

ESTUDOS PROBABILÍSTICOS PARA MODELOS DE CARGAS MÓVEIS EM
PONTES RODOVIÁRIAS NO BRASIL

Carlos Eduardo Rossigali

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof.^a Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Prof. Ronaldo Carvalho Battista, Ph.D.

Prof. Luís Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.

Prof. Benjamin Ernani Diaz, Dr.Ing.

Prof. Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2006

ROSSIGALI, CARLOS EDUARDO

Estudos Probabilísticos para Modelos de Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias no Brasil. [Rio de Janeiro] 2006.

XXIV, 161p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2006).

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Pontes;
2. Cargas móveis;
3. Estatística de Extremos;
4. Tráfego Rodoviário.

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDOS PROBABILÍSTICOS PARA MODELOS DE CARGAS MÓVEIS EM PONTES RODOVIÁRIAS NO BRASIL

Carlos Eduardo Rossigali

Agosto/2006

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Ronaldo Carvalho Battista

Programa: Engenharia Civil

Para aumentar a durabilidade e melhorar o comportamento de pavimentos e obras de arte rodoviárias, os projetos devem ser elaborados com base em modelos de cargas móveis que produzam efeitos similares ao do tráfego de veículos reais. A norma brasileira de cargas móveis em pontes rodoviárias deve, portanto, ser modernizada e acompanhar a tendência de se utilizar modelos de cargas mais realistas, como aqueles já introduzidos em algumas normas estrangeiras de ampla repercussão internacional. É neste contexto que o presente trabalho se insere, apresentando estudos probabilísticos que conduzem aos parâmetros necessários à elaboração dos referidos modelos de cargas móveis.

A partir da análise criteriosa dos dados de tráfego rodoviário publicados pelo Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT) construiu-se uma base reduzida de dados de veículos reais, com os quais se elaborou a estatística de extremos dos esforços solicitantes críticos em estruturas. Foram consideradas pontes em grelha com duas longarinas típicas da malha rodoviária brasileira, com vãos entre 10m e 40m, sujeitas à passagem de veículos isolados. Os resultados obtidos mostram adicionalmente que as solicitações devidas ao tráfego real podem ser maiores que aquelas devidas a um veículo-tipo da norma brasileira.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PROBABILISTIC STUDIES TOWARDS LIVE LOAD MODELS FOR BRAZILIAN
HIGHWAY BRIDGES

Carlos Eduardo Rossigali

August/2006

Advisors: Michèle Schubert Pfeil
Ronaldo Carvalho Battista

Department: Civil Engineering

In order to increase the durability and to improve the performance of pavements and highway bridges, their design should be based on live load models which produce effects similar to the ones produced by the real traffic. The Brazilian code for live load on highway bridges should, then, be revised and follow the current trend to adopt more realistic load models, already used in international design codes. This work presents probabilistic studies which lead to the necessary parameters for the development of the mentioned load models.

A heavy vehicles data base was built after a careful analysis of the highway traffic data published by the National Department of Transport Infrastructure (DNIT). This enables the establishment of the probability distribution for extreme values of critical internal forces on bridge structures, yielding to the target values to be reproduced by the live load models. The structural schemes considered were grid systems with two girders typical of Brazilian bridges, spanning from 10m to 40m, subjected to the passage of isolated vehicles. The results also show that the internal forces due to the real traffic can be greater than those due to the Brazilian code live load.

Aos meus pais: Dino Rossigalli Netto e
Icléa Piccoli Lopez Rossigali.

Agradeço

Ao bom e eterno DEUS, por Sua generosa mão a mim estