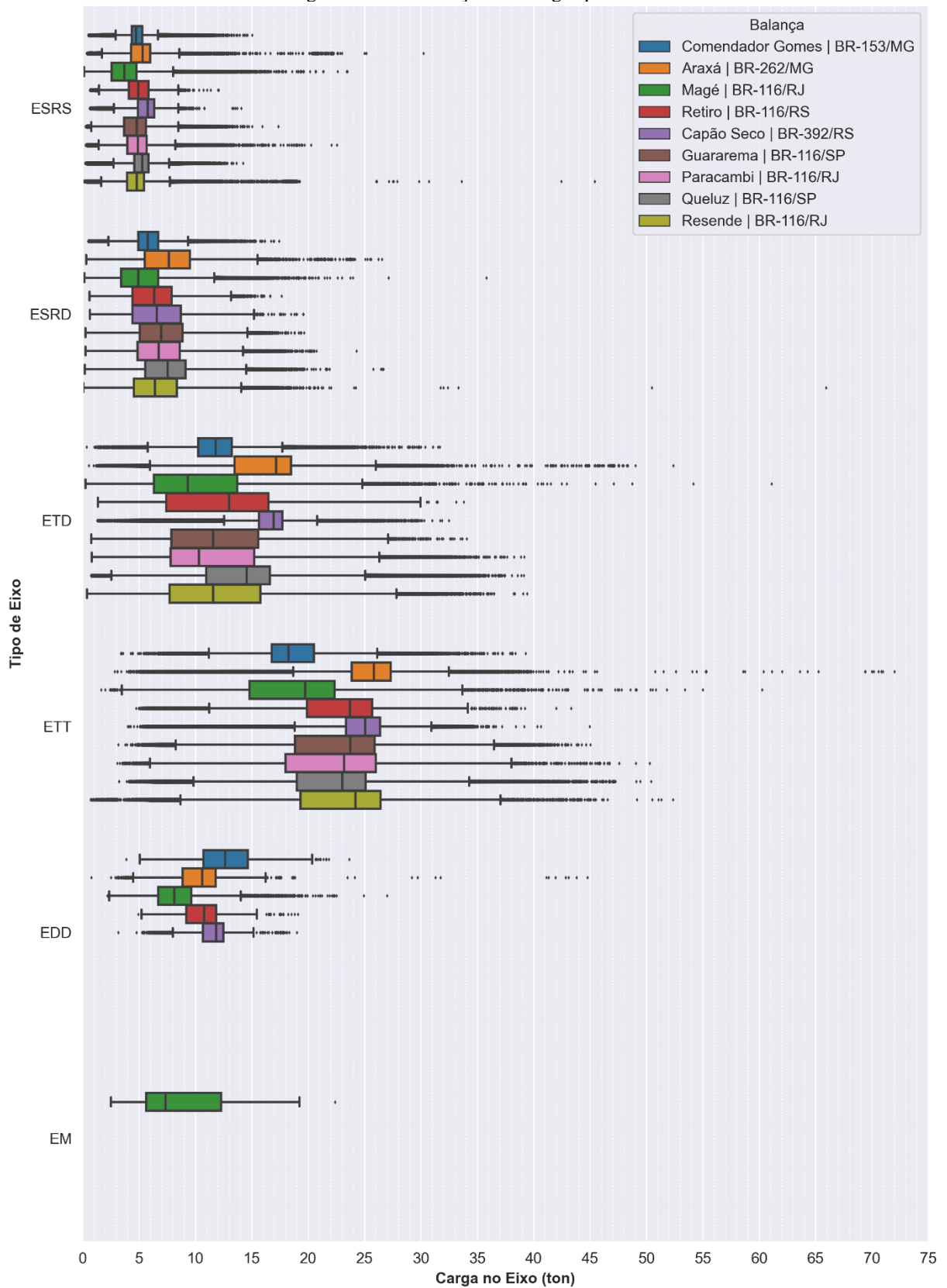


Tabela 28 - Métricas estatísticas da distribuição de cargas por eixo

Eixo	Balança	Carga Mínima [kg]	Limite Inferior [kg]	Quartil 1 (25%) [kg]	Mediana (50%) [kg]	Quartil 3 (75%) [kg]	Limite Superior [kg]	Carga Máxima [kg]
ESRS	Comendador Gomes	480	2.930	4.340	4.730	5.280	6.690	15.030
	Araxá	350	1.700	4.280	5.330	6.000	8.580	30.210
	Magé	120	-	2.580	3.720	4.760	8.030	23.470
	Retiro	630	1.450	4.090	4.950	5.850	8.490	12.080
	Capão Seco	610	2.765	4.910	5.760	6.340	8.485	14.060
	Guararema	250	775	3.670	4.800	5.600	8.495	17.350
	Paracambi	270	1.420	3.970	4.900	5.670	8.220	22.540
	Queluz	214	2.730	4.590	5.300	5.830	7.690	14.240
	Resende	60	1.635	3.930	4.810	5.460	7.755	45.430
ESRD	Comendador Gomes	480	2.295	4.950	5.790	6.720	9.375	17.420
	Araxá	310	-	5.510	7.630	9.520	15.535	26.560
	Magé	170	-	3.410	4.940	6.720	11.685	35.800
	Retiro	610	-	4.410	6.350	7.910	13.160	17.650
	Capão Seco	640	-	4.410	6.570	8.720	15.185	19.570
	Guararema	250	-	5.050	6.970	8.880	14.625	19.650
	Paracambi	260	-	4.880	6.740	8.620	14.230	24.290
	Queluz	200	180	5.550	7.550	9.130	14.500	26.670
	Resende	50	-	4.560	6.410	8.370	14.085	65.930
ETD	Comendador Gomes	350	5.765	10.250	11.800	13.240	17.725	31.690
	Araxá	550	5.965	13.480	17.150	18.490	26.005	52.400
	Magé	270	-	6.320	9.310	13.720	24.820	61.100
	Retiro	1.350	-	7.420	13.010	16.490	30.095	33.810
	Capão Seco	1.300	12.545	15.650	16.930	17.720	20.825	32.470
	Guararema	770	-	7.860	11.570	15.570	27.135	34.080
	Paracambi	820	-	7.810	10.330	15.220	26.335	39.160
	Queluz	730	2.535	10.980	14.551	16.610	25.055	39.118
	Resende	380	-	7.700	11.590	15.760	27.850	39.410
ETT	Comendador Gomes	3.390	11.170	16.780	18.270	20.520	26.130	39.300
	Araxá	2.830	18.685	23.860	25.840	27.310	32.485	71.990
	Magé	1.650	3.460	14.800	19.750	22.360	33.700	75.730
	Retiro	4.730	11.240	19.910	23.710	25.690	34.360	43.330
	Capão Seco	4.000	18.790	23.350	25.080	26.390	30.950	44.980
	Guararema	3.170	8.260	18.850	23.740	25.910	36.500	45.020
	Paracambi	3.050	5.960	17.990	23.180	26.010	38.040	50.300
	Queluz	3.219	9.835	19.000	23.020	25.110	34.275	50.410
	Resende	700	8.670	19.320	24.190	26.420	37.070	52.370
EDD	Comendador Gomes	3.860	4.771	10.700	12.655	14.653	20.581	23.640
	Araxá	760	4.445	8.870	10.610	11.820	16.245	44.790
	Magé	2.190	2.340	6.720	8.140	9.640	14.020	27.000
	Retiro	4.940	5.205	9.180	10.760	11.830	15.805	19.100
	Capão Seco	3.160	8.005	10.690	11.830	12.480	15.165	19.010
EM	Magé	2.530	-	5.640	7.340	12.300	22.290	22.380

(fonte: elaborado pelo autor)

estendem até o mínimo e máximo teóricos de cada distribuição. Os limites inferior e superior são definidos com base na distância interquartil, conforme discutido no item 3.4.3, e pontos acima ou abaixo de tais limites são interpretados como *outliers* da distribuição, representados por pontos individuais no diagrama. Os valores exatos das cargas mínimas e máximas observadas em cada balança, assim como os limites inferiores e superiores e quartis apresentados no diagrama da Figura 40 também podem ser consultados na Tabela 28.

Para a maioria dos tipos de eixo, as distribuições de Araxá e Capão Seco destacam-se como as mais carregadas, enquanto Magé figura em regiões menos carregadas do espectro. Nota-se, ainda, que a amplitude das cargas observadas tende a aumentar com a elevação da CML dos diferentes tipos de eixo – ESRS se mostram mais concentrados, ao passo que ETT se apresentam mais distribuídos. Também chama atenção o elevado número de pontos observados fora dos intervalos de aceitação do diagrama, em especial na distribuição dos ESRS para a balança de Resende, que apresenta registros de até 45 t no eixo dianteiro. Apesar de não serem um divisor definitivo entre dados verdadeiros e dados espúrios, os limites dos bigodes das caixas são um bom balizador de valores mínimos e máximos esperados. Sendo assim, extremos além de tais limites devem ser avaliados com ressalvas.

De acordo com a metodologia proposta no item 3.4.4, as métricas estatísticas da Tabela 28 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, conforme discutido no item 3.4.3, 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 29.

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 30 e, em conjunto com a CML, permitiram caracterizar os eixos com base na sua carga, P , sendo:

- eixo descarregado, quando $carga\ mínima \leq P < carga\ mediana$;
- eixo carregado, quando $carga\ mediana \leq P < carga\ máxima\ legal\ (CML)$;
- eixo sobrecarregado, quando $CML \leq P \leq carga\ máxima$.

Tabela 29 - Cargas mínimas e máximas médias esperadas por tipo de eixo

Eixo	Limite inferior [kg]			Limite superior [kg]		
	$Q_1 - 1,5 \cdot IQR$	$\mu - 3 \cdot \sigma$	NN_{inf}	$Q_3 + 1,5 \cdot IQR$	$\mu + 3 \cdot \sigma$	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	-
EM	-4.350,00	-2.995,69	-	22.290,00	20.853,17	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 30 - 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

(fonte: elaborado pelo autor)

O percentual de eixos observados em cada um dos níveis de carga propostos pode ser encontrado na Tabela 31, 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, em média, que 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.

Tabela 31 - 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	-	-	-

continua

Tipo de eixo	Descarregados	Carregados	Sobrecarregados
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%

(fonte: elaborado pelo autor)

A partir das cargas propostas como balizadoras de cada nível de carga (Tabela 30), foram calculados os centros geométricos de uma curva de quarta potência entre cada par de limites, de acordo com a Equação 9. As cargas assim obtidas foram propostas como representativas de cada nível de carregamento, e são resumidas na Tabela 32. Em especial para os eixos sobrecarregados, as cargas utilizadas foram limitadas a $1,10 \cdot \text{CML}$, conforme discutido no item 3.4.4.

Tabela 32 - 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

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 33 - Fatores de equivalência de carga, FC , obtidos para eixos descarregados (d), carregados (c) e sobrecarregados (sc), conforme cargas propostas

Eixo	USACE			AASHTO		
	FC_d	FC_c	FC_{sc}	FC_d	FC_c	FC_{sc}
ESRS	0,05	0,19	0,45	0,06	0,22	0,54
ESRD	0,18	1,39	6,87	0,17	1,32	3,98
ETD	0,58	4,74	16,31	0,23	1,05	2,67
ETT	1,87	7,13	17,94	0,46	1,28	2,56
EDD	0,08	0,36	0,89	0,09	0,41	1,09

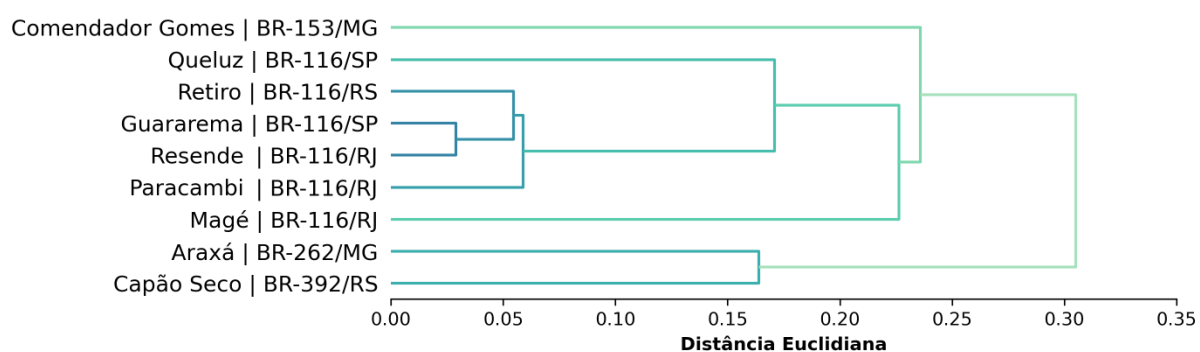
(fonte: elaborado pelo autor)

Aplicando as equações de fatores de equivalência de carga propostos pelo DNIT (quadros 1 e 2) às cargas correspondentes da Tabela 32, pôde-se obter os fatores de carga USACE e

AASHTO para os três grupos de carregamento definidos, conforme apresentado na Tabela 33. Dado que não há equações propostas para eixos duplos direcionais, estes foram considerados como a combinação de dois ESRS.

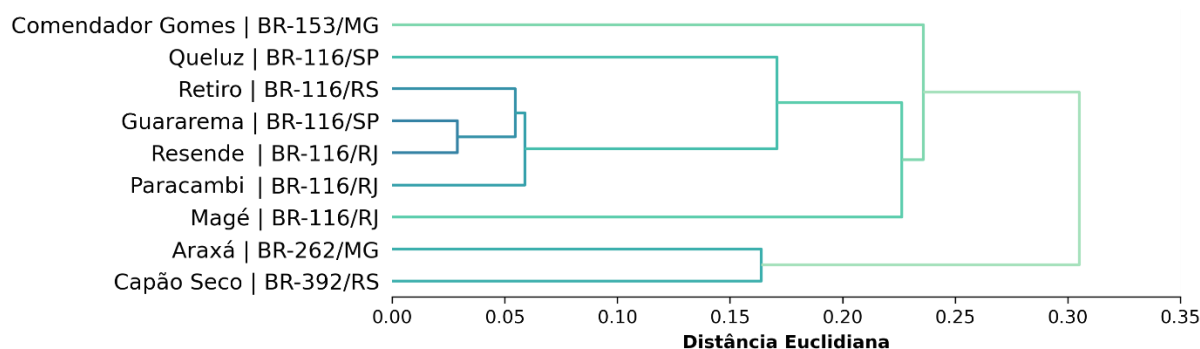
No intuito de fornecer subsídio para projetistas que desejem aplicar os resultados aqui obtidos para outros trechos e rodovias, buscou-se agrupar as nove balanças utilizadas nessa pesquisa de acordo com suas similaridades. Os pontos de pesagem estudados foram agrupados utilizando-se um algoritmo de agrupamento hierárquico, cujos detalhes podem ser encontrados na seção 3.4.5. Os PPVs foram agrupados com base no espectro de cargas de PBT (Figura 33), assim como na distribuição de classes de veículo (Tabela 21). Os resultados são apresentados na forma dos dendrogramas das figuras 41 e 42.

Figura 41 - Agrupamento dos PPVs de acordo com suas distribuições de carga



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 42 - Agrupamento dos PPVs de acordo com suas distribuições de classe de veículo



(fonte: elaborado pelo autor)

No processo hierárquico, os PPVs vão sendo agrupados em pares, de acordo com a distância euclidiana calculada entre eles. Quanto menor a distância encontrada, mais similares são os PPVs. É possível notar que os PPVs de Resende, Guararema, Paracambi e Retiro apresentaram grande similaridade, tanto em função da distribuição de cargas quanto das classes veiculares. Embora isso fosse em parte esperado, uma vez que os três primeiros pontos estão todos localizados no trecho RJ-SP da BR-116, as similaridades entre Retiro e as demais foram

importantes para demonstrar que diferentes trechos ou rodovias podem apresentar semelhanças quanto as cargas rodantes, mesmo quando geograficamente distantes. Outro ponto interessante é que o PPV de Queluz, também localizado na BR-116 entre o PPV de Guararema/SP e os PPVs de Paracambi e Resende, no Rio de Janeiro, não apresenta tantas similaridades, resultando numa distância euclidiana maior.

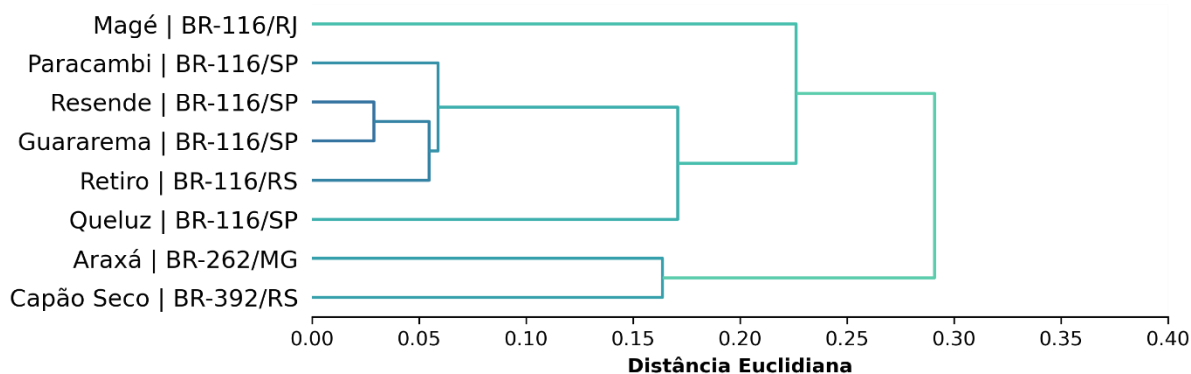
Outra conclusão chave que pode ser obtida ao comparar os grupos da Figura 41 com os da Figura 42 é o fato de que, de forma geral, as classes de veículos que trafegam nas rodovias parecem ser um bom indicativo dos níveis de carregamento observados na frota. Conforme já comentado, Resende, Guararema, Paracambi e Retiro foram todos agrupados juntos tanto em consideração às cargas quanto às classes de veículos. Queluz e Magé, por outro lado, se demonstraram ambos bastante distantes dos demais grupos nas duas abordagens. As únicas exceções observadas foram Capão Seco, que foi agrupado com Araxá no quesito cargas, mas ficou solitário no quesito tipos de veículo, e Comendador Gomes, agrupado com Araxá no quesito classes veiculares, mas sem grupo bem definido no quesito cargas

Nesse ponto, o PPV de Comendador Gomes merece uma discussão a parte. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, diversas discrepâncias chamaram atenção nessa balança. Comendador foi a balança que apresentou o maior número de pesagens removidas (quase 35% do total original) devido a inconsistências observadas no processo de limpeza dos dados (Tabela 19). Essa também foi a balança que apresentou o maior tempo de inoperância estimado dentre as estudadas, com cerca de 85% do tempo inoperante (Tabela 20). Por fim, outra diferença fundamental foi observada nos espectros de carga (figuras 32 e 33), onde, por mais que sejam esperadas diferenças entre as balanças, é possível perceber que Comendador não parece aderir a nenhuma das características comuns aos demais PPVs. Tendo isso em vista, em especial nessa etapa final do estudo, optou-se por não considerar Comendador Gomes como representativo de nenhum dos grupos obtidos. Com isso, os oito PPVs restantes foram reagrupados seguindo a mesma lógica das figuras 41 e 42. Os agrupamentos resultantes são apresentados nas figuras 43, com relação às distribuições de carga, e 44, com relação às classes de veículo.

Tomando por base os agrupamentos obtidos acima, assim como outras características relevantes de cada trecho, os oito PPVs foram designados a quatro diferentes grupos, conforme apresentado no Quadro 8. De forma a validar o agrupamento obtido através do método hierárquico, os postos foram submetidos ao algoritmo *K-means*, com o número de grupos pré-

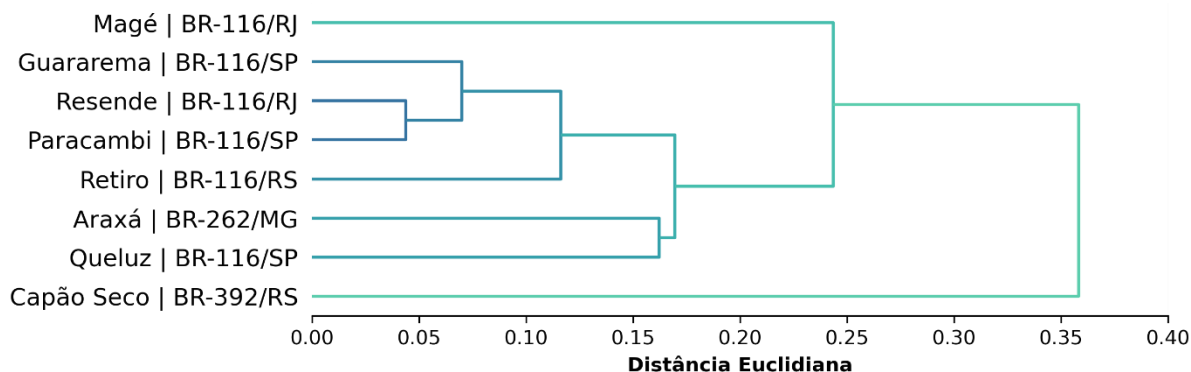
estabelecido como sendo $k = 4$. O agrupamento assim obtido foi exatamente o mesmo obtido através do agrupamento hierárquico, validando os resultados ora obtidos.

Figura 43 - Agrupamento dos PPVs de acordo com suas distribuições de carga, excluindo-se Comendador Gomes



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 44 - Agrupamento dos PPVs de acordo com suas distribuições de classe de veículo, excluindo-se Comendador Gomes



(fonte: elaborado pelo autor)

Para cada um dos quatro grupos propostos foram tomadas as médias dos percentuais de eixos descarregados, carregados e sobrecarregados observados na Tabela 31, ponderadas pelo total de eixos de cada tipo. Os valores assim obtidos foram propostos como representativos de cada um dos grupos definidos, e são resumidos na Tabela 34. Entretanto, vale novamente frisar que a extrapolação dos resultados ora obtidos para outras deve ser feita com parcimônia, tendo em vista o número limitado de balanças estudadas frente a heterogeneidade das frotas brasileiras.

Tendo em mãos os intervalos propostos para a classificação de eixos em descarregados, carregados e sobrecarregados, assim como os fatores de equivalência de carga calculados a partir do centro geométrico de cada nível de carregamento, foi possível estimar, para cada balança e ano estudados, os valores de número N e de fator veicular médio da frota comercial, FVc de acordo com a metodologia ora proposta. Para isso, as pesagens reais de cada balança foram agrupadas nos três grupos de carregamento (Tabela 31), aplicando as proporções assim

obtidas aos FC definidos na Tabela 33. Os FVc assim obtidos (cargas propostas, distribuição real) são apresentados na Figura 45 e na Tabela 35, juntamente com o erro em relação ao FVc real calculado anteriormente.

Quadro 8 - Grupos de balanças e suas características em comum

Grupo	Balanças	Características
1	Magé/RJ	Região urbana 65% da frota composta por caminhões leves (2 e 3 eixos) Elevado número de eixos descarregados (> 70%) Baixo número de eixos sobrecarregados (< 5%)
2	Retiro/RS Guararema/SP Resende/RJ Paracambi/RJ	Região urbana Tráfego intra-estadual 50% da frota composta por caminhões leves (2 e 3 eixos) Número moderado de eixos descarregados (~50%) Número moderado de eixos sobrecarregados (~15%)
3	Queluz/SP	Região urbana Tráfego interestadual 60% da frota composta por caminhões pesados (4 ou mais eixos) Concentração das cargas por eixo em torno da CML
4	Araxá/MG Capão Seco/RS	Região rural Tráfego interestadual Proximidade de portos/terminais ferroviários Elevado número de caminhões com 4 ou mais eixos (acima de 60%) Elevado número de eixos sobrecarregados

(fonte: elaborado pelo autor)

De modo a avaliar o modelo de níveis de carga ora proposto, também foram calculados os FVc utilizando as cargas propostas (Tabela 32) e as distribuições de carga propostas para cada grupo (Tabela 34). Para efeitos comparativos, ainda foram calculados os erros encontrados ao utilizar distribuições simplificadas do tipo 70-30 ou 80-20 (carregados-vazios), conforme discutido na seção 2.5. Nesse caso, foi utilizado a CML para eixos carregados e os valores observados por Balbo (2007), apresentados na Tabela 13, como tara de eixos vazios. Por fim, são apresentados ainda os r^2 de cada conjunto de FVc calculado.

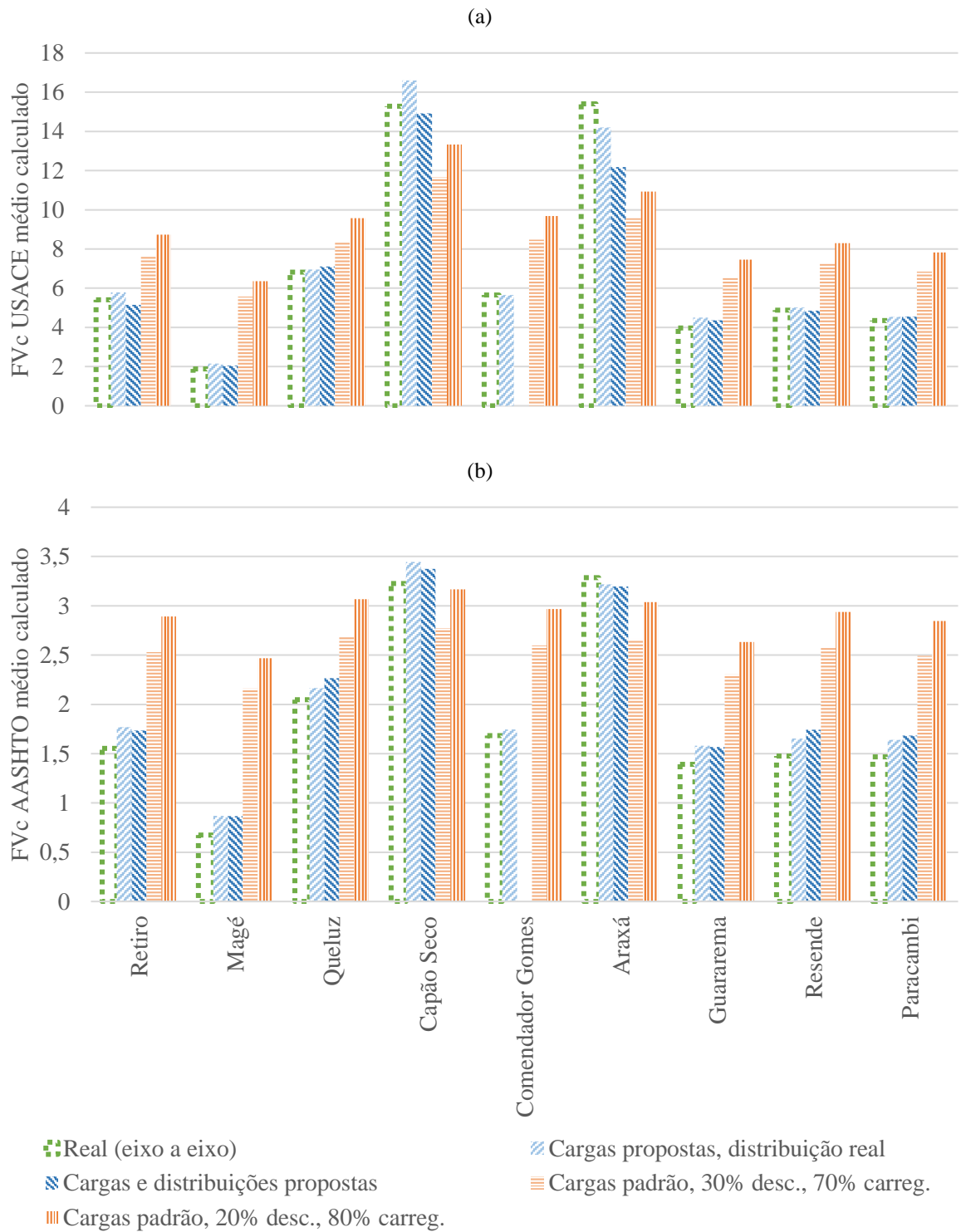
A partir dos resultados obtidos, fica claro que a utilização de distribuições genéricas de carga, como o caso das proporções 70-30 e 80-20, não é capaz de retratar o FVc real adequadamente, tendendo a superestimar os fatores em frotas menos carregadas e subestimá-los naquelas mais carregadas. Tal comportamento também é percebido para os fatores ora modelados, mas em menor escala, conferindo-lhes valores de r^2 superiores a 0,90.

Tabela 34 - Níveis de carga de referência propostos para cada grupo de rodovia definido

Grupo	Descrição	Descarregados	Carregados	Sobrecarregados
1	Região metropolitana de tráfego leve	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%
2	Região metropolitana de tráfego moderado	50,34%	37,24%	12,42%
	ESRS	48,71%	39,64%	11,65%
	ESRD	47,69%	44,62%	7,69%
	ETD	58,23%	27,91%	13,87%
	ETT	43,74%	23,38%	32,88%
	EDD	21,94%	57,46%	20,61%
3	Região metropolitana de tráfego pesado	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	-	-	-
4	Região rural e/ou próxima a portos/terminais ferroviários, de tráfego ultra pesado	25,49%	36,00%	38,51%
	ESRS	30,35%	37,84%	31,81%
	ESRD	40,06%	43,72%	16,23%
	ETD	17,05%	32,77%	50,18%
	ETT	20,49%	31,00%	48,51%
	EDD	17,92%	48,32%	33,76%

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 45 - Valores de FVc USACE (a) e AASHTO (b) obtidos para as diferentes considerações de carga



(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 35 - Fatores veiculares e erros em relação ao valor real, calculados para diferentes distribuições de carga

Balança	Ano	Valor real (eixo a eixo)		Cargas propostas (Tabela 32) e distribuição real (Tabela 31)		Cargas propostas (Tabela 32) e dist. propostas (Tabela 34)		20% vazio 80% cheio (CML)		30% vazio 70% cheio (CML)	
		FVc USACE	FVc AASHTO	FVc USACE	FVc AASHTO	FVc USACE	FVc AASHTO	FVc USACE	FVc AASHTO	FVc USACE	FVc AASHTO
Retiro	2018	5,41	1,55	5,78 (+6,9%)	1,77 (+13,9%)	5,15 (-4,8%)	1,73 (+11,5%)	8,74 (+61,5%)	2,89 (+86,1%)	7,65 (+41,4%)	2,53 (+62,8%)
Magé	2015	1,53	0,62	1,93 (+26,2%)	0,85 (+36,9%)	2,17 (+41,6%)	0,91 (+47,1%)	6,74 (+339,4%)	2,61 (+320,2%)	5,90 (+284,6%)	2,28 (+267,7%)
Magé	2016	1,88	0,72	2,22 (+18,2%)	0,93 (+28,7%)	2,08 (+11,1%)	0,89 (+23,8%)	6,49 (+246,0%)	2,56 (+254,8%)	5,68 (+202,8%)	2,24 (+210,5%)
Magé	2017	1,67	0,66	2,00 (+19,3%)	0,86 (+30,4%)	2,03 (+21,5%)	0,88 (+33,8%)	6,40 (+282,3%)	2,53 (+285,1%)	5,60 (+234,6%)	2,21 (+237,0%)
Magé	2018	2,46	0,70	2,44 (-1,0%)	0,84 (+19,8%)	1,89 (-23,2%)	0,78 (+11,2%)	5,81 (+136,1%)	2,19 (+210,2%)	5,08 (+106,7%)	1,91 (+171,5%)
Queluz	2013	5,78	1,79	5,97 (+3,4%)	1,91 (+6,8%)	7,10 (+23,0%)	2,23 (+24,6%)	9,52 (+64,8%)	3,01 (+68,0%)	8,33 (+44,2%)	2,63 (+47,0%)
Queluz	2014	5,70	1,74	5,91 (+3,6%)	1,87 (+7,7%)	7,20 (+26,1%)	2,26 (+30,2%)	9,65 (+69,2%)	3,06 (+75,7%)	8,45 (+48,1%)	2,68 (+53,8%)
Queluz	2015	7,52	2,19	7,68 (+2,1%)	2,30 (+5,2%)	7,09 (-5,8%)	2,25 (+2,9%)	9,55 (+27,0%)	3,05 (+39,3%)	8,36 (+11,2%)	2,67 (+21,9%)
Queluz	2016	8,70	2,46	8,69 (-0,0%)	2,55 (+3,8%)	6,98 (-19,7%)	2,25 (-8,5%)	9,43 (+8,5%)	3,05 (+24,1%)	8,26 (-5,1%)	2,67 (+8,6%)
Queluz	2017	6,73	2,06	6,81 (+1,2%)	2,18 (+5,9%)	7,05 (+4,8%)	2,27 (+10,4%)	9,53 (+41,7%)	3,08 (+49,9%)	8,35 (+24,0%)	2,70 (+31,1%)
Queluz	2018	6,51	2,06	6,68 (+2,5%)	2,18 (+6,0%)	7,20 (+10,6%)	2,33 (+13,1%)	9,73 (+49,5%)	3,16 (+53,6%)	8,52 (+30,8%)	2,76 (+34,4%)
Capão Seco	2018	15,28	3,23	16,60 (+8,6%)	3,44 (+6,8%)	14,92 (-2,4%)	3,37 (+4,6%)	13,33 (-12,8%)	3,17 (-1,8%)	11,66 (-23,7%)	2,77 (-14,1%)
Comendador	2015	7,95	1,97	7,95 (-0,0%)	2,13 (+7,8%)	-	-	11,57 (+45,5%)	3,26 (+65,1%)	10,12 (+27,4%)	2,85 (+44,5%)
Comendador	2017	5,93	1,78	6,26 (+5,5%)	2,01 (+12,8%)	-	-	11,18 (+88,5%)	3,20 (+79,3%)	9,78 (+65,0%)	2,80 (+57,0%)
Comendador	2018	1,98	0,74	2,36 (+19,5%)	0,90 (+20,9%)	-	-	11,49 (+481,1%)	3,26 (+337,4%)	10,06 (+408,6%)	2,85 (+282,8%)
Comendador	2019	10,36	2,86	9,96 (-3,9%)	2,73 (-4,4%)	-	-	9,80 (-5,4%)	3,05 (+6,9%)	8,58 (-17,2%)	2,67 (-6,4%)
Comendador	2020	2,08	1,06	1,77 (-15,1%)	0,95 (-10,8%)	-	-	4,37 (+110,2%)	2,07 (+94,9%)	3,83 (+84,0%)	1,81 (+70,5%)
Araxá	2015	16,12	3,40	15,09 (-6,4%)	3,35 (-1,5%)	12,05 (-25,2%)	3,14 (-7,6%)	10,80 (-33,0%)	2,98 (-12,3%)	9,45 (-41,3%)	2,61 (-23,2%)
Araxá	2016	15,97	3,38	15,10 (-5,4%)	3,36 (-0,7%)	12,02 (-24,7%)	3,16 (-6,5%)	10,79 (-32,4%)	3,01 (-11,2%)	9,44 (-40,9%)	2,63 (-22,2%)
Araxá	2017	15,69	3,34	14,92 (-4,9%)	3,32 (-0,5%)	12,20 (-22,2%)	3,19 (-4,4%)	10,95 (-30,2%)	3,03 (-9,2%)	9,58 (-38,9%)	2,65 (-20,5%)
Araxá	2018	16,11	3,36	14,08 (-12,6%)	3,21 (-4,5%)	12,18 (-24,4%)	3,21 (-4,6%)	10,93 (-32,2%)	3,05 (-9,3%)	9,57 (-40,6%)	2,67 (-20,6%)
Araxá	2019	12,27	2,75	11,19 (-8,8%)	2,70 (-1,6%)	12,22 (-0,4%)	3,24 (+17,9%)	10,98 (-10,5%)	3,08 (+12,2%)	9,61 (-21,6%)	2,70 (-1,8%)
Araxá	2020	16,27	3,49	14,83 (-8,9%)	3,37 (-3,5%)	12,42 (-23,7%)	3,24 (-7,3%)	11,14 (-31,6%)	3,07 (-12,0%)	9,75 (-40,1%)	2,69 (-23,0%)

continua

Balança	Ano	Valor real (eixo a eixo)		Cargas propostas (Tabela 32) e distribuição real (Tabela 31)		Cargas propostas (Tabela 32) e dist. propostas (Tabela 34)		20% vazio 80% cheio (CML)		30% vazio 70% cheio (CML)	
		FVc USACE	FVc AASHTO	FVc USACE	FVc AASHTO	FVc USACE	FVc AASHTO	FVc USACE	FVc AASHTO	FVc USACE	FVc AASHTO
Guararema	2015	4,07	1,38	4,59 (+12,6%)	1,57 (+13,6%)	4,35 (+6,7%)	1,54 (+11,2%)	7,40 (+81,7%)	2,57 (+86,1%)	6,48 (+59,0%)	2,25 (+62,8%)
Guararema	2016	3,62	1,32	4,11 (+13,6%)	1,51 (+14,2%)	4,29 (+18,6%)	1,56 (+17,8%)	7,34 (+103,0%)	2,62 (+98,2%)	6,43 (+77,7%)	2,29 (+73,4%)
Guararema	2017	4,00	1,41	4,55 (+13,7%)	1,60 (+13,8%)	4,38 (+9,4%)	1,58 (+12,0%)	7,49 (+87,1%)	2,65 (+88,3%)	6,55 (+63,7%)	2,32 (+64,8%)
Guararema	2018	4,21	1,45	4,74 (+12,4%)	1,65 (+13,3%)	4,44 (+5,4%)	1,60 (+10,1%)	7,59 (+80,2%)	2,69 (+85,2%)	6,65 (+57,8%)	2,35 (+62,1%)
Resende	2015	4,17	1,32	4,49 (+7,7%)	1,51 (+14,1%)	4,83 (+15,7%)	1,71 (+29,8%)	8,25 (+97,7%)	2,88 (+118,4%)	7,22 (+73,0%)	2,52 (+91,1%)
Resende	2016	5,62	1,68	5,65 (+0,5%)	1,82 (+8,4%)	4,73 (-15,9%)	1,71 (+2,0%)	8,11 (+44,2%)	2,90 (+72,3%)	7,10 (+26,2%)	2,53 (+50,8%)
Resende	2017	4,51	1,43	4,90 (+8,8%)	1,62 (+13,9%)	4,84 (+7,4%)	1,75 (+22,5%)	8,28 (+83,8%)	2,95 (+106,7%)	7,25 (+60,9%)	2,58 (+80,9%)
Resende	2018	5,20	1,47	5,04 (-3,1%)	1,66 (+12,6%)	4,99 (-4,1%)	1,79 (+21,5%)	8,53 (+64,0%)	3,02 (+104,8%)	7,47 (+43,5%)	2,64 (+79,2%)
Paracambi	2015	4,61	1,54	4,68 (+1,5%)	1,69 (+9,7%)	4,57 (-1,0%)	1,66 (+8,2%)	7,81 (+69,3%)	2,81 (+82,4%)	6,83 (+48,2%)	2,46 (+59,6%)
Paracambi	2016	4,42	1,48	4,54 (+2,7%)	1,64 (+10,8%)	4,49 (+1,6%)	1,67 (+12,7%)	7,72 (+74,6%)	2,82 (+90,7%)	6,75 (+52,8%)	2,47 (+66,9%)
Paracambi	2017	3,85	1,34	4,17 (+8,3%)	1,53 (+14,3%)	4,54 (+17,9%)	1,68 (+25,9%)	7,79 (+102,5%)	2,85 (+113,1%)	6,82 (+77,2%)	2,49 (+86,5%)
Paracambi	2018	4,53	1,52	4,79 (+5,8%)	1,71 (+12,3%)	4,64 (+2,4%)	1,72 (+13,1%)	7,97 (+75,9%)	2,91 (+91,6%)	6,98 (+53,9%)	2,55 (+67,7%)
<i>Média Ponderada</i>				(+6,3%)	(+12,0%)	(+5,8%)	(+15,4%)	(+86,6%)	(+98,1%)	(+63,4%)	(+73,4%)
<i>r²</i>				0,9876	0,9511	0,9380	0,9038	0,5680	0,2825	0,5680	0,2827

(fonte: elaborado pelo autor)

5 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 expor o impacto de diferentes níveis de carga nas rodovias do país, muitos estudos e projetos de pavimentos ainda partem da premissa de uma frota ou carregamento simplificado, por vezes considerando todos os veículos com o mesmo nível de carregamento. Possivelmente, isso ocorre pela limitada disponibilidade de dados de pesagem para estudo e o elevado custo e dificuldade operacional envolvida para campanhas estatísticas de pesagem.

Na avaliação do impacto da sobrecarga, encontraram-se estudos brasileiros que aplicam uma taxa de excesso para toda a frota, ignorando o tráfego de veículos vazios ou menos carregados. Quando dados de pesagem são efetivamente utilizados, observou-se uma limitação nos estudos brasileiros com relação ao tamanho da amostra analisada, seja temporal ou espacialmente. Nesse sentido, o presente estudo busca 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 38 milhões de veículos neste trabalho, distribuídas em nove postos de pesagem brasileiros ao longo de 11.258 dias, perfazendo uma média de 3,4 anos de dados por PPV. As pesagens foram submetidas à um processo de limpeza e validação criterioso, que acabou por remover 5,4 milhões de entradas do banco, restando ainda 32,7 milhões de veículos, com pesagem de 88,2 milhões de grupos de eixos. A grande massa de dados permitiu uma caracterização completa das frotas de cada ponto estudado, tanto em termos de cargas quanto de tipos de veículo. Com isso, as conclusões obtidas a partir do trabalho desenvolvido são apresentadas a seguir, relacionadas aos objetivos inicialmente propostos.

Com relação ao objetivo geral de *propor, a partir de dados de pesagem veículo a veículo, níveis de carregamento referenciais da frota para serem utilizados em projetos e sistemas de gerenciamento de pavimentos em diferentes regiões do Brasil*:

- a) o modelo proposto dividiu os eixos entre descarregados, carregados e sobrecarregados, para os quais as cargas propostas foram, respectivamente:
 - i. 4,00 t, 5,49 t e 6,60 t, para o ESRS;
 - ii. 7,50 t 10,78 t e 13,20 t para o EDD;
 - iii. 5,42 t, 8,72 t e 11,00 t para o ESRD;
 - iv. 10,63 t, 15,27 t e 18,70 t para o ETD;

- v. 19,13 t, 24,31 t e 28,05 t para o ETT.
- b) as proporções médias de eixos descarregados, carregados e sobrecarregados observadas foram de, respectivamente:
 - i. 73%, 23% e 4%, para regiões de tráfego leve;
 - ii. 50%, 37% e 13%, para regiões de tráfego moderado;
 - iii. 36%, 48% e 16%, para regiões de tráfego pesado;
 - iv. 25%, 36% e 39%, para regiões de tráfego ultra pesado.
- c) 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 consideradas os percentuais reais de eixos descarregados, carregados e sobrecarregados, com r^2 de 0,99 e 0,95, respectivamente; ao utilizar as distribuições propostas pelo método de agrupamento, os erros médios foram de +5,8% para o fator USACE e +15,4% para o fator AASHTO, com r^2 de 0,94 e 0,90, respectivamente;

Com relação ao objetivo específico de *identificar, através de dados coletados em massa, o nível de carregamento real observado na frota comercial brasileira em diferentes rodovias do país:*

- d) foram relatados os níveis de carregamento reais observados em cada uma das nove balanças estudadas, tanto na forma de espectros de carga quanto de acordo com os nichos de eixos descarregados, carregados e sobrecarregados;
- e) a análise dos espectros de carga na sua forma gráfica permite, com relativa simplicidade, a comparação qualitativa dos níveis de carregamento de diferentes frotas, destacando suas diferenças e similaridades;

Com relação ao objetivo específico de *verificar e comparar os níveis de carga recomendados por órgãos rodoviários para projeto de pavimentos no Brasil:*

- f) proporções genéricas de níveis de carregamento, bastante utilizadas na prática brasileira, tendem a superestimar os valores de FVc para a maioria dos pontos observados, ao passo que subestimam os valores de FVc para pontos muito carregados; assim, usar a CML como carga referencial para estudos de pavimentos tende a retornar resultados bastante divergentes – para mais ou para menos – do tráfego real e, portanto, o uso de considerações genéricas de carga é fortemente desaconselhado para esse fim;
- g) os resultados ora obtidos, em consonância com outros estudos encontrados na literatura brasileira, parecem convergir para cargas reais menores do que aquelas utilizadas nas recomendações de órgãos rodoviários;

Com relação ao objetivo específico de *identificar o comportamento da frota frente aos limites legais de carga impostos pela legislação brasileira:*

- h) de todos os veículos estudados, 24,7% apresentaram excesso acima da CML em, pelo menos, um de seus eixos, enquanto 9,5% apresentaram excessos com relação ao PBT;
- i) os maiores percentuais de excesso foram observados no PPV de Araxá – classificado nesta pesquisa como de tráfego ultra pesado –, com 52,0% dos veículos excedendo a CML em, pelo menos, um de seus eixos, e com 35,2% excedendo os limites de PBT;

- j) os menores percentuais de excesso foram observados no PPV de Magé – classificado nesta pesquisa como de tráfego leve –, com 7,2% dos veículos excedendo a CML em, pelo menos, um de seus eixos, e apenas 1,8% excedendo os limites de PBT;
- k) com relação à legislação de cargas brasileira e suas tolerâncias, 7,2% de todos os veículos avaliados seriam considerados infratores segundo a Lei nº 13.103/2015 – sendo 3,8% por excesso apenas no eixo, 0,7% por excesso apenas no PBT e 2,7% por excesso em ambos, eixo e PBT –, enquanto 4,0% seriam considerados infratores segundo a Lei nº 14.229/2021 – sendo 0,6% por excesso apenas no eixo, 1,3% por excesso apenas no PBT e 2,1% por excesso em ambos, eixo e PBT;
- l) ao limitar as frotas estudadas a diversos cenários de carga, as maiores diferenças em termos de fator veicular médio da frota comercial (FVc) foram observadas entre o cenário com cargas limitadas à CML e o cenário com cargas limitadas à CML+5% de tolerância, aumentando o FVc, em média, em 9% com relação à metodologia USACE e em 5% pela metodologia AASHTO;
- m) a diferença entre a frota real (sem nenhuma limitação de cargas) e a frota limitada à CML em termos de FVc é, em média, de +25% segundo os fatores USACE e de +13% segundo os fatores AASHTO;

Com relação ao objetivo específico de *usar ferramentas de análise de dados em massa para auxiliar na identificação de características subsuperficiais do carregamento rodoviário para fins de análise do desempenho de pavimentos*:

- n) a linguagem Python, somada a sua miríade de bibliotecas especializadas, demonstrou-se uma excelente ferramenta para a manipulação de grandes volumes de dados, permitindo, ainda, o desenvolvimento de um aplicativo focado na organização dos dados de pesagem utilizados na pesquisa;
- o) estima-se que, para sete dos nove pontos estudados, as balanças operaram mais de 85% do período analisado, reforçando o uso das balanças seletivas como uma boa fonte de dados amostrais de pesagem veicular;
- p) de todos os veículos presentes no banco de dados, mais de 50% são de 2 ou 3 eixos, referentes às classes 2C e 3C;
- q) em oito dos nove postos analisados, o eixo mais comum é o ESRS, seguido do ESRD ou ETD, a depender do posto; a exceção fica por conta de Capão Seco, onde o ETD é o eixo mais comum, seguido do ESRS;
- r) com relação à classificação proposta no Quadro de Fabricantes de Veículos (QFV/DNIT):
 - i. as 10 classes mais frequentes em cada PPV estudado foram capazes de cobrir entre 90% e 95% da frota observada, em contraste à classificação minuciosa do quadro, que contempla 90 classes de caminhões e 30 de ônibus, além de 36 classes com diferentes limites de PBT, totalizando 156 classes veiculares;
 - ii. somando todos os PPVs estudados, 45 das 90 classes de caminhão contidas no quadro apresentam frequências inferiores a 0,1% e somam menos de 0,5% de todas as classes observadas no banco, enquanto outras 22 classes do quadro sequer foram observadas;

- iii. considerando apenas a configuração de eixos dos veículos, existem somente 64 classes únicas de caminhões no quadro, caindo para 49 ao ignorar a ordem dos eixos;
 - iv. em suma, embora a classificação do QFV possa ser necessária em termos da fiscalização de veículos, classificações mais simples – como aquela apresentada no PNCT/DNIT, baseada no número de eixos – parecem ser suficientes para estudos de cargas.
- s) a comparação entre os espectros diurno e noturno nos diferentes postos de pesagem evidenciou que, de maneira geral, os veículos tendem a trafegar mais carregados durante a noite, ainda que a maioria da frota trafegue durante o dia;
 - t) para os PPVs de Araxá e Comendador Gomes, os quais continham informações acerca da fiscalização, foi possível notar que a presença do agente é muito mais comum durante o horário comercial, com poucas pesagens fiscalizadas durante o período noturno ou durante os fins de semana;
 - u) além do claro benefício ao impedir que excessos de carga sigam trafegando nas rodovias, a maior presença da fiscalização parece modificar o comportamento geral do carregamento da frota, evitando que excessos de carga sequer entrem nas rodovias fiscalizadas; podem ser citados de um lado o PPV de Queluz, com histórico de grande cobertura da fiscalização, onde apesar das cargas elevadas a presença de sobrecarga é moderada, e de outro os PPVs de Araxá e Capão Seco, com conhecida fragilidade na fiscalização, onde as altas cargas são acompanhadas de grandes percentuais de sobrecarga;

Com relação ao objetivo específico de *propor, com auxílio de um método de agrupamento (clustering), frotas de veículos comerciais com características e comportamentos de carga similares, de modo a permitir a extrapolação dos resultados obtidos para outras rodovias e regiões do país:*

- v) de acordo com os resultados obtidos utilizando-se um algoritmo de agrupamento hierárquico, a distribuição das classes de veículo observada em uma dada rodovia parece ter boa relação com os níveis de carga ali observados, sendo uma alternativa viável para estimar o carregamento da frota quando da ausência de dados reais de pesagem;
- w) o algoritmo de agrupamento utilizado, com auxílio visual de dendrogramas, apresentou resultados satisfatórios na aplicação em questão, retornando grupos com características similares de localização, vocação da rodovia e urbanização, ainda que tais características não tenham sido parâmetro de entrada para o agrupamento.

A análise de nove postos de pesagem veicular evidenciou a heterogeneidade da frota comercial brasileira, reforçando a importância da consideração adequada das cargas em projeto, preferencialmente mediante campanhas de pesagem em campo e consideração de todo o espectro de cargas observado. Contudo, na impossibilidade da verificação das cargas reais, o presente estudo propôs, através de um algoritmo de agrupamento hierárquico, a divisão dos nove postos estudados em quatro grupos, para os quais foram determinados níveis de carregamento de referência da frota. Os grupos foram caracterizados segundo sua localização,

vocação da rodovia e proporção de veículos leves (2 e 3 eixos) e veículos pesados (4 ou mais eixos), e os resultados obtidos representam um potencial avanço do estado da prática de engenharia de pavimentos no Brasil. Salienta-se, porém, que os valores ora apresentados devem ser tomados com cautela, visto o número limitado de pontos e rodovias considerados.

Ressalta-se que este trabalho se propôs a retratar os espectros de carga reais da frota brasileira, ao invés de resumi-los a um único fator veicular médio por frota ou por tipo de veículo. Os resultados obtidos mostraram que a estimativa do impacto ao pavimento a partir de fatores veiculares frente a diferentes cenários de carga depende do modelo usado para o cálculo desses fatores – no caso avaliado, USACE ou AASHTO. Nesse sentido, pode-se dizer que o espectro de cargas é uma grandeza física real, que pode ser aferida em campo, ao passo que fatores veiculares são artifícios para a conversão das cargas em dano ao pavimento. Como tal, esses fatores estão intimamente ligados às premissas por trás de cada modelo, e sua adoção indiscriminada em estudos de pavimentos, ainda que baseadas em dados reais de carga e tratamentos estatísticos adequados, deve ser vista com cautela. Idealmente, recomenda-se que o conceito de espectro de cargas e a consideração de dados de pesagem sejam incorporados aos métodos de dimensionamento de pavimentos brasileiros através do desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho calibrados para a realidade de cargas nacional.

Por fim, dadas as limitações já previstas inicialmente, entende-se que o presente estudo poderia se beneficiar da continuidade desta pesquisa. Assim, sugere-se como trabalhos futuros:

- a) incorporar outros postos de pesagem ao estudo, buscando abranger regiões do país não contempladas pelo estudo;
- b) correlacionar os resultados ora obtidos com pontos de contagem classificatória de veículos, como aqueles do Plano Nacional de Contagem de Tráfego, no intuito de estimar as cargas rodantes nestes locais a partir das classes veiculares;
- c) revisitar estudos de tráfego que porventura tenham se baseado em considerações genéricas de carga, principalmente aqueles que tenham sido utilizados para obter curvas de calibração brasileiras para modelos de desempenho de pavimentos;
- d) estudar a viabilidade de utilização do conceito de espectro de cargas, já utilizado em ferramentas como o *AASHTOWare PavementME Design*, como parâmetro de entrada na calibração de modelos brasileiros de previsão de desempenho e em novas metodologias de dimensionamento de pavimentos no país;
- e) utilizar distribuições probabilísticas para a correlação e modelagem de espectros de carga, de modo a tentar prever os níveis de carregamento mesmo na ausência de dados de pesagem.

REFERÊNCIAS

- ALBANO, J. F. **Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- ALBANO, J. F.; LINDAU, L. A. Revisando as tecnologias para pesagem de veículos. **Revista Estradas**, n. 10, p. 102–108, 2006.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, DC: AASHTO, 1993.
- _____. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice**. 2nd. ed. Washington, DC: AASHTO, 2015.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY OFFICIALS. **AASHO Interim Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, DC: AASHO, 1972.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 15638-20: Sistemas inteligentes de transporte - Estrutura para aplicações telemáticas cooperativas para veículos comerciais de carga regulamentados (ATVR). Parte 20: Monitoramento de pesagem em movimento**. Brasília, DF: ABNT, 2021.
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BOCK, A. L. **Pesagem em movimento de cargas atuantes em rodovias e seu impacto no desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- BOSSO, M. **Uso da tecnologia Weigh-in-Motion para a caracterização do tráfego rodoviário e do excesso de carga em veículos comerciais**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2018.
- BOSSO, M. et al. Use of regression trees to predict overweight trucks from historical weigh-in-motion data. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 7, n. 6, p. 843–859, dez. 2020.
- BRASIL. Decreto nº 62.127, de 16 de janeiro de 1968. Aprova o Regulamento do Código Nacional de Trânsito. **Diário Oficial da União**, p. 689, 1968.
- _____. Lei nº 7.408, de 25 de novembro de 1985. Permite a tolerância de 5% (cinco por cento) na pesagem de carga em veículos de transporte. **Diário Oficial da União**, 1985.
- _____. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 102, de 31 de agosto de 1999. Dispõe sobre a tolerância máxima de peso bruto de veículos. **Diário Oficial da União**, 1999a.
- _____. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 104, de 21 de dezembro de 1999. Dispõe sobre tolerância máxima de peso bruto de veículos. **Diário Oficial da União**, 1999b.
- _____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2006a.

_____. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução 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**, 2006b.

_____. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 258, de 30 de novembro de 2007. Fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2007.

_____. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Localização e Principais Características Operacionais dos Postos de Pesagem para o Transporte de Carga e de Passageiros**. 2008. Disponível em: <http://appweb2.antt.gov.br/InformacoesTecnicas/aett/aett_2008/1.1.4.asp>. Acesso em: 27 jan. 2022.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Realização de testes em campo com as diversas tecnologias pré-selecionadas. In: **Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento**. Brasília, DF: DNIT, UFSC, NEP, 2009.

_____. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução nº 489, de 05 de junho de 2014. Altera os artigos 5º e 9º da Resolução nº 258 do CONTRAN, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2014a.

_____. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Pontos de pesagem e fiscalização em rodovias**. 2014b. Disponível em: <http://proferr.antt.gov.br/index.php/content/view/31498/Pontos_de_pesagem_e_fiscalizacao_em_rodovias.html>. Acesso em: 27 jan. 2022.

_____. Lei nº 13.103, de 2 de março de 2015. Altera a Lei nº 7.408, de 25 de novembro de 1985; revoga dispositivos da Lei nº 12.619, de 30 de abril de 2012; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2015.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **PIAF: Posto Integrado Automatizado de Fiscalização**. 2016. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/operacoes-rodoviaras/pesagem/piaf>>. Acesso em: 26 jan. 2022.

_____. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Manual de Procedimentos de Fiscalização em Postos de Pesagem Veicular**. 2. ed. Brasília, DF: ANTT, 2018.

_____. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Portaria nº 367, de 03 de dezembro de 2020. Altera a Portaria Inmetro nº 375, de 24 de julho de 2013, publicada no DOU de 25/07/2013, seção 1, página 82. 2020a.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Planilha com dados obtidos de extratos oriundos das Unidades Móveis Operacionais (UMOs), por UF**. 2020b. Disponível em: <http://dadosabertos.dnit.gov.br/pt_BR/dataset/pesagem>. Acesso em: 23 mar. 2022.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Quadro de Fabricantes de Veículos**. Brasília, DF: DNIT, 2021a.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Conheça o PNCT.** 2021b. Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/Inicio/institucional>>. Acesso em: 1 dez. 2021.

_____. Conselho Nacional de Trânsito. Resolução N° 882, de 13 de dezembro de 2021. Estabelece os limites de pesos e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2021c.

_____. Lei n° 14.229, de 21 de outubro de 2021. Altera a Lei n° 7.408, de 25 de novembro de 1985, e a Lei n° 9.503, de 23 de setembro de 1997 (Código de Trânsito Brasileiro), para dispor sobre a fiscalização do excesso de peso dos veículos; altera a Lei n° 10.20. **Diário Oficial da União**, 2021d.

_____. Ministério da Infraestrutura. **Câmara aprova MP sobre o aumento do limite da tolerância para pesagem por eixo.** 2021e. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/noticias/2021/9/camara-aprova-mp-sobre-o-aumento-do-limite-da-tolerancia-para-pesagem-por-eixo>>. Acesso em: 14 dez. 2021.

_____. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Sistema Integrado de Fiscalização, Autuação, Multa e Arrecadação.** 2021f. Disponível em: <<https://dados.gov.br/dataset/autos-de-infracao-cargas>>. Acesso em: 13 dez. 2021.

_____. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Novos Projetos em Rodovias.** 2022. Disponível em: <<https://portal.antt.gov.br/novos-projetos-em-rodovias>>. Acesso em: 13 jan. 2022.

BREUNIG, M. M. et al. LOF: identifying density-based local outliers. **ACM SIGMOD Record**, v. 29, n. 2, p. 93–104, jun. 2000.

BRITO, L. A. T. et al. 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**, n. 18, p. 22–28, 2013.

BROWN, D. N.; AHLVIN, R. G. **Revised Method of Thickness Design for Flexible Highway Pavements at Military Installations.** Vicksburg: U.S. Army Corps of Engineers, 1961.

CANADÁ. **Heavy Truck Weight and Dimension Limits for Interprovincial Operations in Canada.** Ottawa: Council of Ministers Responsible for Transportation and Highway Safety, 2019.

ENGELKE, D. C. **Caracterização da frota rodante comercial nas rodovias federais brasileiras e o impacto dos carregamentos dos veículos.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Traffic Monitoring Guide.** Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2013.

_____. **Comprehensive Truck Size and Weight Study.** Washington, DC: US Department of Transportation, 2020.

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.** São Carlos:

Universidade de São Paulo, 2011.

GHOSN, M. et al. **Effects of Overweight Vehicles on NYSDOT Infrastructure**. New York: UTRC, 2015.

HAIDER, S. W. et al. Updating Traffic Inputs for Use in the Pavement Mechanistic-Empirical Design in Michigan. **Transportation Research Record**, v. 2673, n. 11, p. 13–28, 5 nov. 2019.

HARRAL, C. G. **Road Deterioration in Developing Countries: Causes and Remedies**. Washington, DC: The World Bank, 1988.

HASAN, M. A.; ISLAM, M. R.; TAREFDER, R. A. Clustering vehicle class distribution and axle load spectra for mechanistic-empirical predicting pavement performance. **Journal of Transportation Engineering**, v. 142, n. 11, p. 1–11, nov. 2016.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. 2nd. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004.

JACOB, B.; O'BRIEN, E.; JEHAES, S. **COST 323: Weigh-in-Motion of Road Vehicles**. Paris: Labpratoire Central des Ponts et Chaussées, 2002.

JASIM, A. F.; WANG, H.; BENNERT, T. Evaluation of Clustered Traffic Inputs for Mechanistic-Empirical Pavement Design: Case Study in New Jersey. **Research Article Transportation Research Record**, v. 2673, n. 11, p. 332–348, 2019.

KAWAKATSU, T. et al. Deep Sensing Approach to Single-Sensor Vehicle Weighing System on Bridges. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 1, p. 243–256, 1 jan. 2019.

MACEA, L. F.; MÁRQUEZ, L.; LLINÁS, H. Improvement of axle load spectra characterization by a mixture of three distributions. **Journal of Transportation Engineering**, v. 141, n. 12, p. 1–9, 2015.

MEDINA, J. DE; MOTTA, L. M. G. DA. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.

MERCOSUL. Grupo Mercado Comum. Resolução nº 65, de 28 de novembro de 2008. Acordo Sobre Pesos e Dimensões para Veículos de Transporte Rodoviário de Passageiros e Cargas. **Diário Oficial da União**, 2008.

MICROSOFT. **Excel specifications and limits**. 2022. Disponível em: <<https://support.microsoft.com/en-us/office/excel-specifications-and-limits-1672b34d-7043-467e-8e27-269d656771c3>>. Acesso em: 6 jan. 2022.

MOROVATDAR, A.; ASHTIANI, R. S. Evaluation of pavement service life reduction in overload corridors. **Advances in Materials and Pavement Performance Prediction II**, n. December, p. 211–214, 2020.

OTTO, G. G. et al. Pavement Instrumentation and WIM Data from a Test Track on the BR-101 Highway in South of Brazil. In: **Lecture Notes in Civil Engineering**. [s.l.] Springer, Cham, 2020. v. 96 LNCEp. 555–563.

PAIS, J. C. et al. The pavements cost due to traffic overloads. **International Journal of**

Pavement Engineering, v. 8436, p. 1–11, 2019.

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

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 1. ed. ed. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002.

ROMEIRO JÚNIOR, C. L. DOS S. et al. Impact on pavement deterioration due to overload vehicle regulation in Brazil. **Transportation Research Procedia**, v. 45, n. March, p. 842–849, 2020.

RYS, D. Consideration of dynamic loads in the determination of axle load spectra for pavement design. **Road Materials and Pavement Design**, v. 22, n. 6, p. 1309–1328, 3 jun. 2021.

RYS, D.; JUDYCKI, J.; JASKULA, P. Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 17, n. 8, p. 716–726, 13 set. 2016.

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

_____. Departamento de Estradas de Rodagem. **Classificação de Veículos**. 2021. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Documentos/ClassificacaoVeiculos.aspx>>. Acesso em: 19 dez. 2021.

SÃO PAULO (MUNICÍPIO). **IP – 02/2004 CLASSIFICAÇÃO DAS VIAS**. São Paulo: Prefeitura de São Paulo, 2004.

SOUZA, M. L. DE. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3. ed. ed. Rio de Janeiro: IPR, 1981.

SUJON, M.; DAI, F. Application of weigh-in-motion technologies for pavement and bridge response monitoring: State-of-the-art review. **Automation in Construction**, v. 130, p. 103844, out. 2021.

TAHA EI, N. et al. Machine learning of Truck Traffic Classification groups from Weigh-in-Motion data. **Machine Learning with Applications**, v. 6, p. 100178, 2021.

THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **COUNCIL DIRECTIVE 96/53/EC of 25 July 1996 laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorized dimensions in national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic**, 1996.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Highway Capacity Manual**. 5th. ed. Washington, DC: Transportation Research Board, 2010. v. 2

VALLEJO, F. M. L. **Impactos do excesso de carga nos pavimentos rodoviários: uma abordagem probabilística na determinação do fator de veículo**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2021.

WANG, K. C. P. et al. Development of Truck Loading Groups for the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. 2011.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. 2nd. ed. New York: Wiley-Interscience, 1975.

**APÊNDICE A – LISTA DAS CLASSES CONTIDAS NO QUADRO DE
FABRICANTES DE VEÍCULOS DE 2021**

ID	Classe	G1_tipo	G2_tipo	G3_tipo	G4_tipo	G5_tipo	G6_tipo	G7_tipo	PBT_lim	PBT (<16m)	Eixos	Grupos	G1_lim	G2_lim	G3_lim	G4_lim	G5_lim	G6_lim	G7_lim
1	2CC	ESRS	ESRS						12.000		2	2	6.000	6.000					
2	2C	ESRS	ESRD						16.000		2	2	6.000	10.000					
3	3C	ESRS	ETD						23.000		3	2	6.000	17.000					
4	3CD	ESRS	EM						19.500		3	2	6.000	13.500					
5	3DC	ESRS	EM						19.500		3	2	6.000	13.500					
6	4C	ESRS	ETT						31.500		4	2	6.000	25.500					
7	4CD	EDD	ETD						29.000		4	2	12.000	17.000					
8	4DD	EDD	EM						25.500		4	2	12.000	13.500					
9	4DC	EDD	EM						25.500		4	2	12.000	13.500					
10	2S1	ESRS	ESRD	ESRD					26.000		3	3	6.000	10.000	10.000				
11	2S2	ESRS	ESRD	ETD					33.000		4	3	6.000	10.000	17.000				
12	2I2	ESRS	ESRD	ESRD	ESRD				36.000		4	4	6.000	10.000	10.000	10.000			
13	2S3	ESRS	ESRD	ETT					41.500		5	3	6.000	10.000	25.500				
14	2I1	ESRS	ESRD	ESRD	ETD				43.000		5	4	6.000	10.000	10.000	17.000			
16	2I3	ESRS	ESRD	ESRD	ESRD	ESRD			46.000	45.000	5	5	6.000	10.000	10.000	10.000	10.000		
17	3S1	ESRS	ETD	ESRD					33.000		4	3	6.000	17.000	10.000				
18	3I2	ESRS	ETD	ESRD	ESRD				43.000		5	4	6.000	17.000	10.000	10.000			
19	3D2	ESRS	EM	ESRD	ESRD				39.500		5	4	6.000	13.500	10.000	10.000			
21	3S3	ESRS	ETD	ETT					48.500	45.000	6	3	6.000	17.000	25.500				
22	3D3	ESRS	EM	ETT					45.000		6	3	6.000	13.500	25.500				
24	3I1	ESRS	ETD	ESRD	ETD				50.000	45.000	6	4	6.000	17.000	10.000	17.000			
26	3DI	ESRS	EM	ESRD	ETD				46.500	45.000	6	4	6.000	13.500	10.000	17.000			
28	3I3	ESRS	ETD	ESRD	ESRD	ESRD			53.000	45.000	6	5	6.000	17.000	10.000	10.000	10.000		
30	3ID	ESRS	EM	ESRD	ESRD	ESRD			49.500	45.000	6	5	6.000	13.500	10.000	10.000	10.000		
31	3D1	ESRS	EM	ESRD					29.500		4	3	6.000	13.500	10.000				
32	32D	ESRS	EM	ETD					36.500		5	3	6.000	13.500	17.000				
33	3S2	ESRS	ETD	ETD					40.000		5	3	6.000	17.000	17.000				
35	4DI	EDD	EM	ESRD	ETD				52.500	45.000	7	4	12.000	13.500	10.000	17.000			

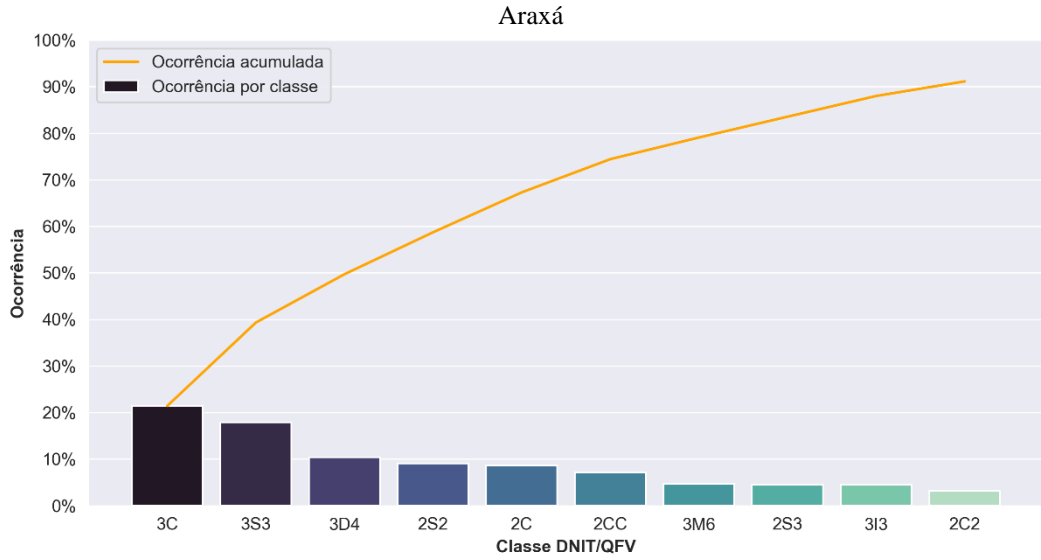
ID	Classe	G1_tipo	G2_tipo	G3_tipo	G4_tipo	G5_tipo	G6_tipo	G7_tipo	PBT_lim	PBT (<16m)	Eixos	Grupos	G1_lim	G2_lim	G3_lim	G4_lim	G5_lim	G6_lim	G7_lim
37	4D3	EDD	EM	ETT					51.000	45.000	7	3	12.000	13.500	25.500				
38	41C	EDD	ETD	ESRD					39.000		5	3	12.000	17.000	10.000				
39	4D1	EDD	EM	ESRD					35.500		5	3	12.000	13.500	10.000				
41	42C	EDD	ETD	ETD					46.000	45.000	6	3	12.000	17.000	17.000				
42	4D2	EDD	EM	ETD					42.500		6	3	12.000	13.500	17.000				
44	4I2	EDD	ETD	ESRD	ESRD				49.000	45.000	6	4	12.000	17.000	10.000	10.000			
46	4ID	EDD	EM	ESRD	ESRD				45.500	45.000	6	4	12.000	13.500	10.000	10.000			
47	2C2	ESRS	ESRD	ESRD	ESRD				36.000		4	4	6.000	10.000	10.000	10.000			
48	2C3	ESRS	ESRD	ESRD	ETD				43.000		5	4	6.000	10.000	10.000	17.000			
50	2R4	ESRS	ESRD	ETD	ETD				50.000	45.000	6	4	6.000	10.000	17.000	17.000			
51	3C2	ESRS	ETD	ESRD	ESRD				43.000		5	4	6.000	17.000	10.000	10.000			
53	3C3	ESRS	ETD	ESRD	ETD				50.000	45.000	6	4	6.000	17.000	10.000	17.000			
55	3D4	ESRS	ETD	ETD	ETD				57.000	45.000	7	4	6.000	17.000	17.000	17.000			
56	3DD	ESRS	EM	ESRD	ESRD				39.500		5	4	6.000	13.500	10.000	10.000			
58	33D	ESRS	EM	ESRD	ETD				46.500	45.000	6	4	6.000	13.500	10.000	17.000			
60	34D	ESRS	EM	ETD	ETD				53.500	45.000	7	4	6.000	13.500	17.000	17.000			
62	4R2	EDD	ETD	ESRD	ESRD				49.000	45.000	6	4	12.000	17.000	10.000	10.000			
64	4R3	EDD	ETD	ESRD	ETD				56.000	45.000	7	4	12.000	17.000	10.000	17.000			
66	42D	EDD	EM	ESRD	ESRD				45.500	45.000	6	4	12.000	13.500	10.000	10.000			
68	43D	EDD	EM	ESRD	ETD				52.500	45.000	7	4	12.000	13.500	10.000	17.000			
70	2N3	ESRS	ESRD	ESRD	ESRD	ESRD			46.000	45.000	5	5	6.000	10.000	10.000	10.000	10.000		
72	2N4	ESRS	ESRD	ETD	ESRD	ESRD			53.000	45.000	6	5	6.000	10.000	17.000	10.000	10.000		
74	2J4	ESRS	ESRD	ESRD	ESRD	ETD			53.000	45.000	6	5	6.000	10.000	10.000	10.000	17.000		
76	2L4	ESRS	ESRD	ESRD	ETD	ESRD			53.000	45.000	6	5	6.000	10.000	10.000	17.000	10.000		
78	3N3	ESRS	ETD	ESRD	ESRD	ESRD			53.000	45.000	6	5	6.000	17.000	10.000	10.000	10.000		
80	3DN	ESRS	EM	ESRD	ESRD	ESRD			49.500	45.000	6	5	6.000	13.500	10.000	10.000	10.000		
82	3IJ	ESRS	EM	ESRD	ESRD	ETD			56.500	45.000	7	5	6.000	13.500	10.000	10.000	17.000		
84	3ND	ESRS	EM	ETD	ESRD	ESRD			56.500	45.000	7	5	6.000	13.500	17.000	10.000	10.000		

ID	Classe	G1_tipo	G2_tipo	G3_tipo	G4_tipo	G5_tipo	G6_tipo	G7_tipo	PBT_lim	PBT (<16m)	Eixos	Grupos	G1_lim	G2_lim	G3_lim	G4_lim	G5_lim	G6_lim	G7_lim
85	2DL	ESRS	ESRD	ESRD	ESRD				36.000		4	4	6.000	10.000	10.000	10.000			
86	3DL	ESRS	ETD	ESRD	ESRD				43.000		5	4	6.000	17.000	10.000	10.000			
87	3DJ	ESRS	EM	ESRD	ESRD				39.500		5	4	6.000	13.500	10.000	10.000			
88	2LD	ESRS	ESRD	ETD	ESRD				43.000		5	4	6.000	10.000	17.000	10.000			
89	2JD	ESRS	ESRD	ESRD	ETD				43.000		5	4	6.000	10.000	10.000	17.000			
91	3JD	ESRS	ETD	ESRD	ETD				50.000	45.000	6	4	6.000	17.000	10.000	17.000			
93	3LD	ESRS	ETD	ETD	ESRD				50.000	45.000	6	4	6.000	17.000	17.000	10.000			
95	3DT	ESRS	EM	ETD	ESRD				46.500	45.000	6	4	6.000	13.500	17.000	10.000			
97	2D4	ESRS	ESRD	ETD	ETD				50.000	45.000	6	4	6.000	10.000	17.000	17.000			
99	3T4	ESRS	ETD	ETD	ETD				57.000	45.000	7	4	6.000	17.000	17.000	17.000			
101	3TD	ESRS	EM	ETD	ETD				53.500	45.000	7	4	6.000	13.500	17.000	17.000			
103	4DS	EDD	ESRD	ETT					47.500	45.000	6	3	12.000	10.000	25.500				
105	4DT	EDD	ETD	ETT					54.500	45.000	7	3	12.000	17.000	25.500				
106	3N4	ESRS	ETD	ETD	ESRD	ESRD			60.000		7	5	6.000	17.000	17.000	10.000	10.000		
107	3J5	ESRS	ETD	ETD	ESRD	ETD			67.000		8	5	6.000	17.000	17.000	10.000	17.000		
108	3T6	ESRS	ETD	ETD	ETD	ETD			74.000		9	5	6.000	17.000	17.000	17.000	17.000		
109	4D4	EDD	ETD	ETD	ESRD	ESRD			66.000		8	5	12.000	17.000	17.000	10.000	10.000		
110	4D5	EDD	ETD	ETD	ESRD	ETD			73.000		9	5	12.000	17.000	17.000	10.000	17.000		
111	3V5	ESRS	ETD	ETT	ETD				65.500		8	4	6.000	17.000	25.500	17.000			
112	3P5	ESRS	ETD	ETD	ETT				65.500		8	4	6.000	17.000	17.000	25.500			
113	3M6	ESRS	ETD	ETT	ETT				74.000		9	4	6.000	17.000	25.500	25.500			
114	44D	EDD	ETD	ETD	ETD				63.000		8	4	12.000	17.000	17.000	17.000			
115	3Q4	ESRS	ETD	ESRD	ESRD	ESRD	ESRD		63.000		7	6	6.000	17.000	10.000	10.000	10.000	10.000	
116	3M5	ESRS	ETD	ESRD	ETD	ESRD	ESRD		70.000		8	6	6.000	17.000	10.000	17.000	10.000	10.000	
117	4R4	EDD	ETD	ESRD	ESRD	ESRD	ESRD		69.000		8	6	12.000	17.000	10.000	10.000	10.000	10.000	
118	3Q6	ESRS	ETD	ETT	ETT				74.000		9	4	6.000	17.000	25.500	25.500			
119	3QD	ESRS	ETD	ETD	ESRD	ESRD			60.000		7	5	6.000	17.000	17.000	10.000	10.000		
120	3DQ	ESRS	ETD	ESRD	ETD	ESRD			60.000		7	5	6.000	17.000	10.000	17.000	10.000		
121	3SD	ESRS	ETD	ESRD	ESRD	ETD			60.000		7	5	6.000	17.000	10.000	10.000	17.000		

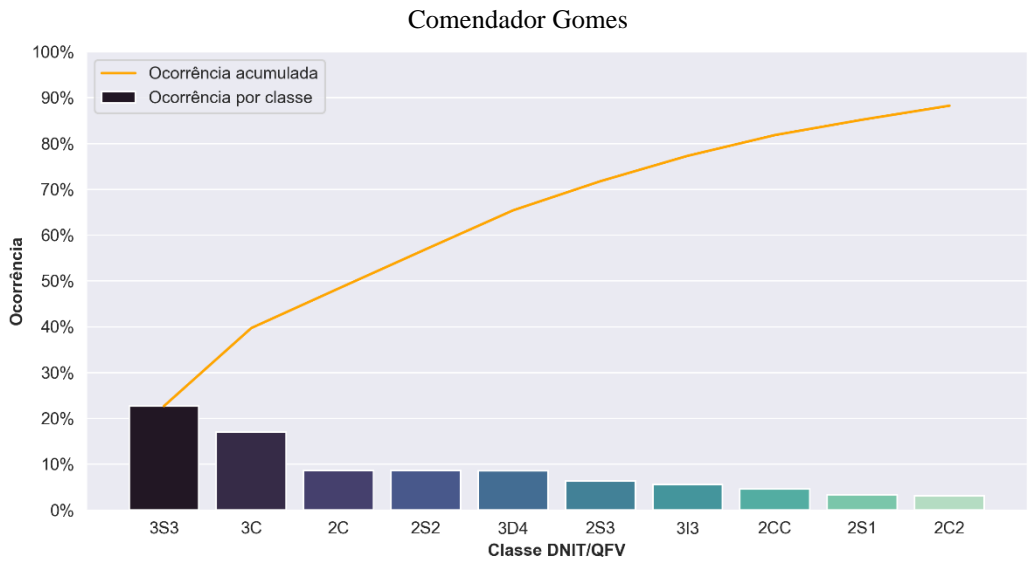
ID	Classe	G1_tipo	G2_tipo	G3_tipo	G4_tipo	G5_tipo	G6_tipo	G7_tipo	PBT_lim	PBT (<16m)	Eixos	Grupos	G1_lim	G2_lim	G3_lim	G4_lim	G5_lim	G6_lim	G7_lim
122	3D5	ESRS	ETD	ETD	ETD	ESRD			67.000		8	5	6.000	17.000	17.000	17.000	10.000		
123	3DS	ESRS	ETD	ETD	ESRD	ETD			67.000		8	5	6.000	17.000	17.000	10.000	17.000		
124	35D	ESRS	ETD	ESRD	ETD	ETD			67.000		8	5	6.000	17.000	10.000	17.000	17.000		
125	3R6	ESRS	ETD	ETD	ETD	ETD			74.000		9	5	6.000	17.000	17.000	17.000	17.000		
126	3D6	ESRS	ETD	ESRD	ESRD	ETD	ESRD	ESRD	80.000		9	7	6.000	17.000	10.000	10.000	17.000	10.000	10.000
127	2BC	ESRS	ESRS						12.000		2	2	6.000	6.000					
128	2CB	ESRS	ESRD						16.000		2	2	6.000	10.000					
129	3BC	ESRS	ETD						23.000		3	2	6.000	17.000					
130	3CB	ESRS	EM						19.500		3	2	6.000	13.500					
131	3BB	ESRS	EM						19.500		3	2	6.000	13.500					
132	3DB	EDD	ESRD						22.000		3	2	12.000	10.000					
133	4DB	EDD	ETD						29.000		4	2	12.000	17.000					
134	4CB	EDD	EM						25.500		4	2	12.000	13.500					
135	4BD	EDD	EM						25.500		4	2	12.000	13.500					
136	2B1	ESRS	ESRD	ESRD					26.000		3	3	6.000	10.000	10.000				
137	3B1	ESRS	ETD	ESRD					33.000		4	3	6.000	17.000	10.000				
138	3BD	ESRS	EM	ESRD					29.500		4	3	6.000	13.500	10.000				
139	31B	ESRS	EM	ESRD					29.500		4	3	6.000	13.500	10.000				
140	2B2	ESRS	ESRS	ETD					29.000		4	3	6.000	6.000	17.000				
141	2BD	ESRS	ESRD	EM					29.500		4	3	6.000	10.000	13.500				
142	2DB	ESRS	ESRD	EM					29.500		4	3	6.000	10.000	13.500				
143	2B1	ESRS	ESRD	ESRD	ESRD				36.000		4	4	6.000	10.000	10.000	10.000			
144	31B	ESRS	EM	ESRD	ESRD				39.500		5	4	6.000	13.500	10.000	10.000			
145	3B1	ESRS	EM	ESRD	ESRD				39.500		5	4	6.000	13.500	10.000	10.000			
146	2RB	ESRS	ESRD	ESRD	ESRD				36.000		4	4	6.000	10.000	10.000	10.000			
147	3RB	ESRS	EM	ESRD	ESRD				39.500		5	4	6.000	13.500	10.000	10.000			
148	3BR	ESRS	EM	ESRD	ESRD				39.500		5	4	6.000	13.500	10.000	10.000			
149	2BR	ESRS	ESRD	ESRS	ESRD				32.000		4	4	6.000	10.000	6.000	10.000			
150	B3R	ESRS	EM	ESRS	ESRD				35.500		5	4	6.000	13.500	6.000	10.000			
151	BR3	ESRS	EM	ESRS	ESRD				35.500		5	4	6.000	13.500	6.000	10.000			

ID	Classe	G1_tipo	G2_tipo	G3_tipo	G4_tipo	G5_tipo	G6_tipo	G7_tipo	PBT_lim	PBT (<16m)	Eixos	Grupos	G1_lim	G2_lim	G3_lim	G4_lim	G5_lim	G6_lim	G7_lim
152	B3I	ESRS	ETD	ESRD	ESRD				43.000		5	4	6.000	17.000	10.000	10.000			
153	2BB	ESRS	ESRD	ESRD	ESRD				36.000		4	4	6.000	10.000	10.000	10.000			
154	32B	ESRS	ETD	ESRD	ESRD				43.000		5	4	6.000	17.000	10.000	10.000			
155	3B2	ESRS	EM	ESRD	ESRD				39.500		5	4	6.000	13.500	10.000	10.000			
156	BI3	ESRS	EM	ESRD	ESRD				39.500		5	4	6.000	13.500	10.000	10.000			

APÊNDICE B – CLASSES DNIT MAIS COMUNS



(fonte: elaborado pelo autor)

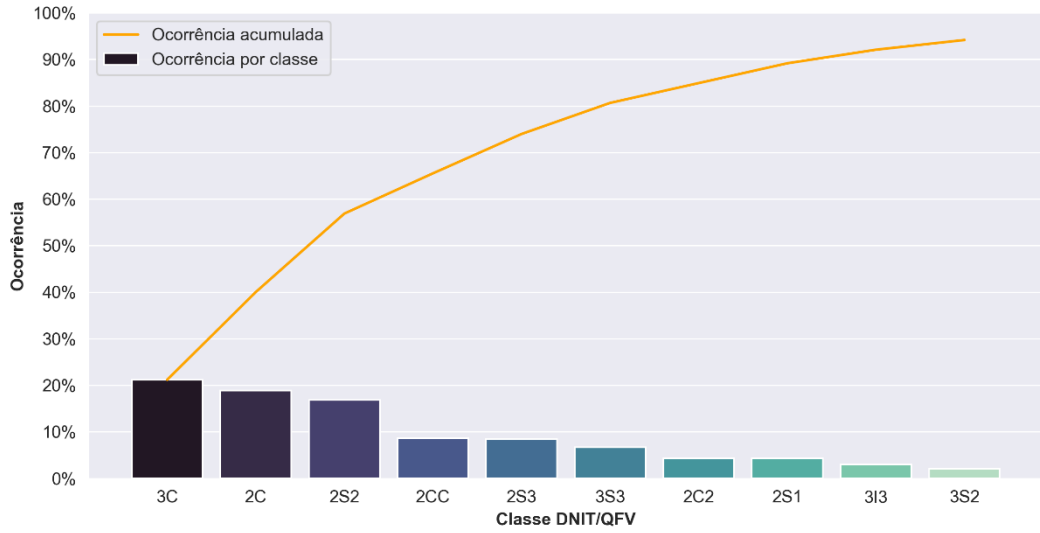


(fonte: elaborado pelo autor)



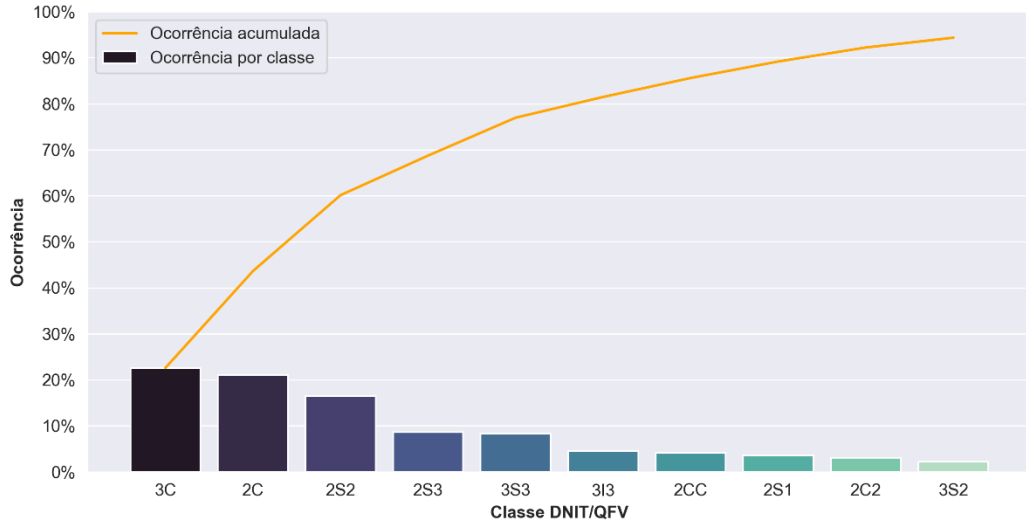
(fonte: elaborado pelo autor)

Paracambi



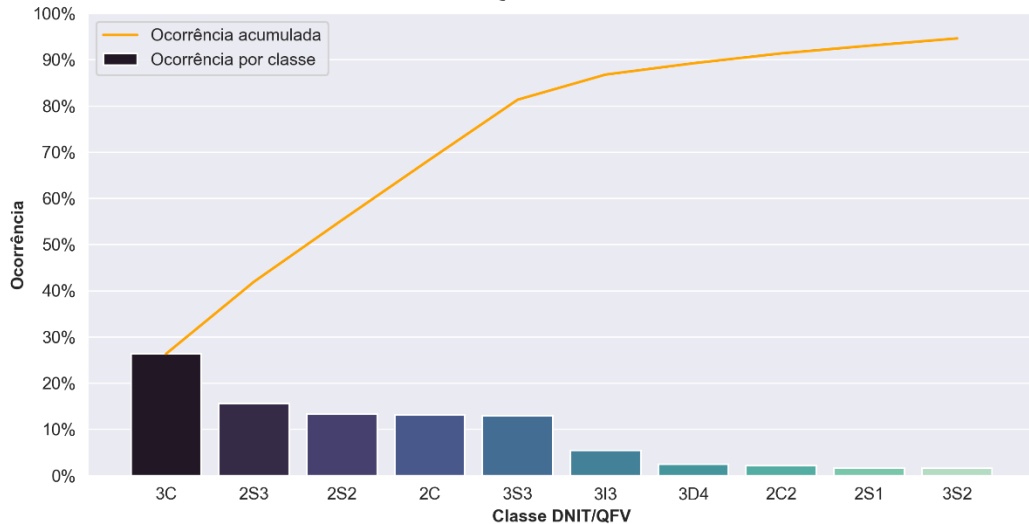
(fonte: elaborado pelo autor)

Resende



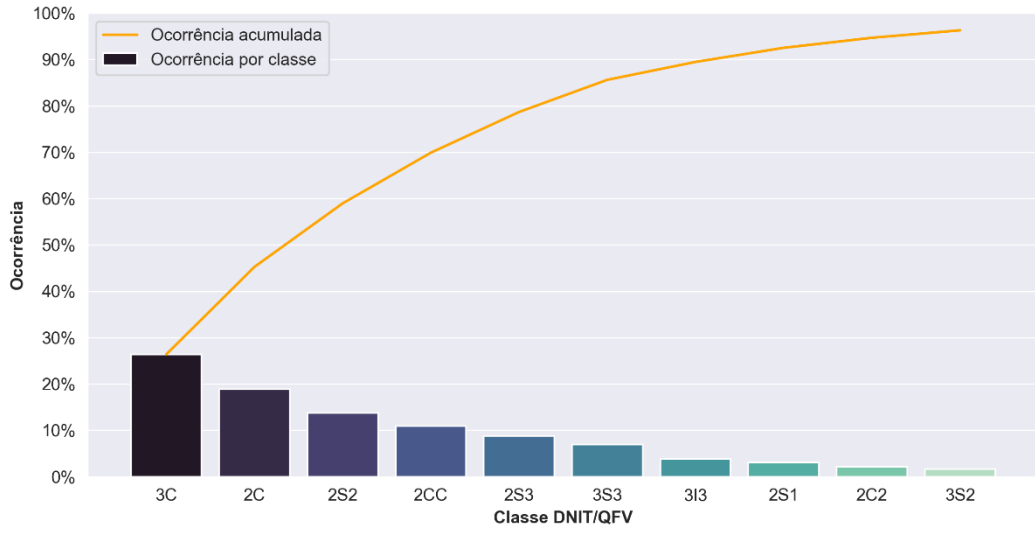
(fonte: elaborado pelo autor)

Queluz



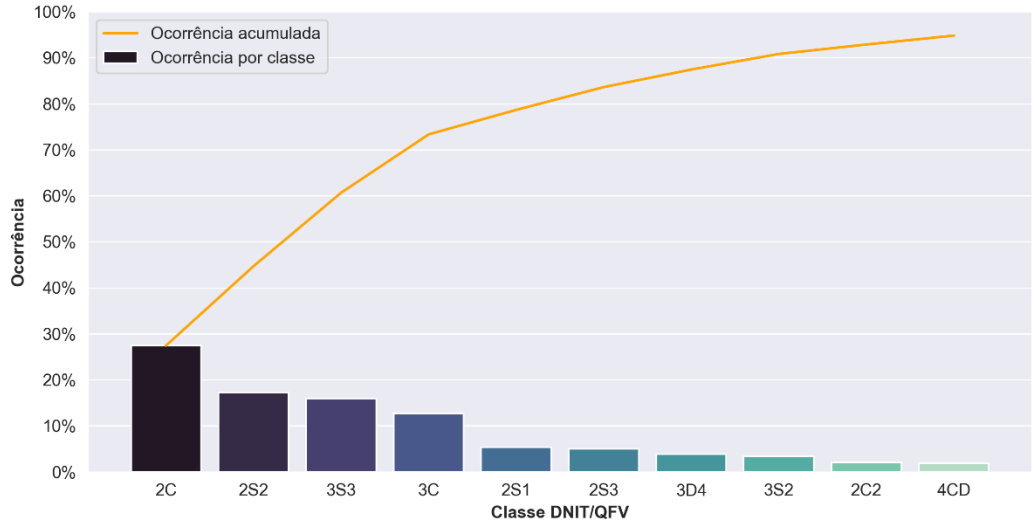
(fonte: elaborado pelo autor)

Guararema



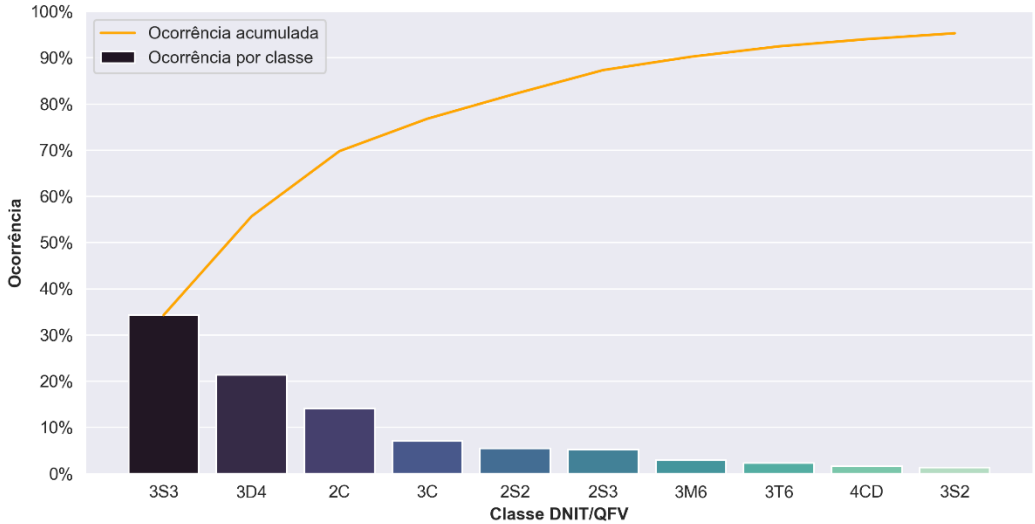
(fonte: elaborado pelo autor)

Retiro



(fonte: elaborado pelo autor)

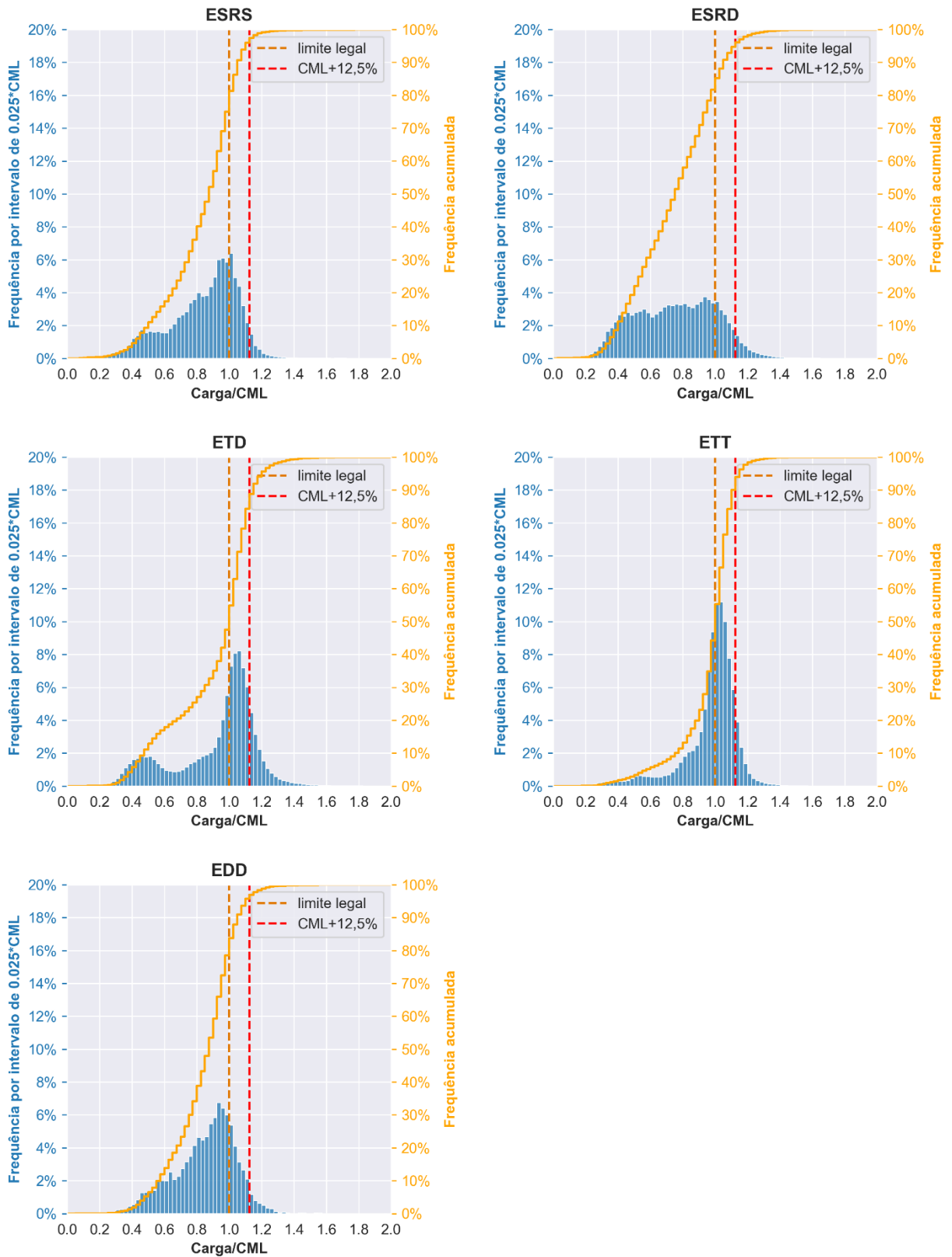
Capão Seco



(fonte: elaborado pelo autor)

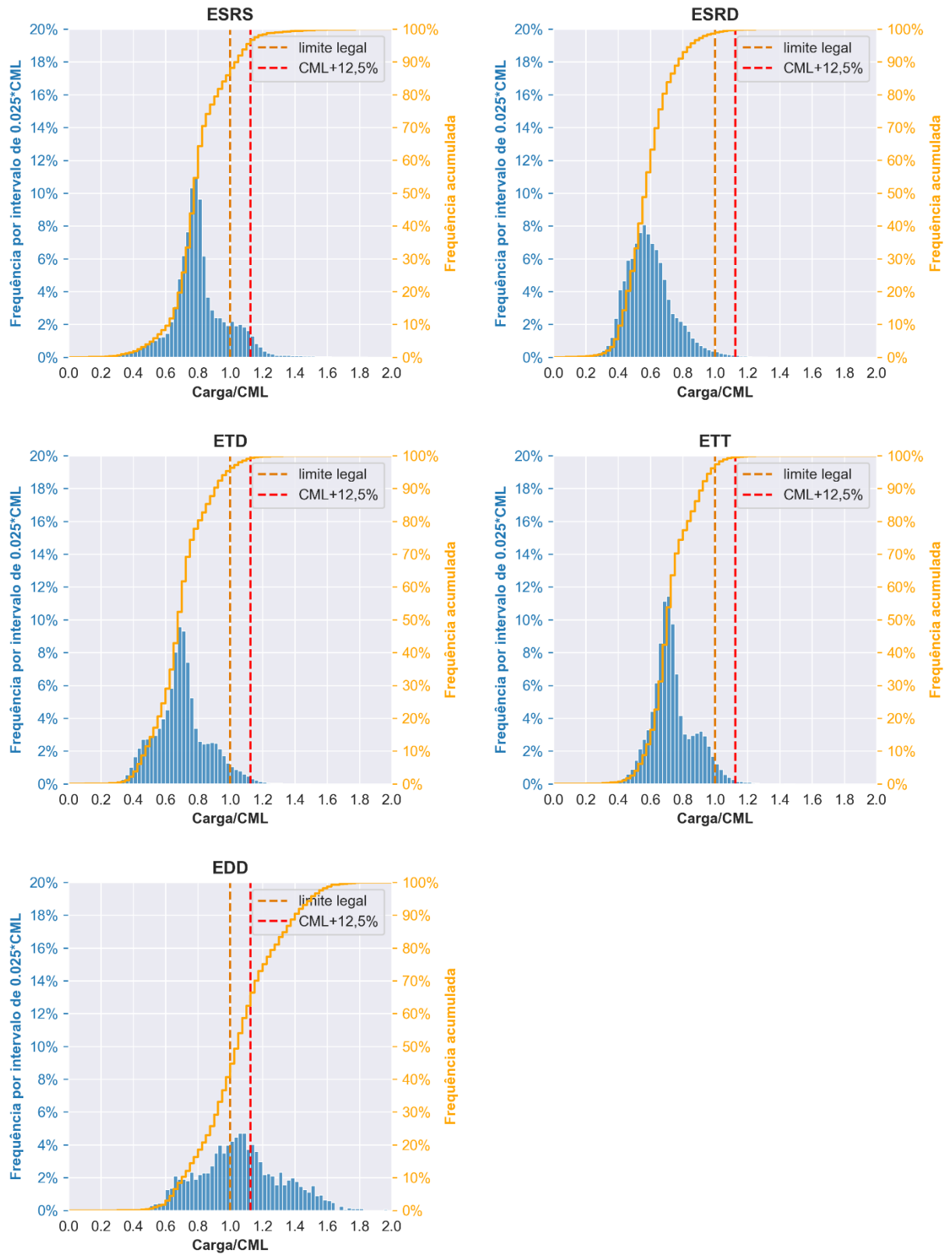
APÊNDICE C – ESPECTROS DE CARGAS POR EIXO

C.1 ESPECTROS DE CARGA DE ARAXÁ | BR-389/MG



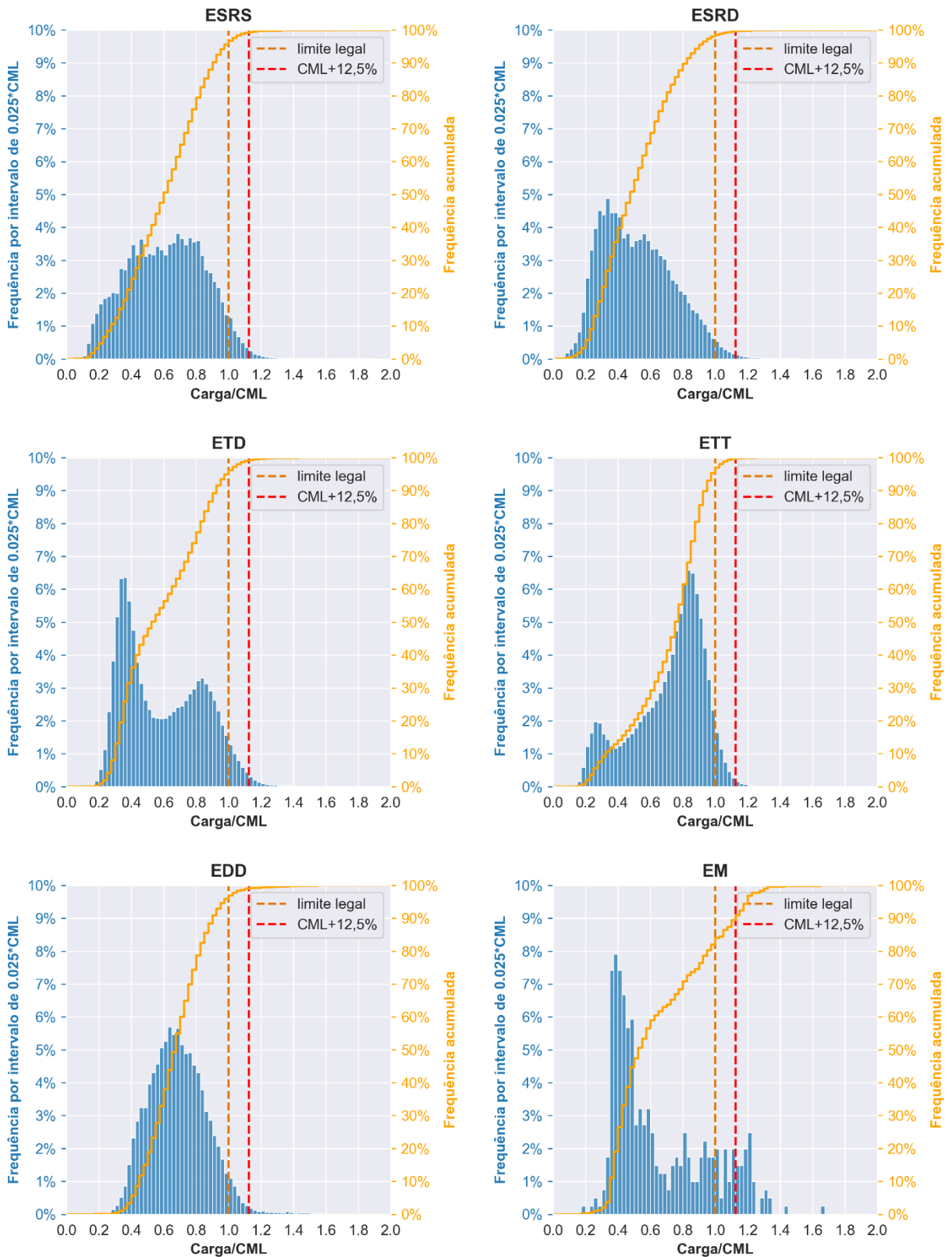
(fonte: elaborado pelo autor)

C.2 ESPECTROS DE CARGA DE COMENDADOR GOMES | BR-153/MG



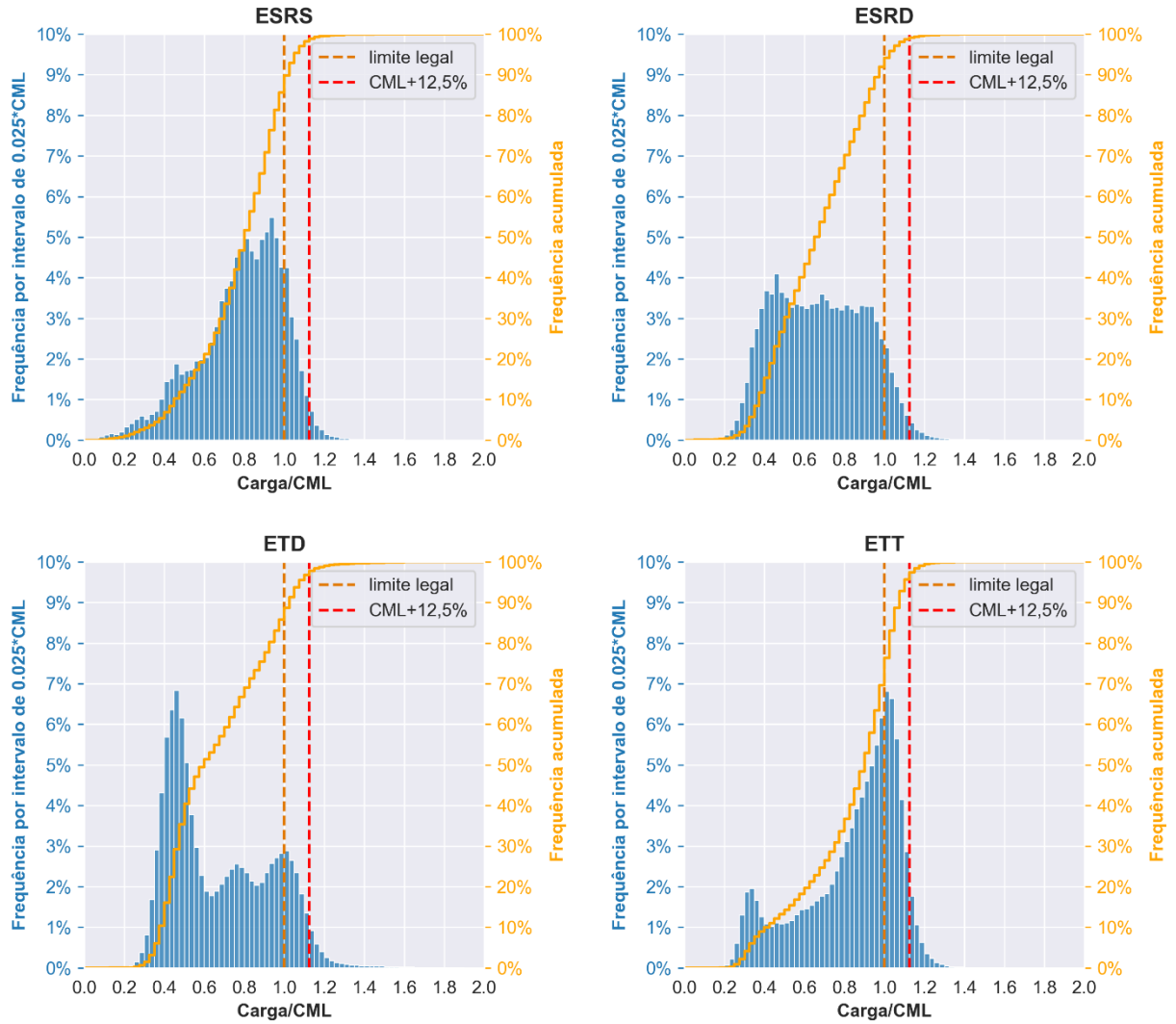
(fonte: elaborado pelo autor)

C.3 ESPECTROS DE CARGA DE MAGÉ | BR-116/RJ



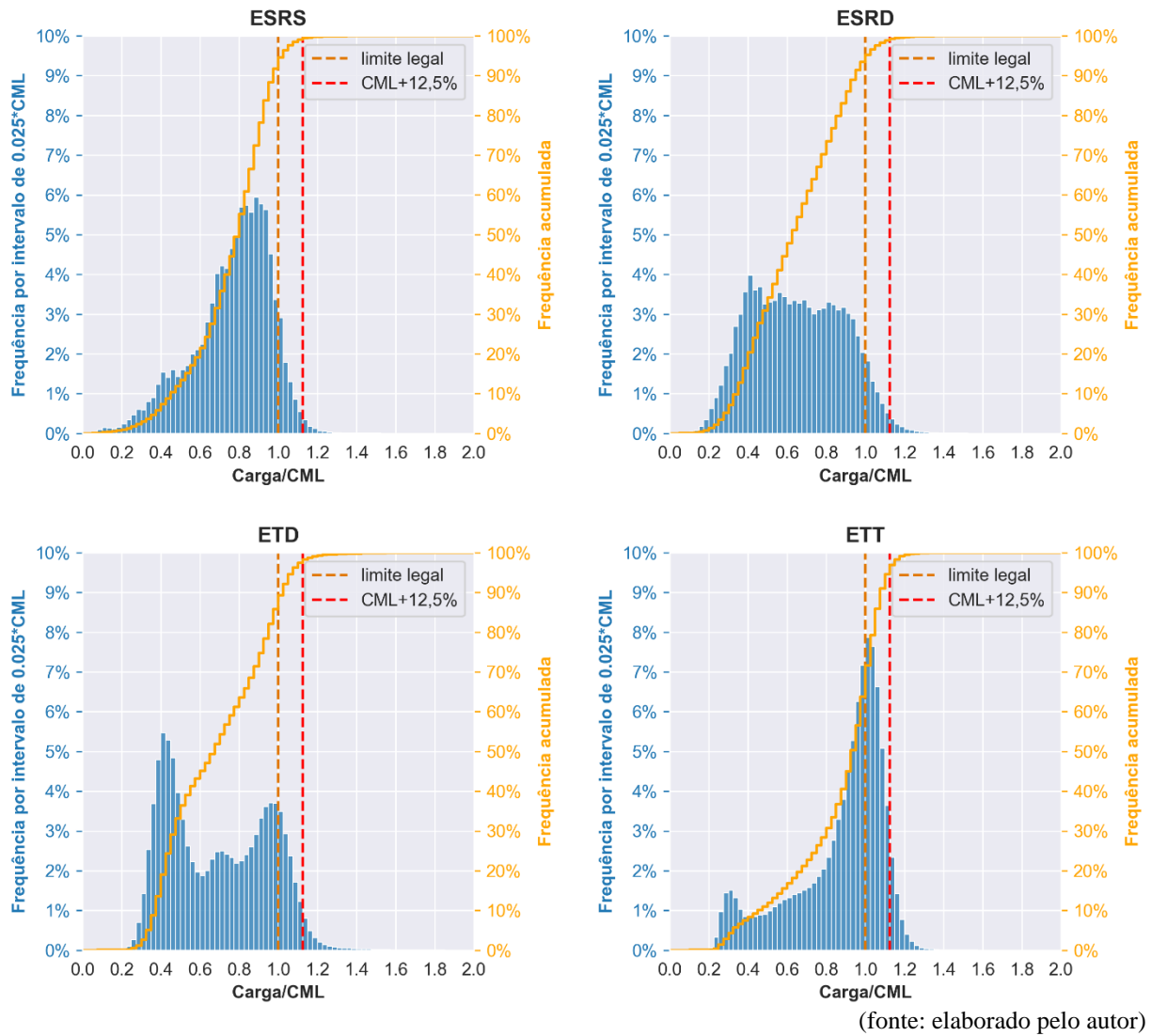
(fonte: elaborado pelo autor)

C.4 ESPECTROS DE CARGA DE PARACAMBI | BR-116/RJ

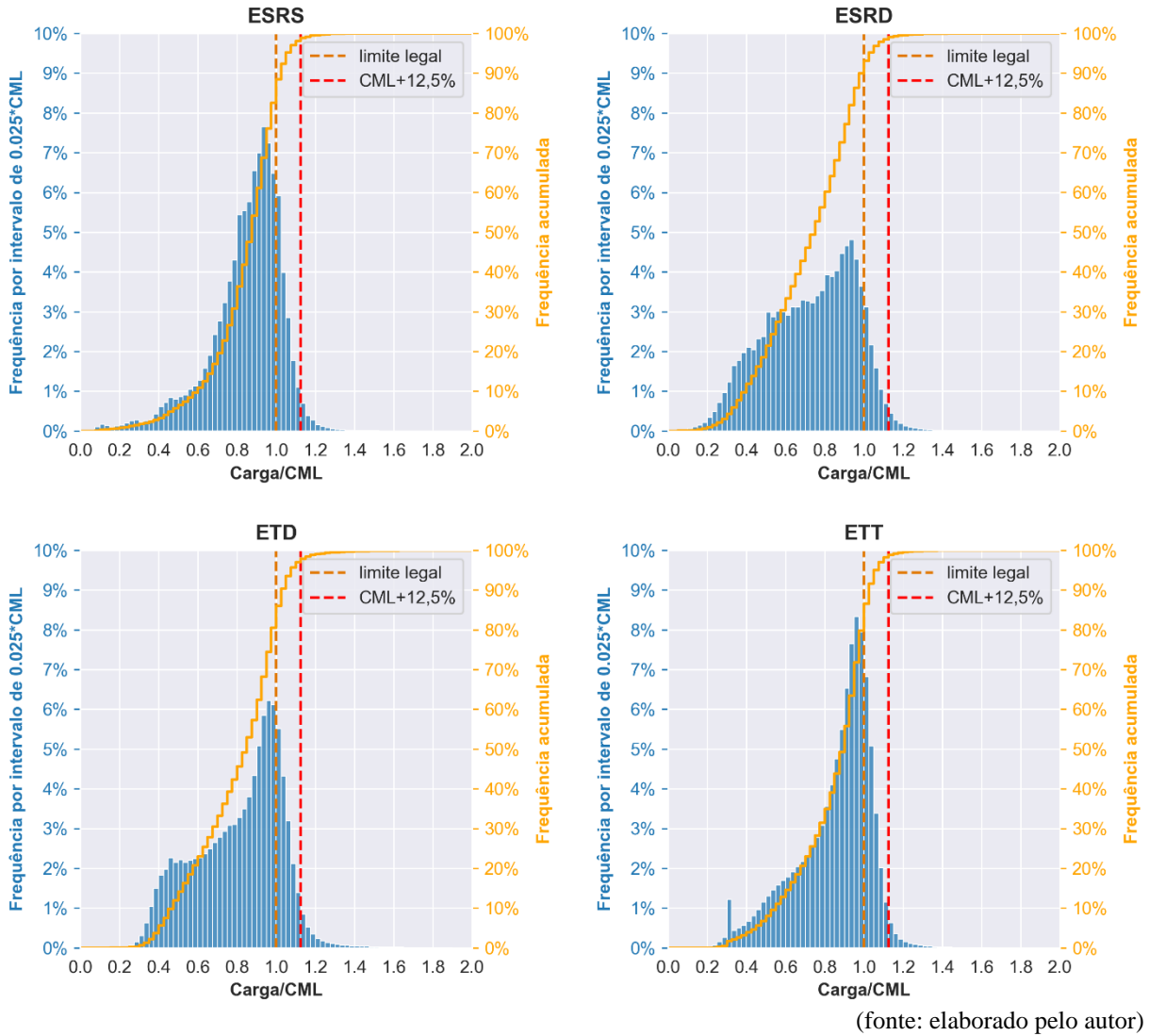


(fonte: elaborado pelo autor)

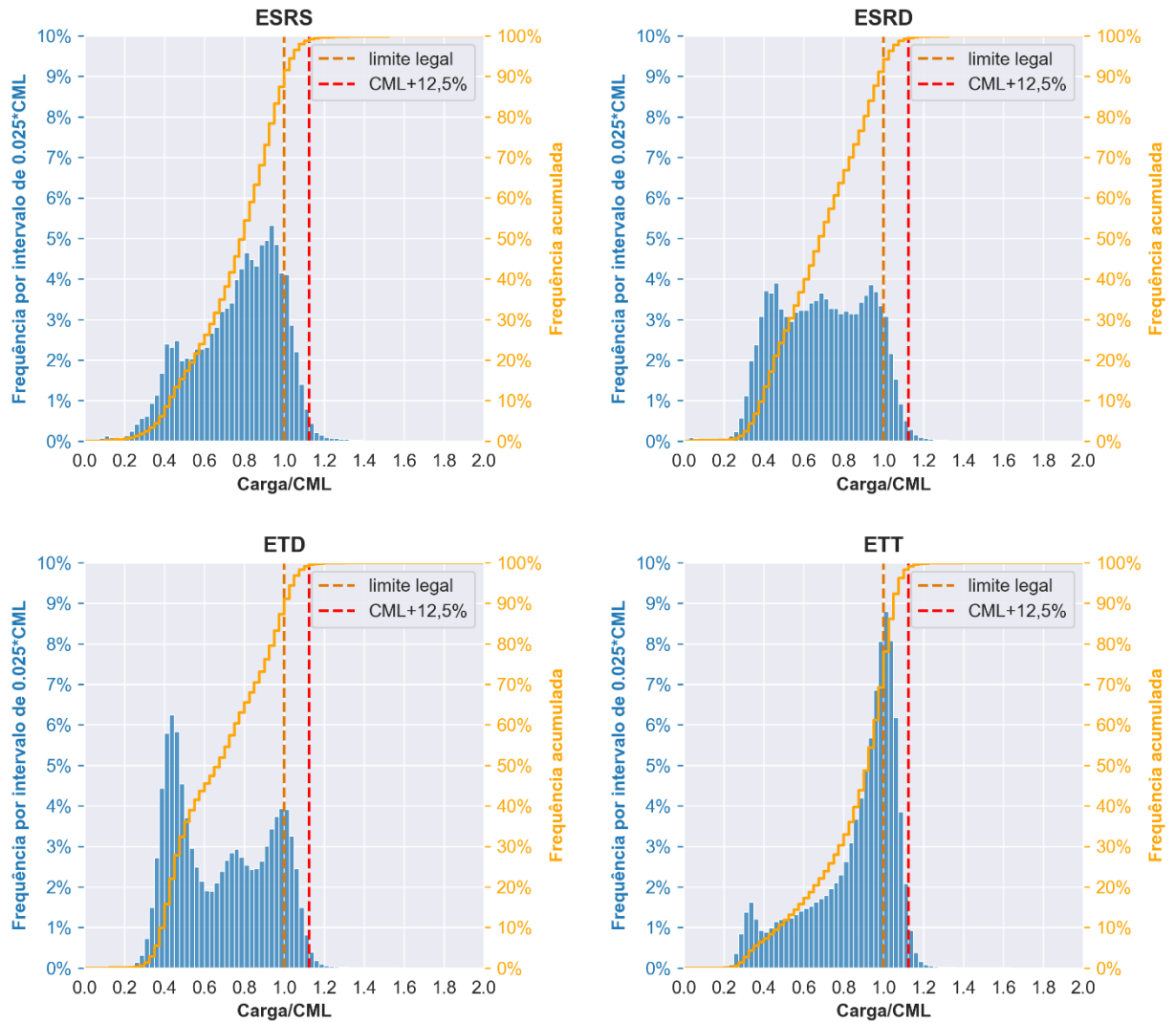
C.5 ESPECTROS DE CARGA DE RESENDE | BR-116/RJ



C.6 ESPECTROS DE CARGA DE QUELUZ | BR-116/SP

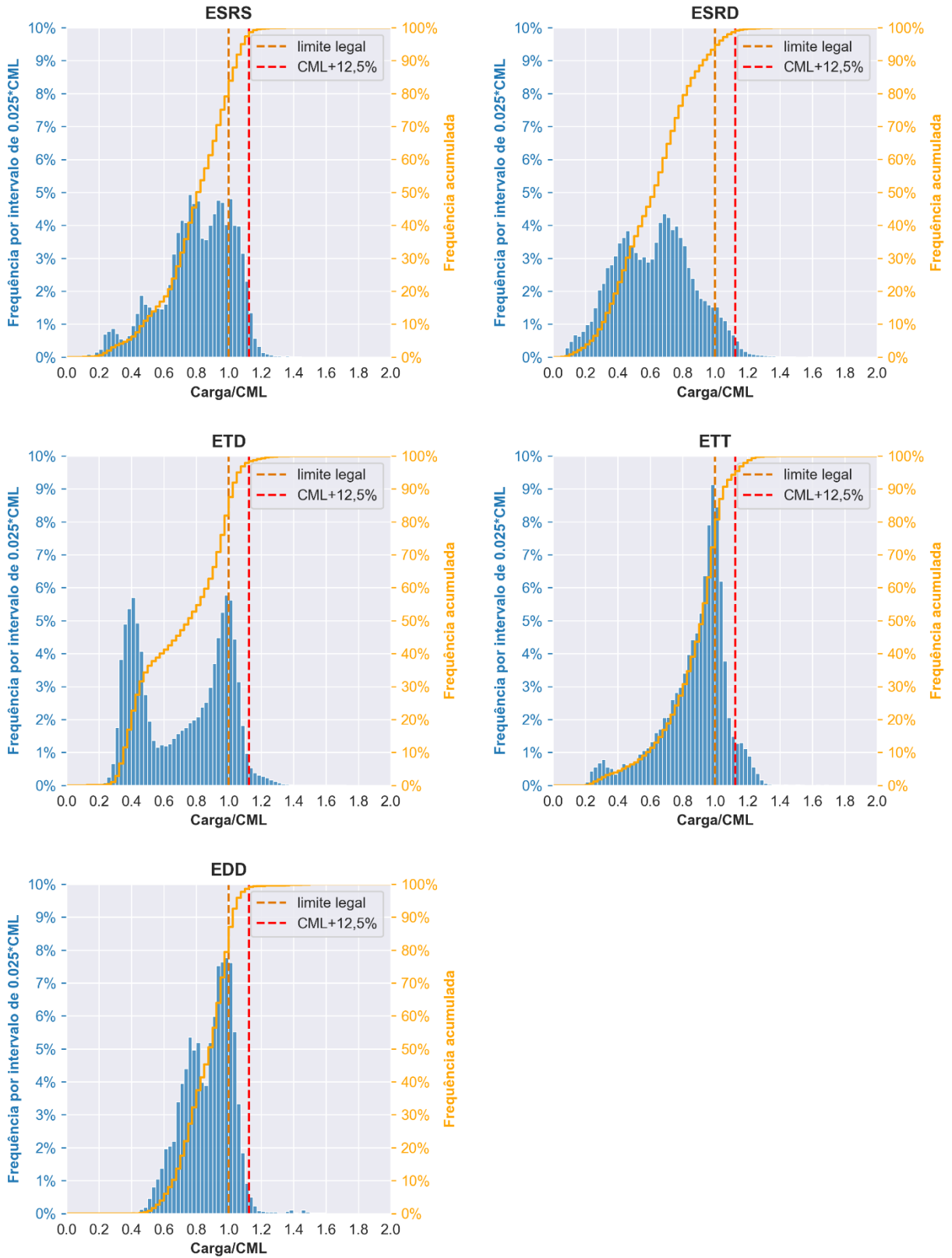


C.7 ESPECTROS DE CARGA DE GUARAREMA | BR-116/SP



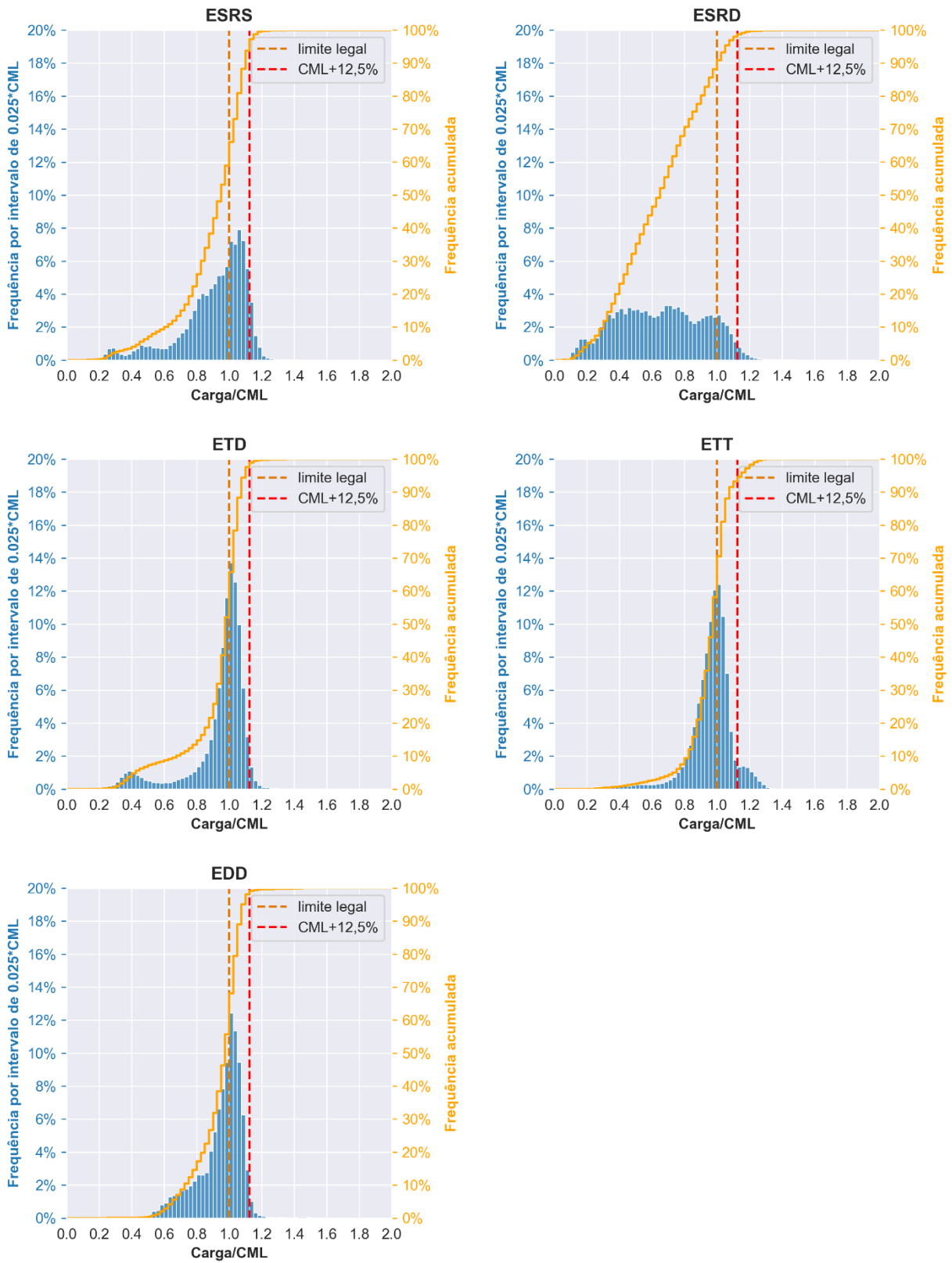
(fonte: elaborado pelo autor)

C.8 ESPECTROS DE CARGA DE RETIRO | BR-116/RS



(fonte: elaborado pelo autor)

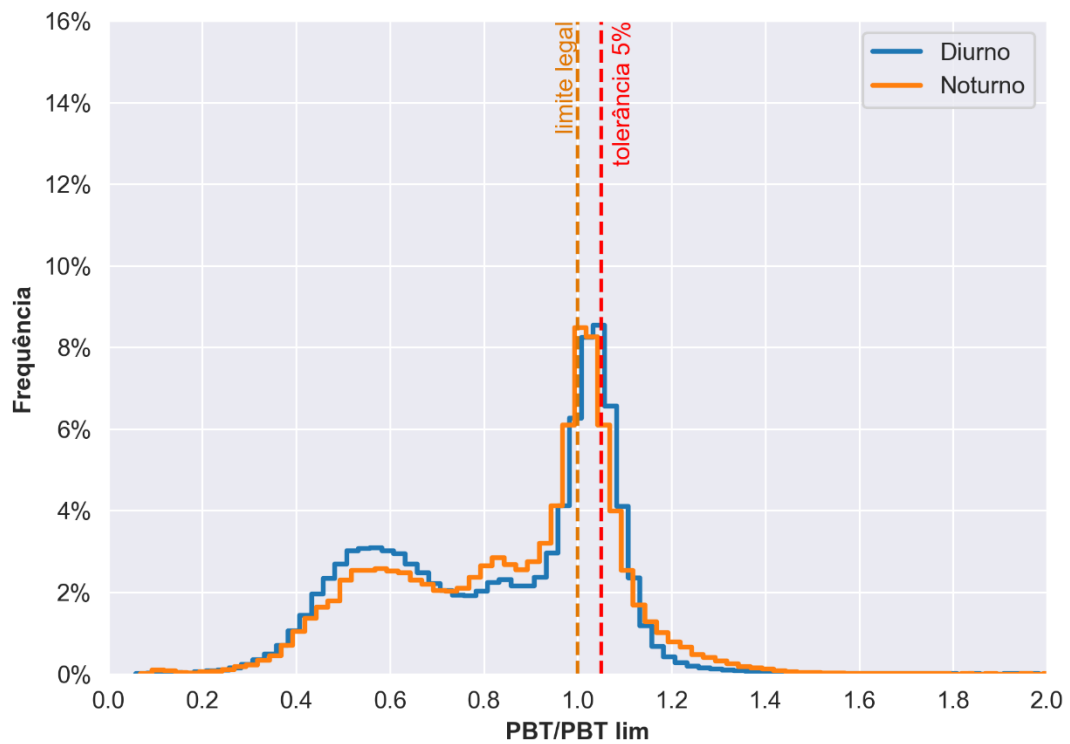
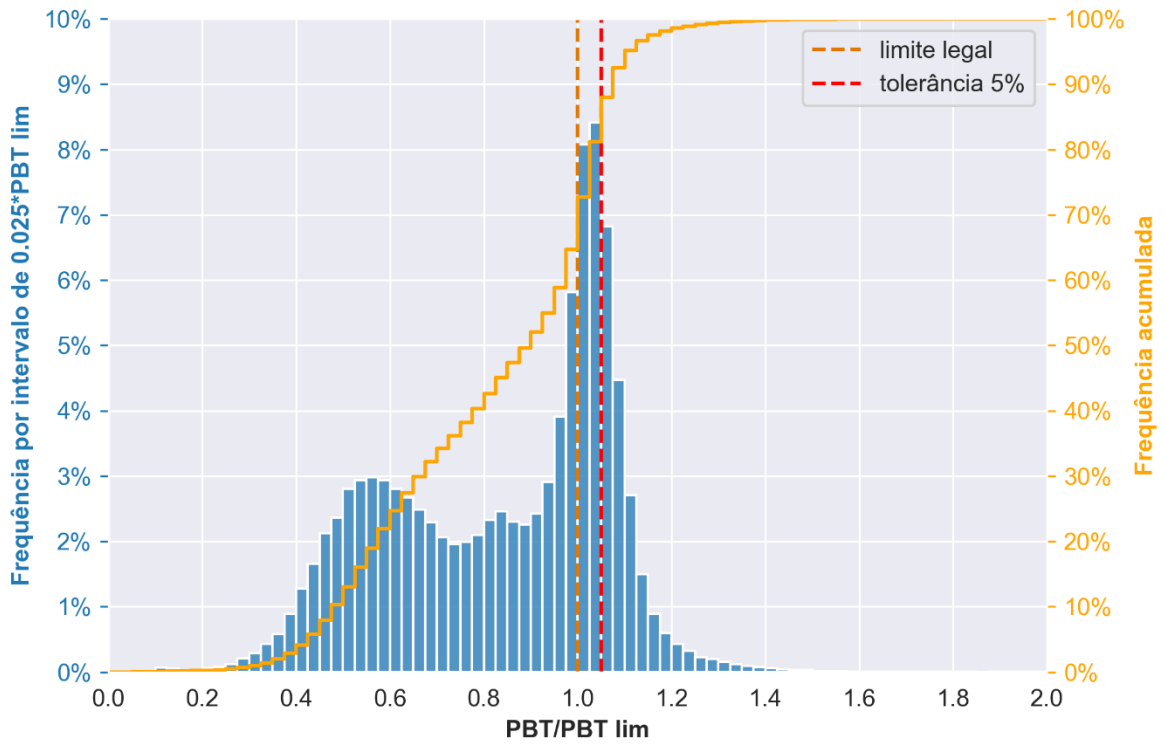
C.9 ESPECTROS DE CARGA DE CAPÃO SECO | BR-392/RS



(fonte: elaborado pelo autor)

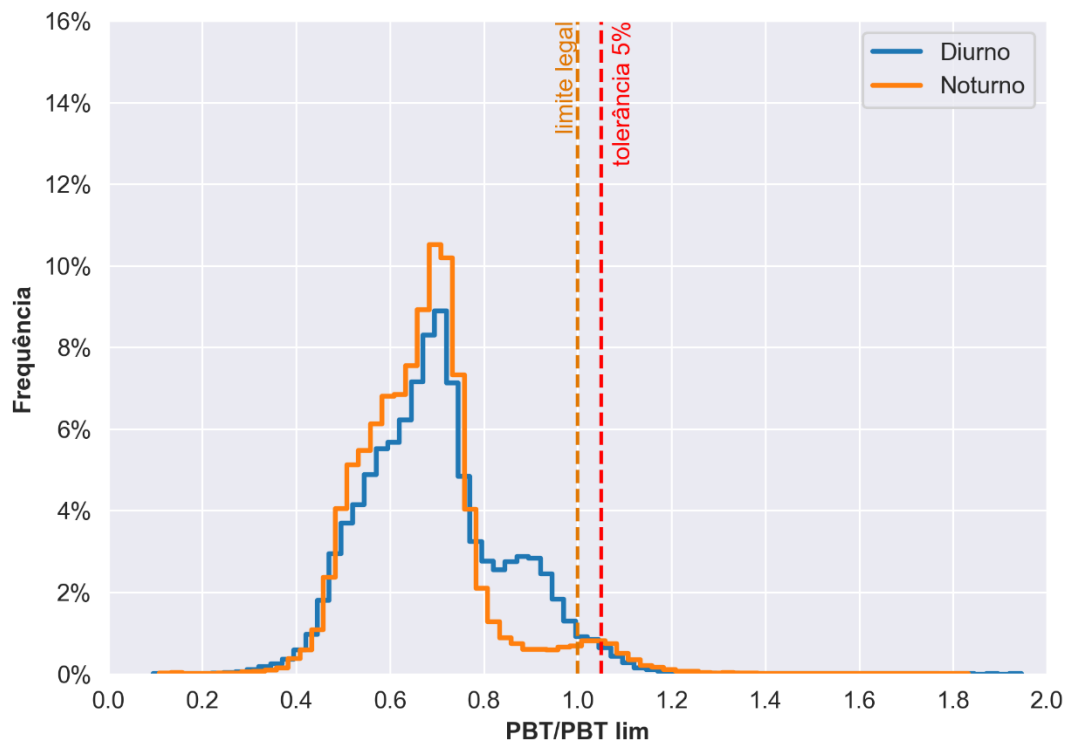
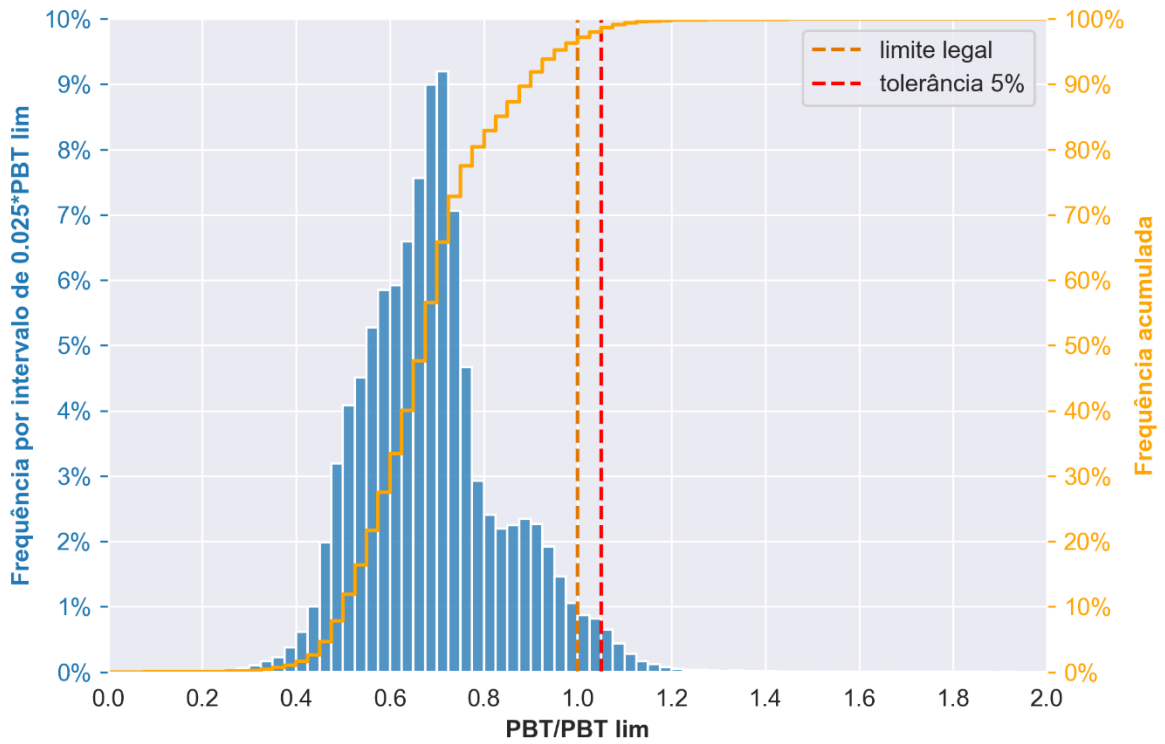
APÊNDICE D – ESPECTROS DE CARGAS POR PESO BRUTO TOTAL

D.1 ESPECTROS DE CARGA DE ARAXÁ | BR-389/MG



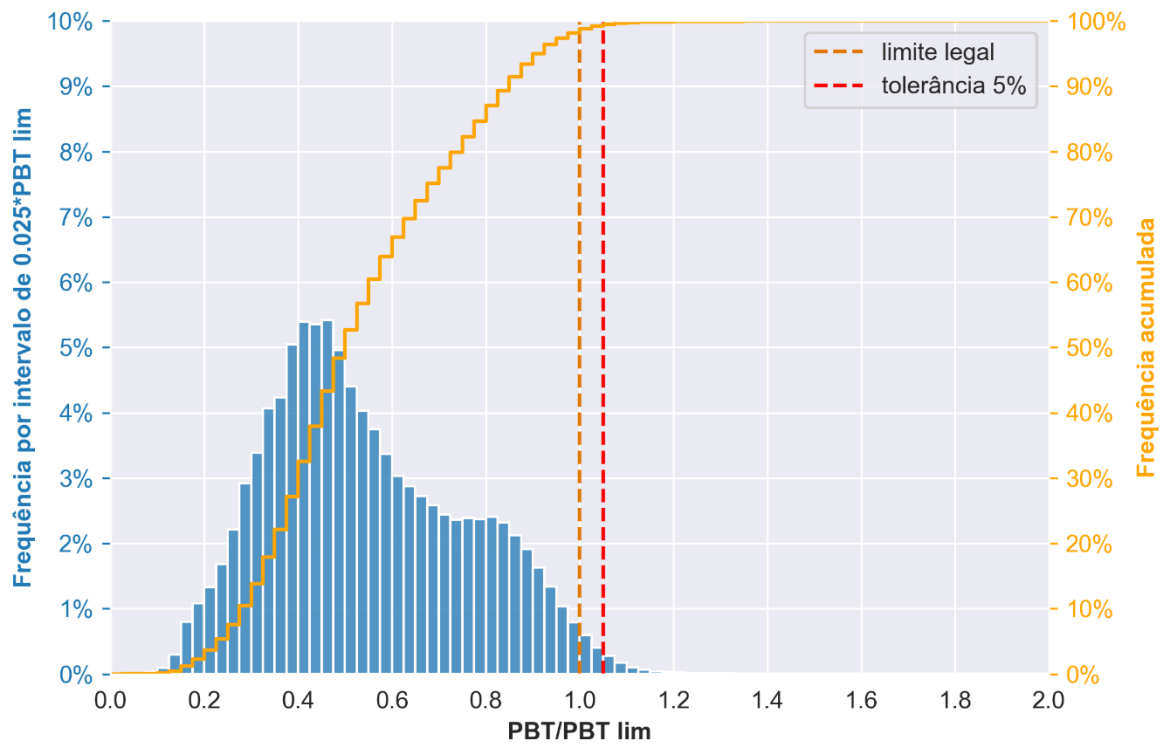
(fonte: elaborado pelo autor)

D.2 ESPECTROS DE CARGA DE COMENDADOR GOMES | BR-153/MG



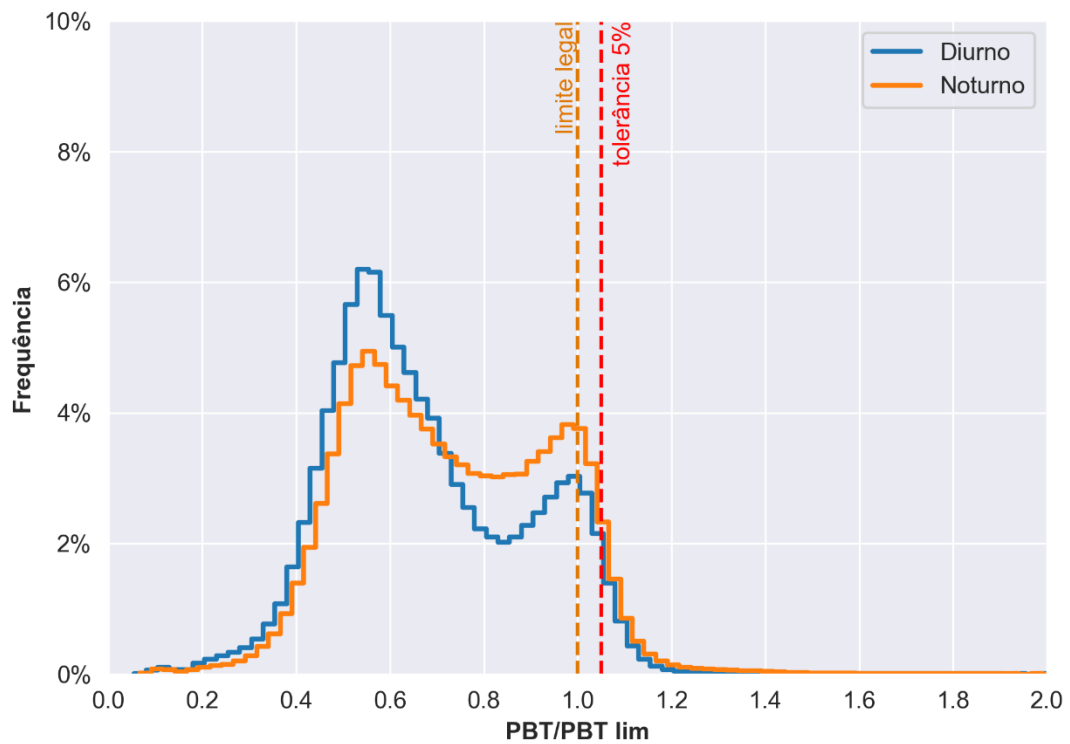
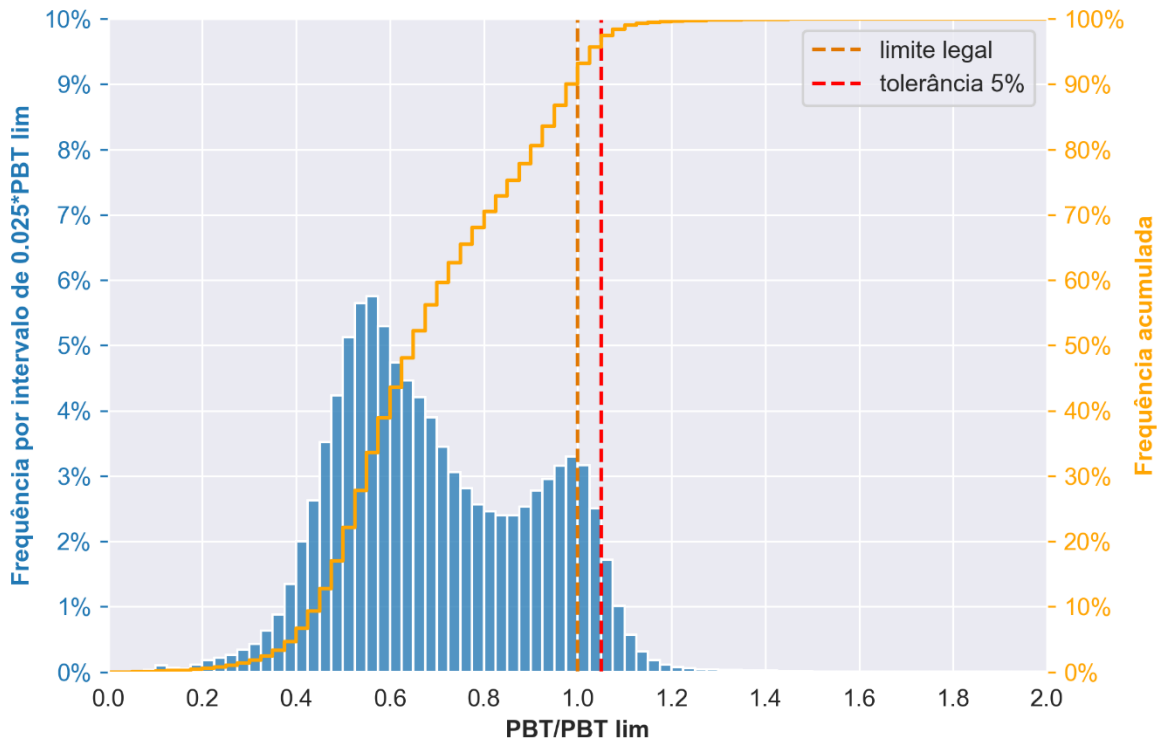
(fonte: elaborado pelo autor)

D.3 ESPECTROS DE CARGA DE MAGÉ | BR-116/RJ



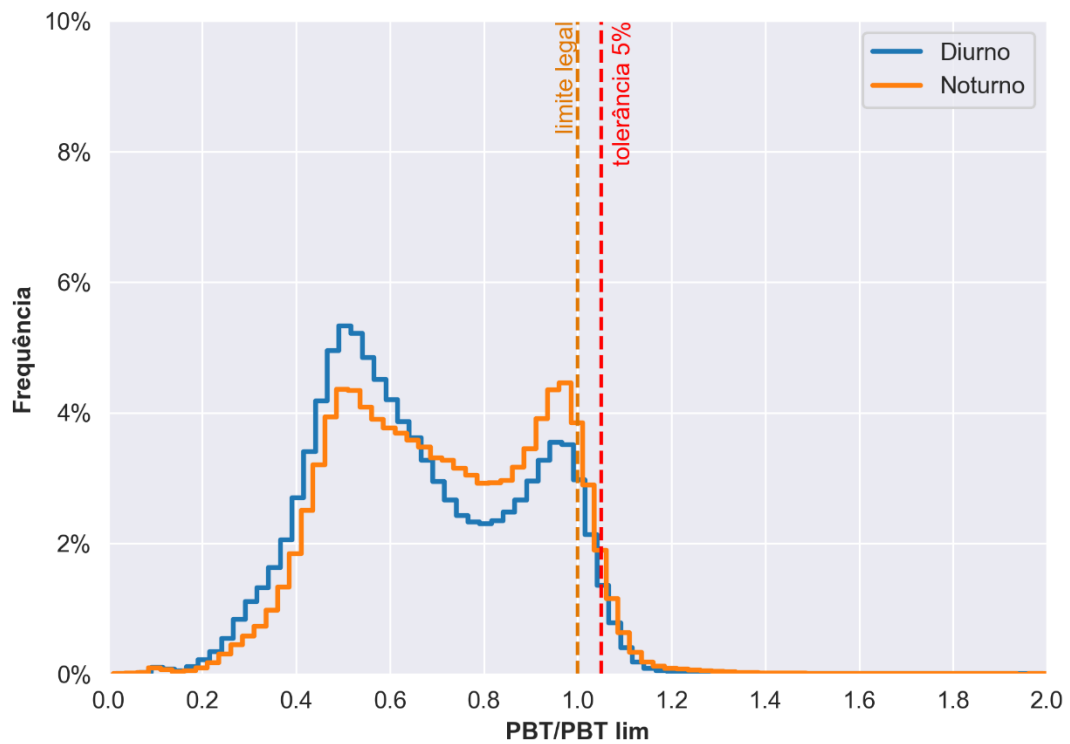
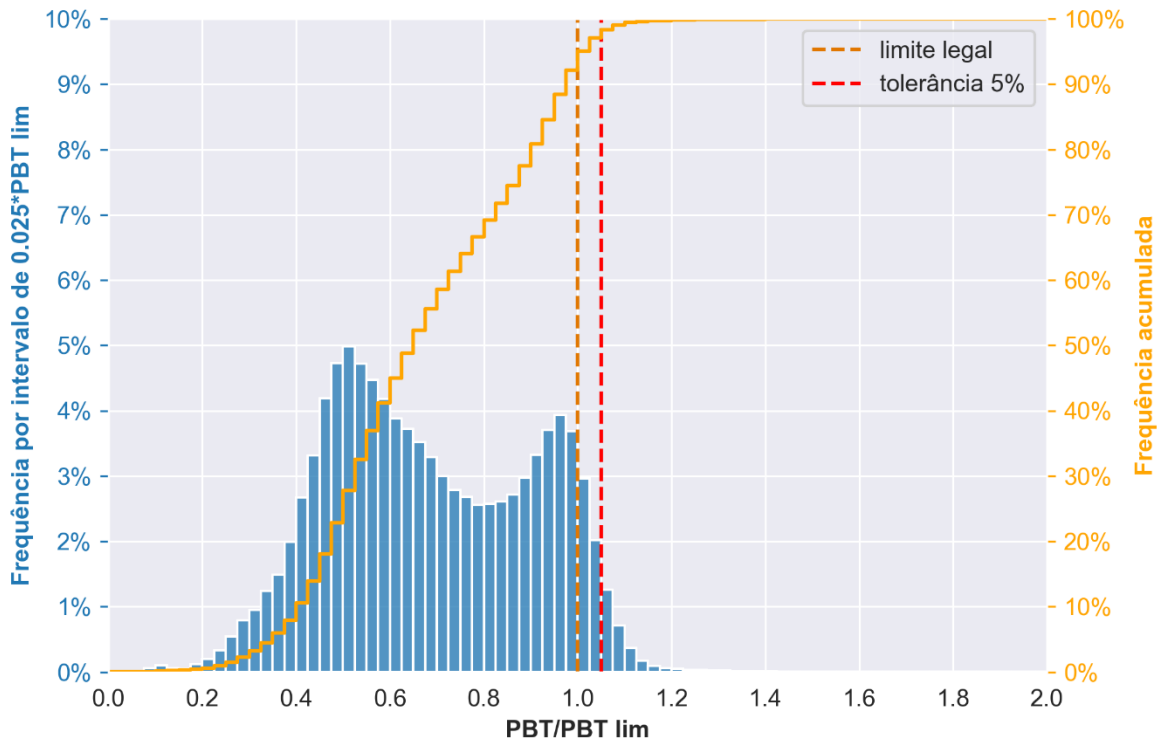
(fonte: elaborado pelo autor)

D.4 ESPECTROS DE CARGA DE PARACAMBI | BR-116/RJ



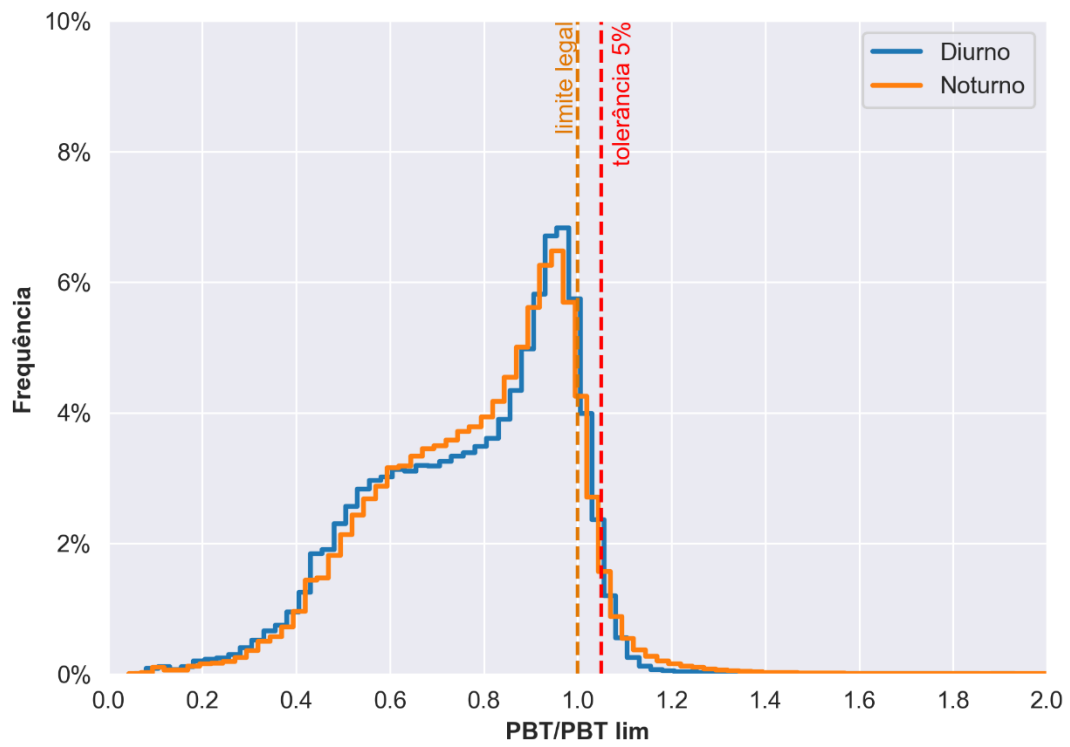
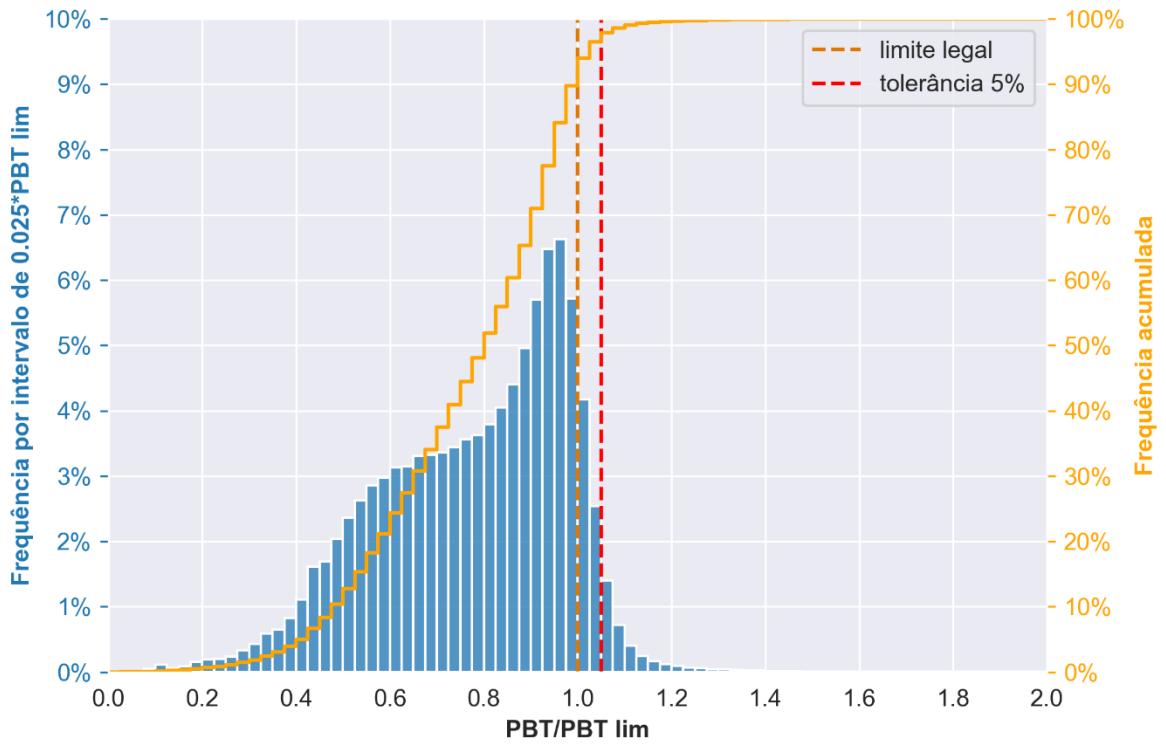
(fonte: elaborado pelo autor)

D.5 ESPECTROS DE CARGA DE RESENDE | BR-116/RJ



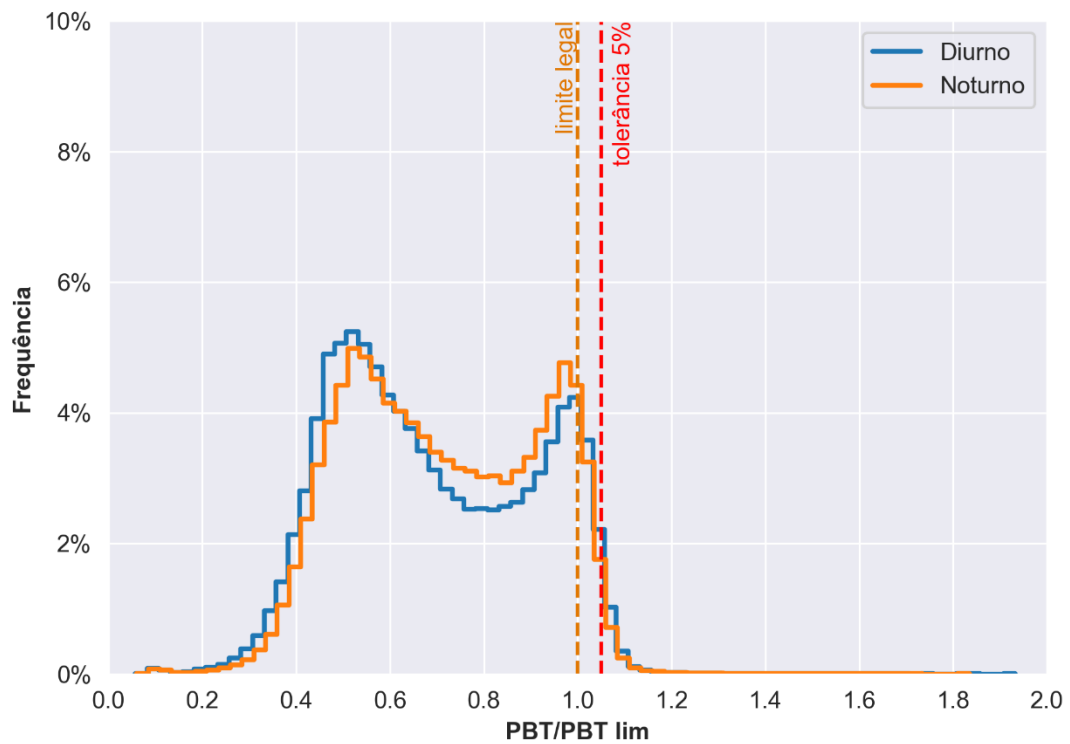
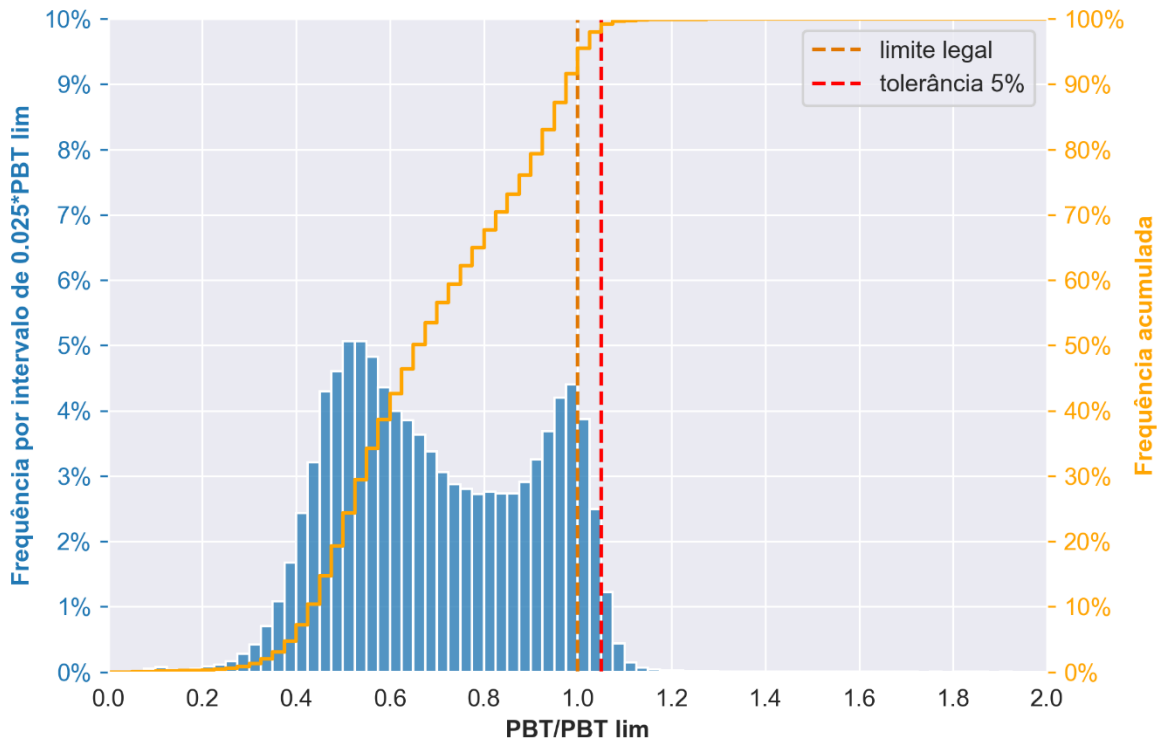
(fonte: elaborado pelo autor)

D.6 ESPECTROS DE CARGA DE QUELUZ | BR-116/SP



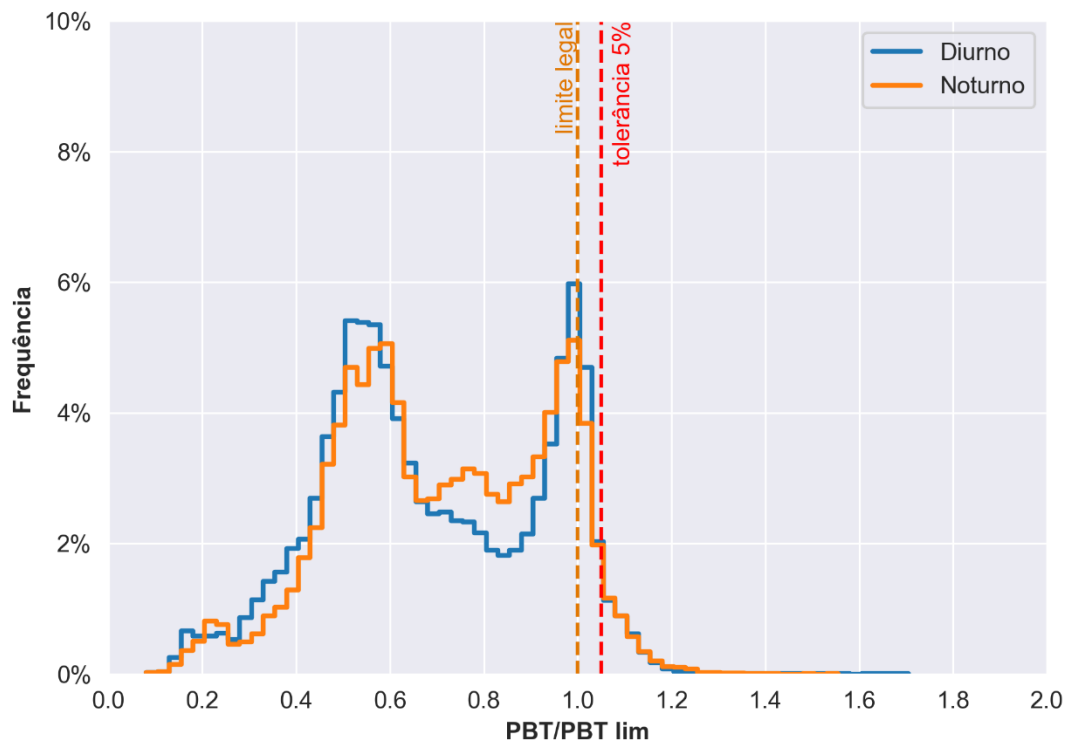
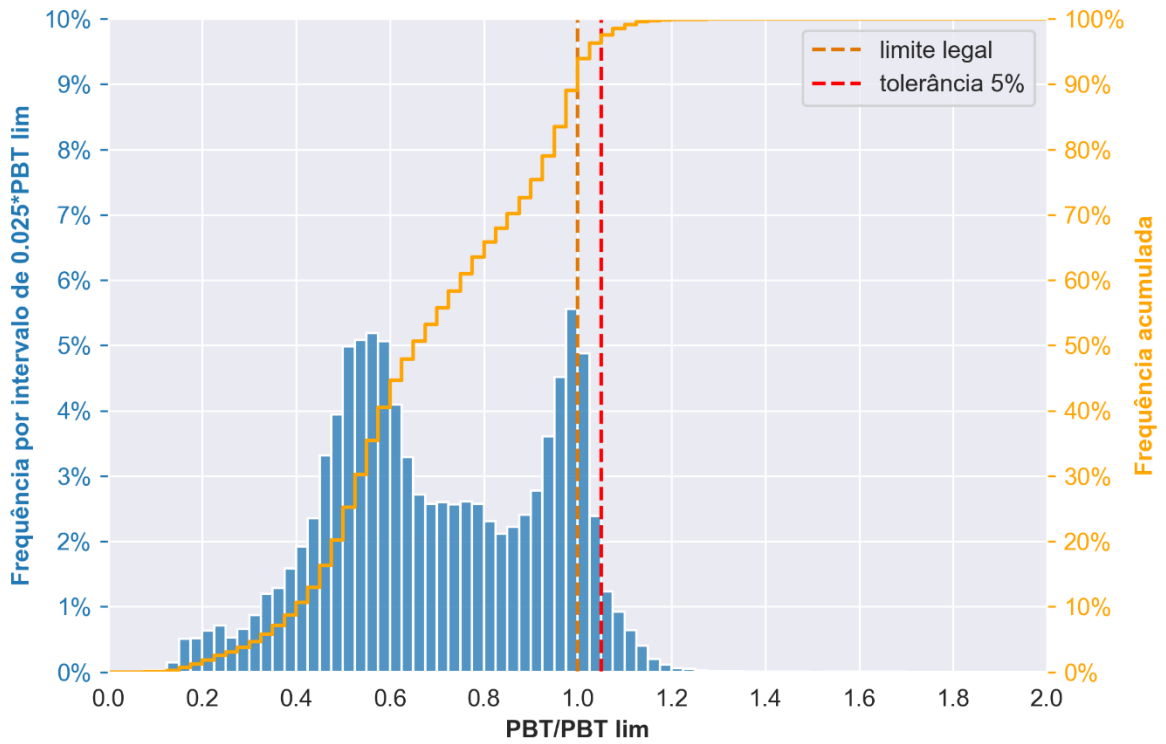
(fonte: elaborado pelo autor)

D.7 ESPECTROS DE CARGA DE GUARAREMA | BR-116/SP



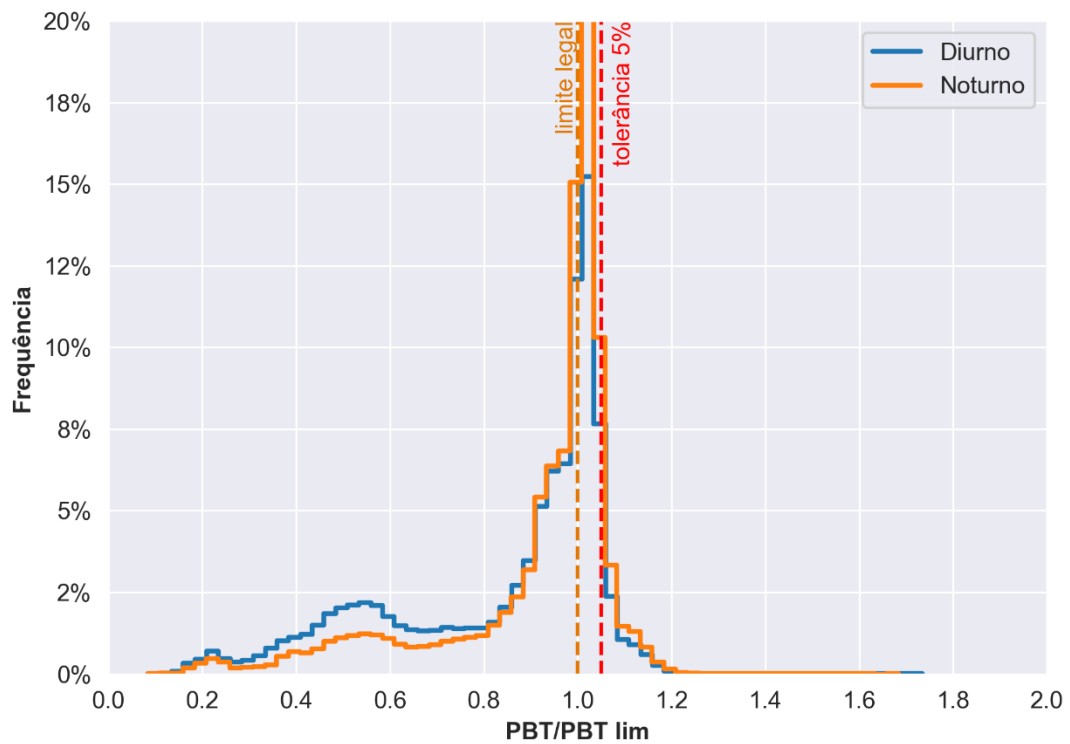
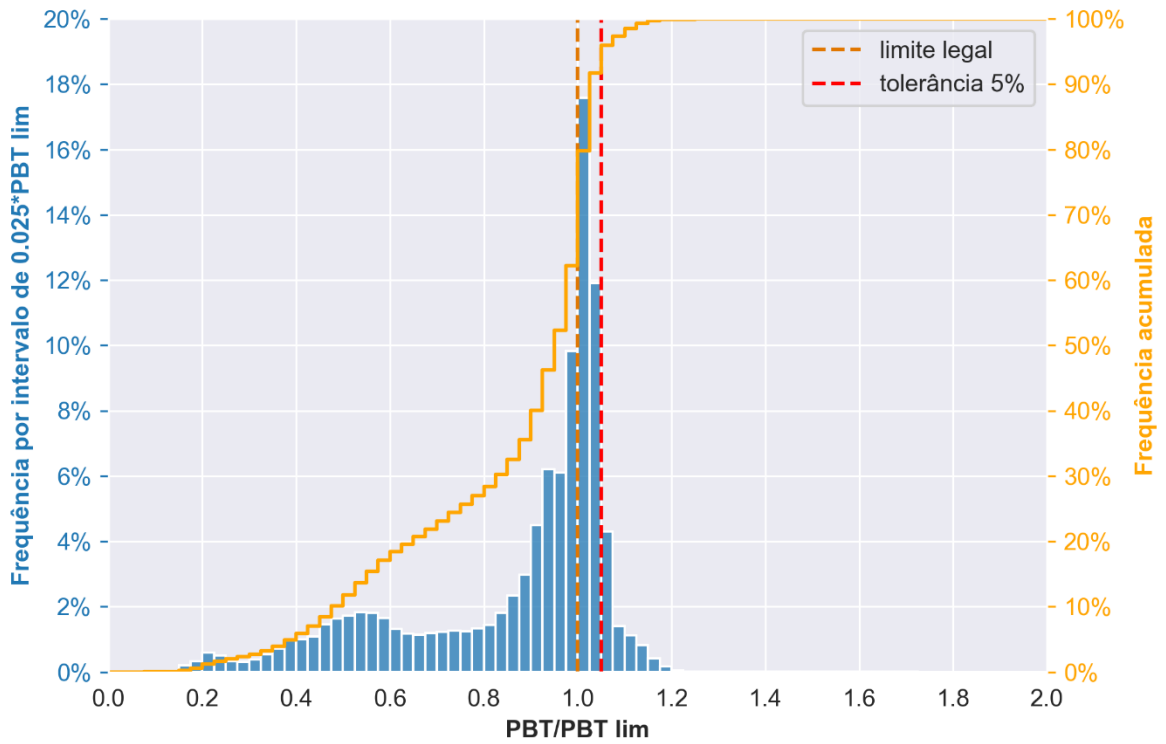
(fonte: elaborado pelo autor)

D.8 ESPECTROS DE CARGA DE RETIRO | BR-116/RS



(fonte: elaborado pelo autor)

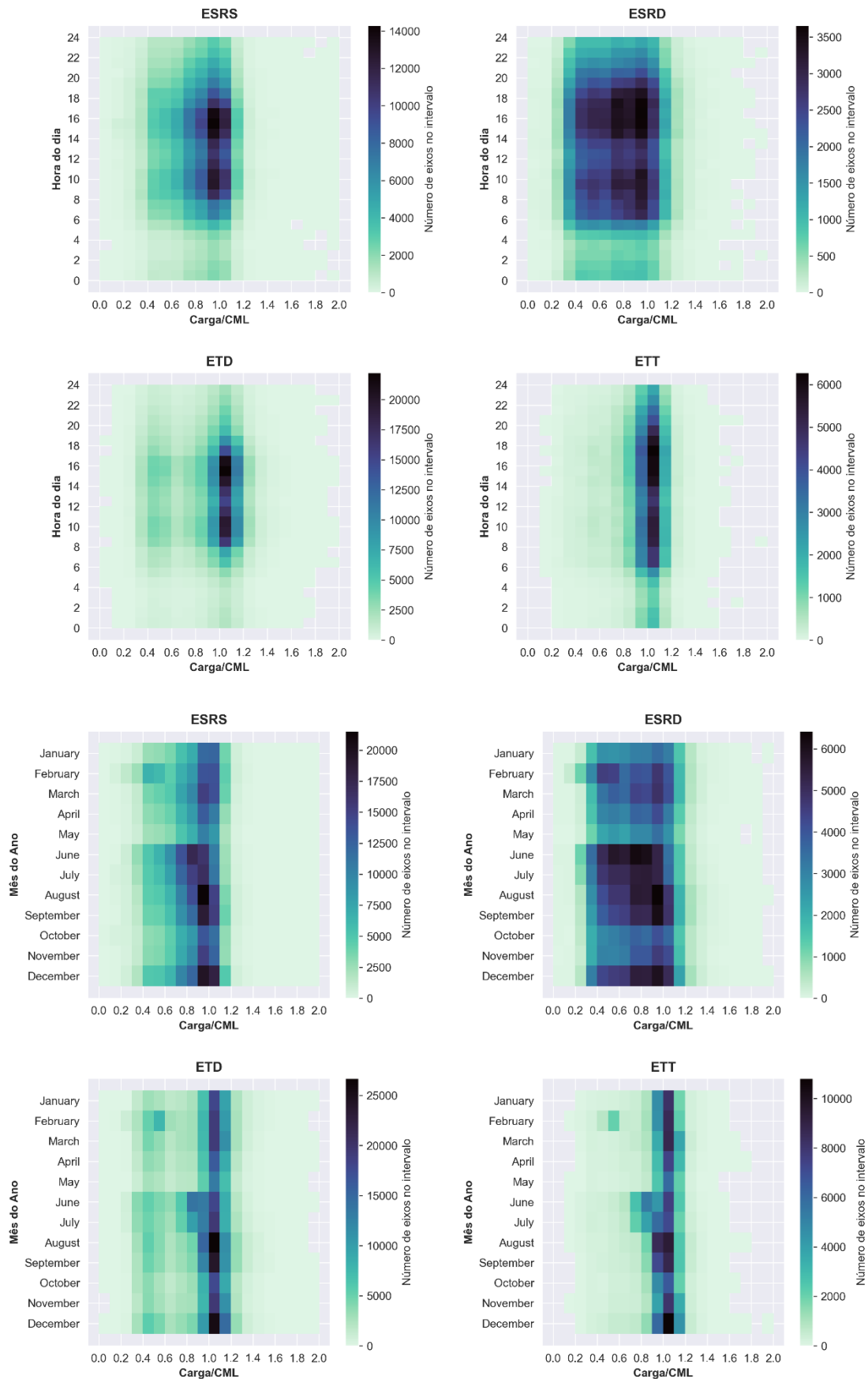
D.9 ESPECTROS DE CARGA DE CAPÃO SECO | BR-392/RS



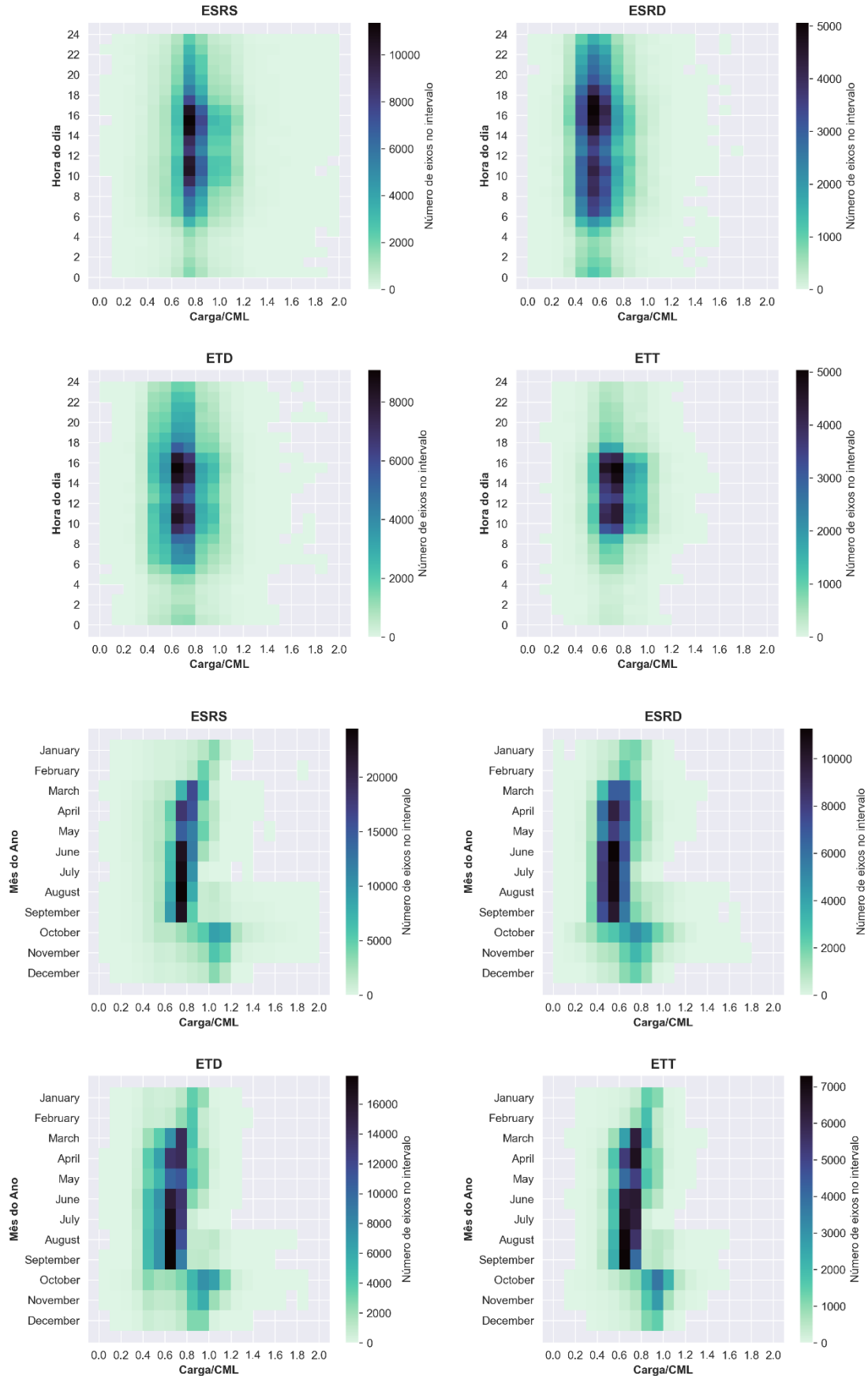
(fonte: elaborado pelo autor)

**APÊNDICE E – MAPAS DE CALOR DA DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS POR HORA
DO DIA E POR MÊS DO ANO**

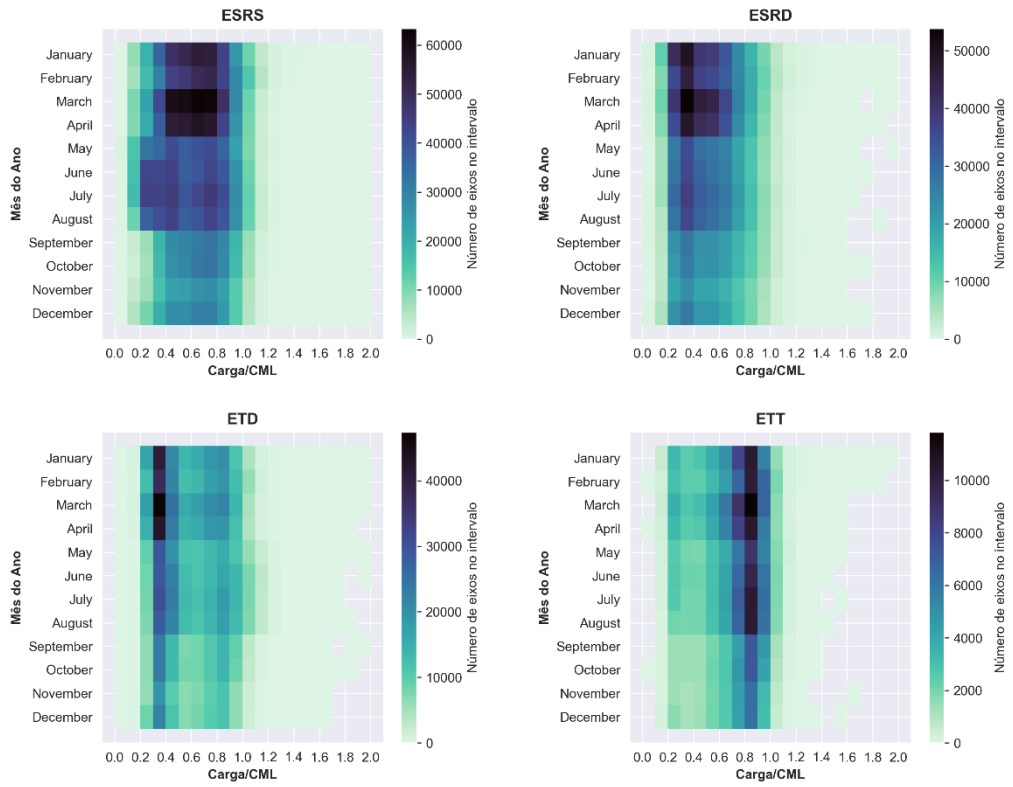
Araxá



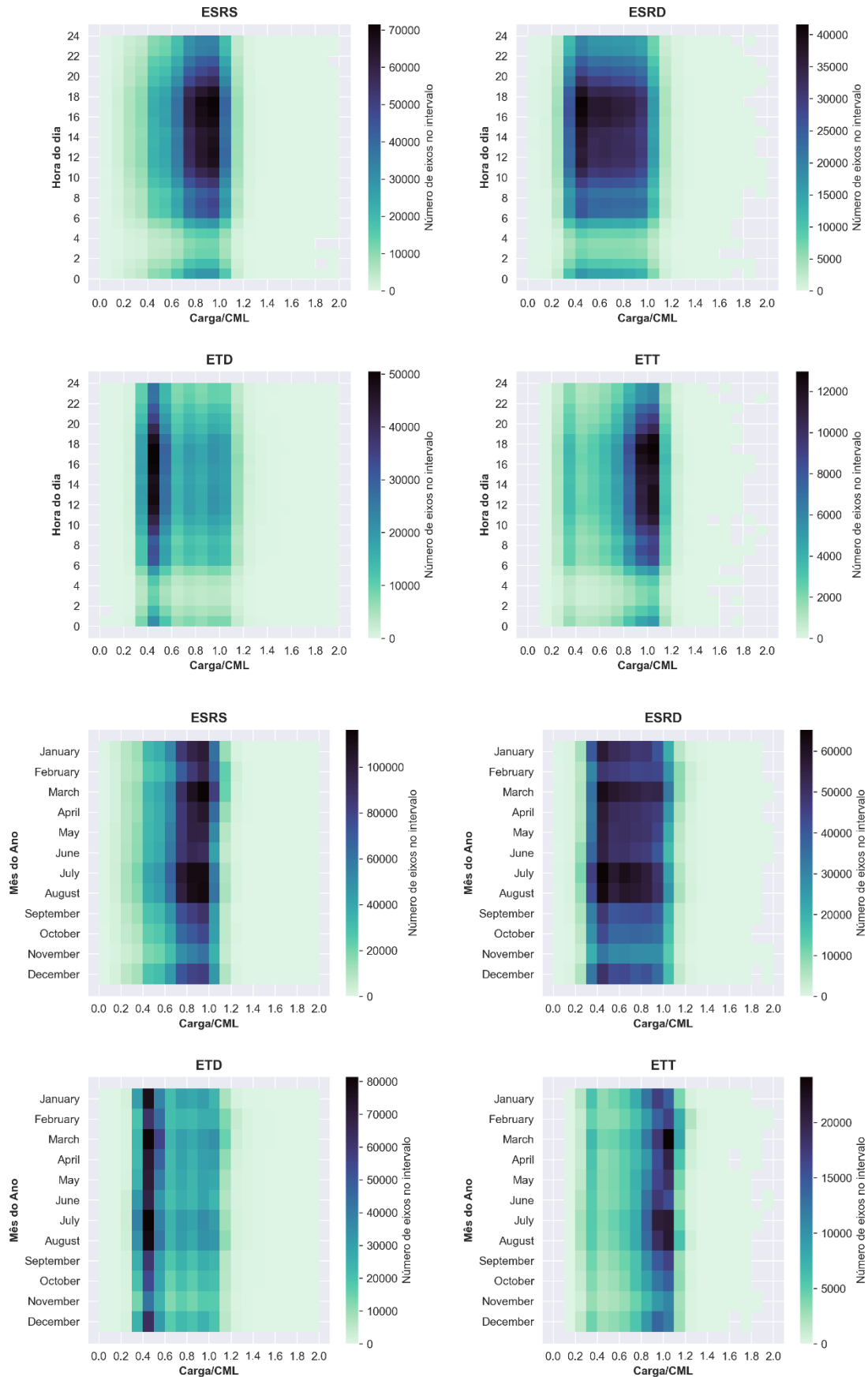
Comendador Gomes



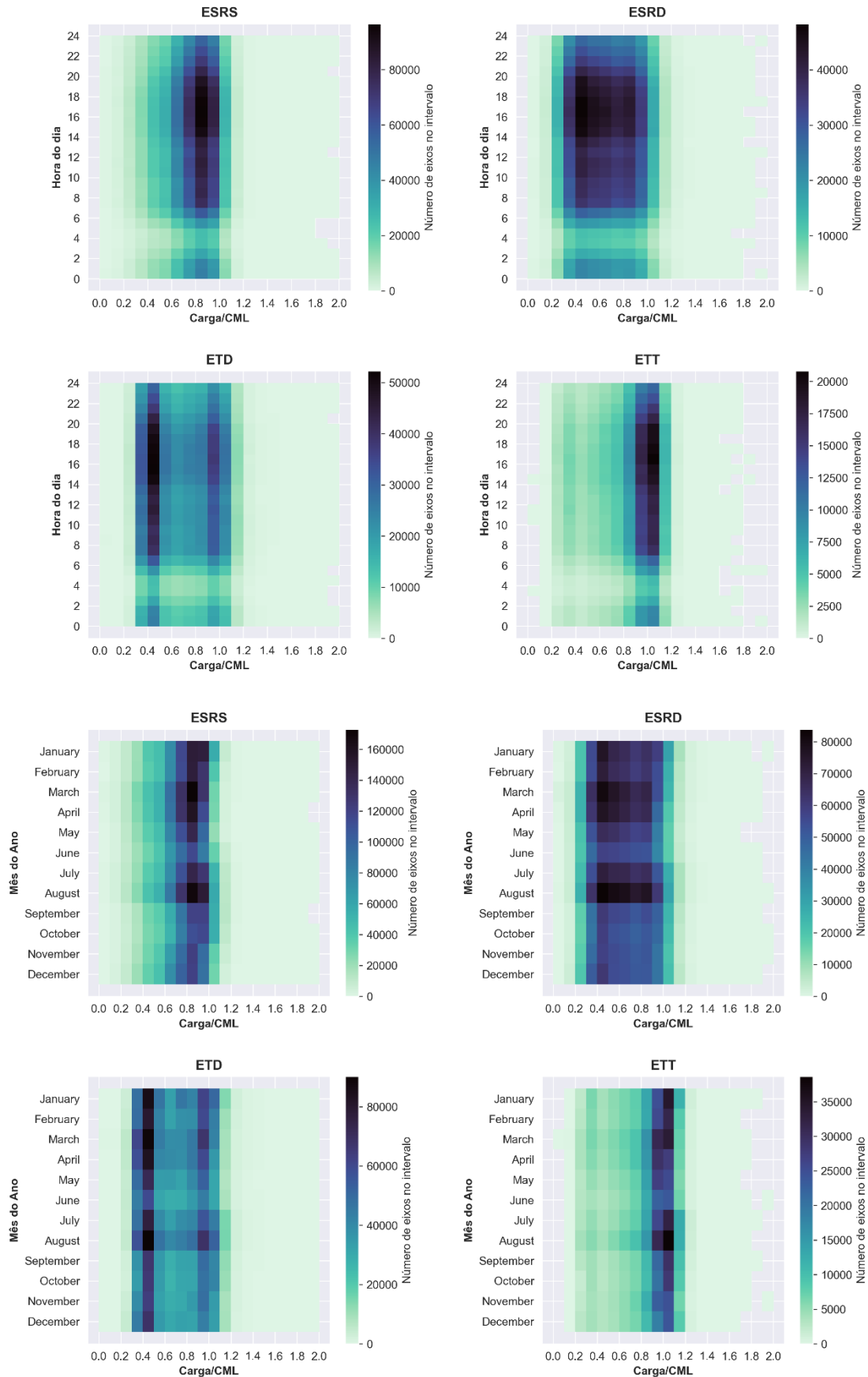
Magé



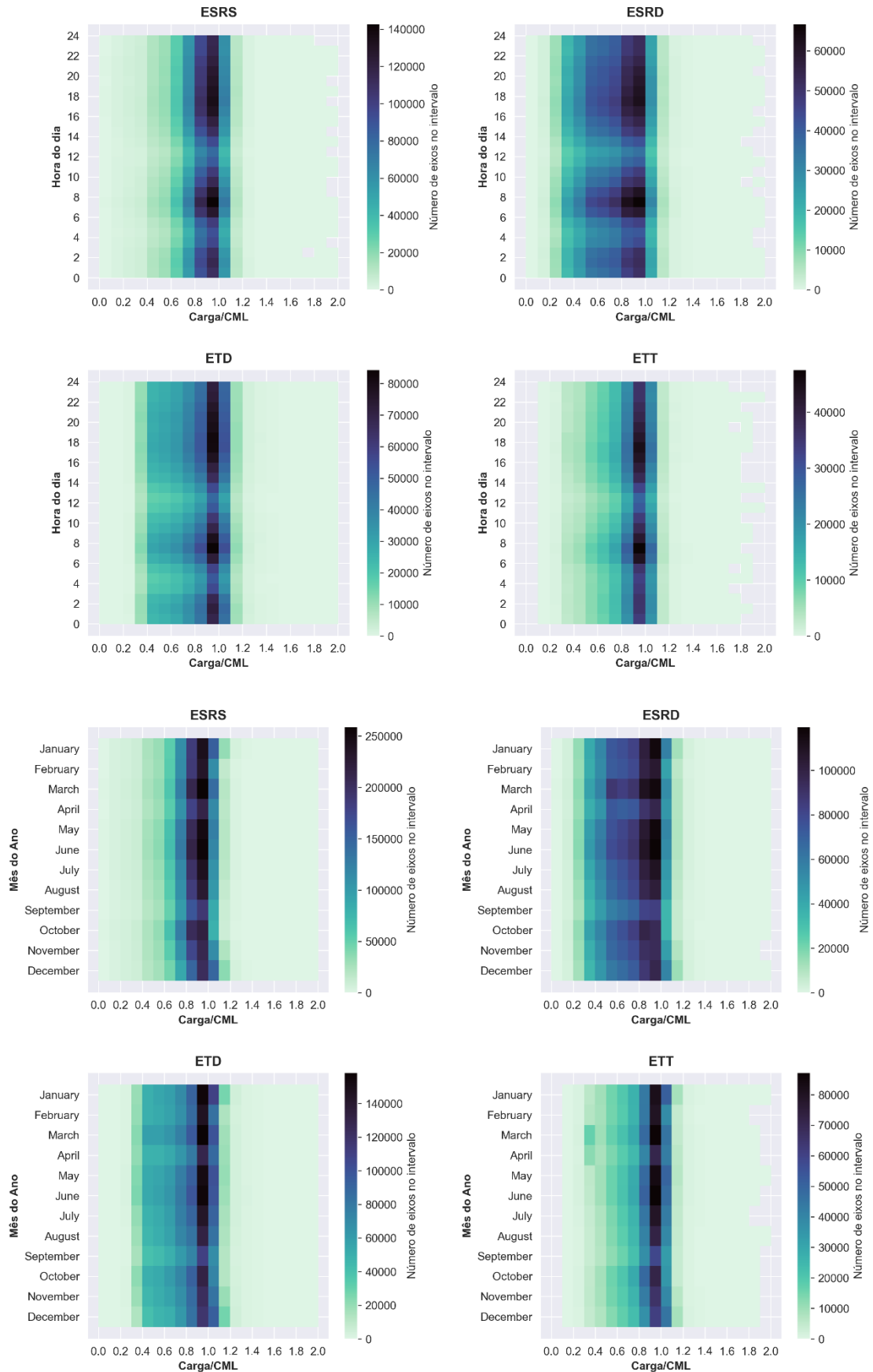
Paracambi



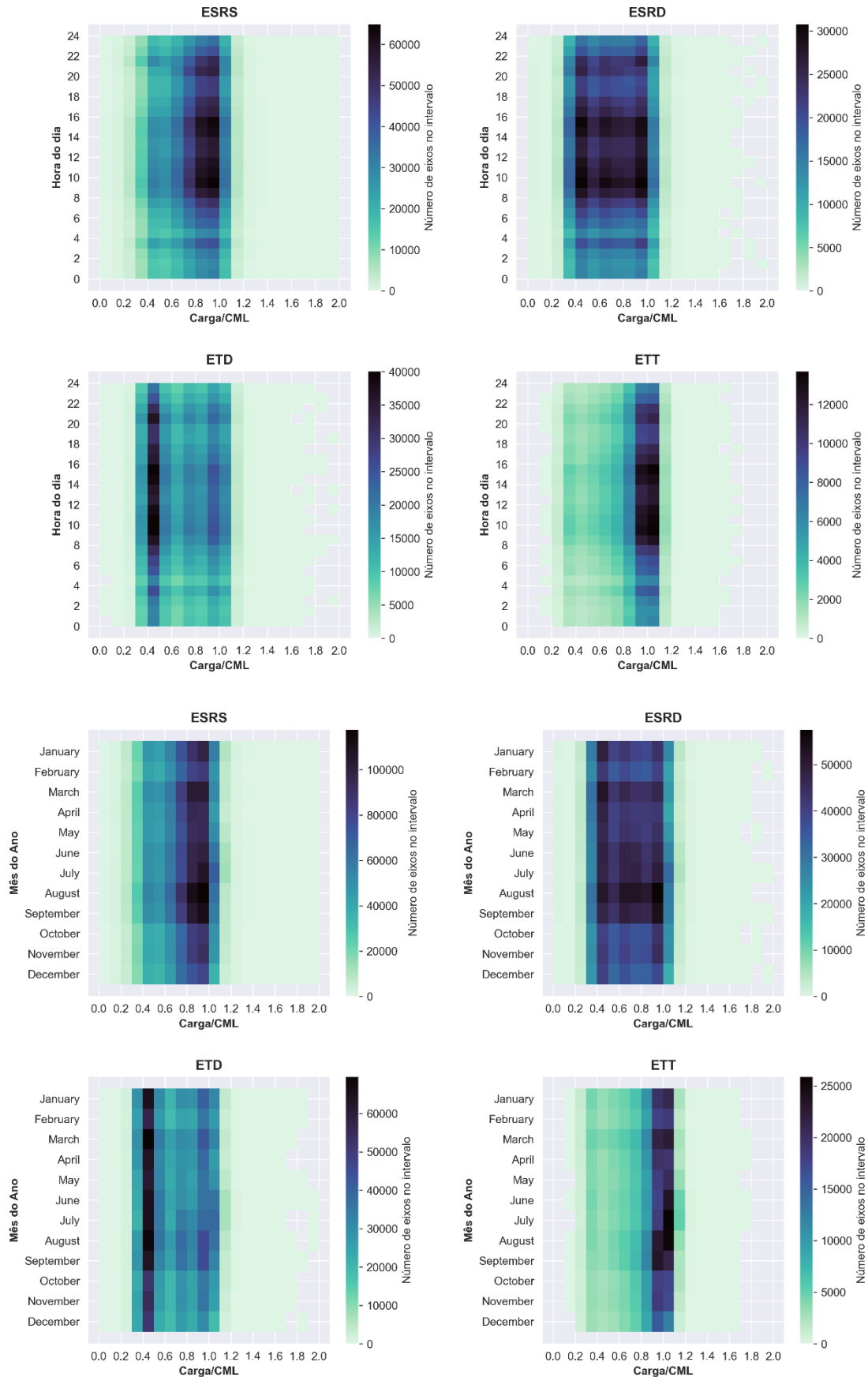
Resende



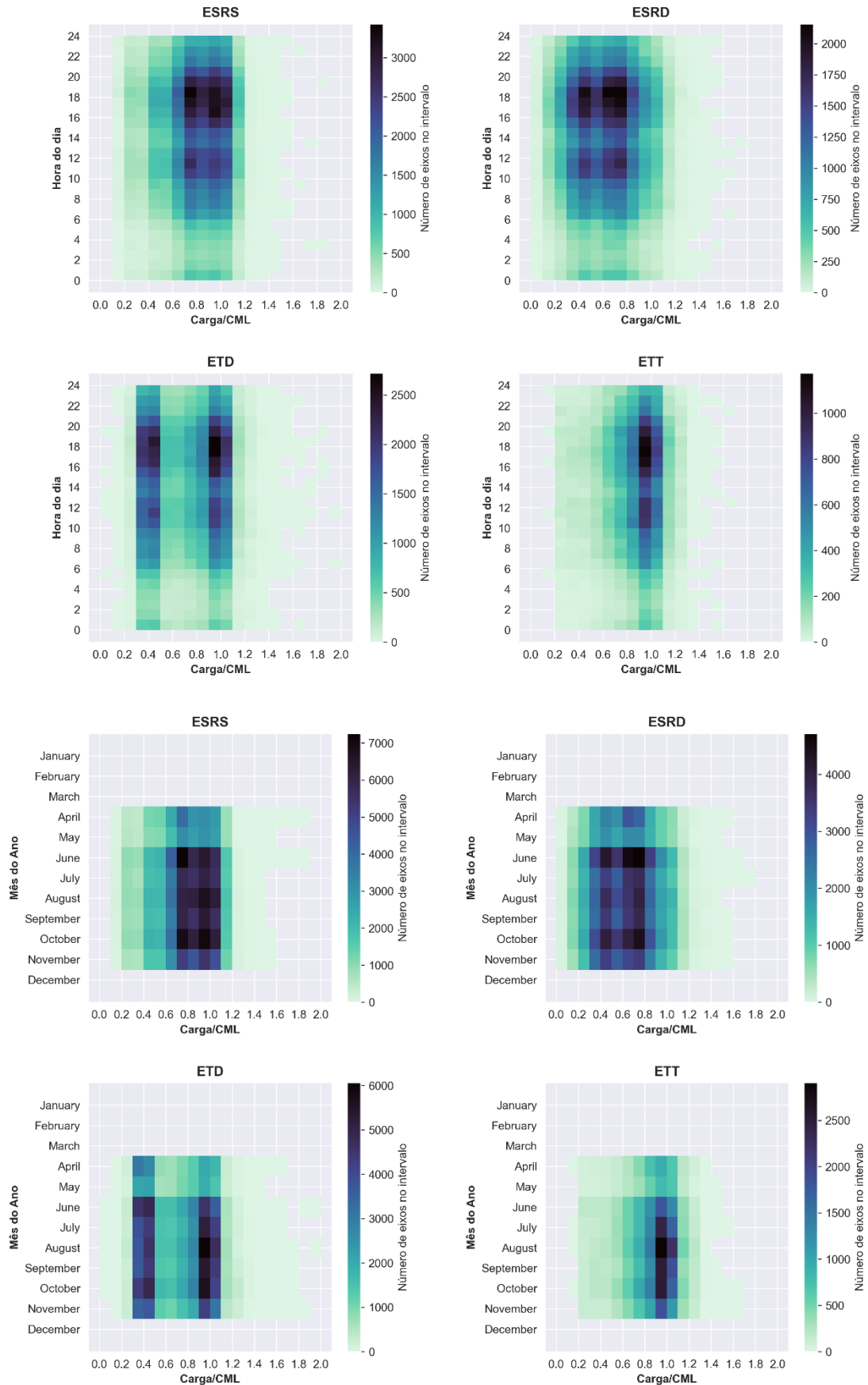
Queluz



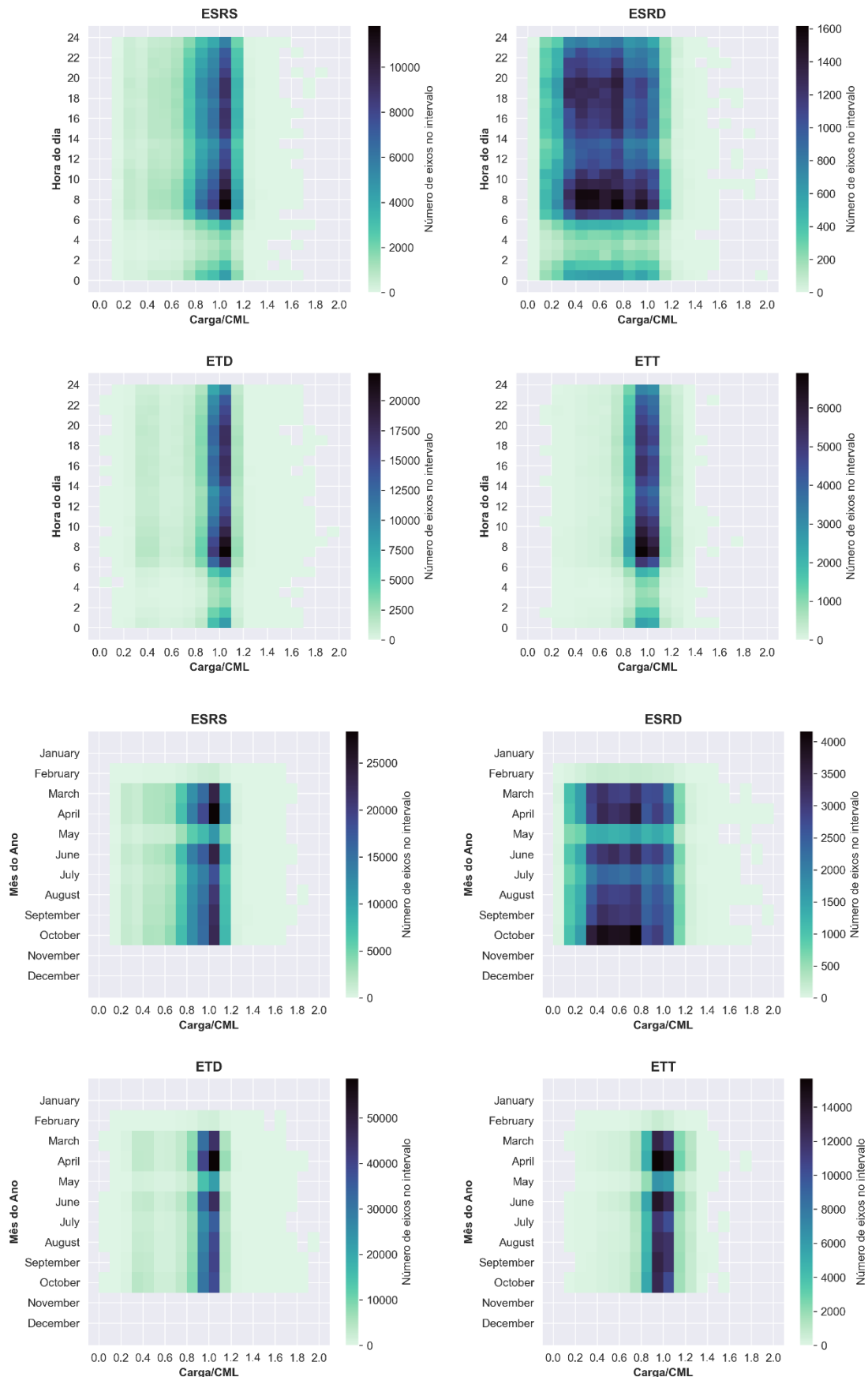
Guararema



Retiro



Capão Seco



APÊNDICE F – ESPECTROS DE CARGA TABELADOS

Disponível em formato digital através do link:

<https://bit.ly/apendice-f-grimm-2022>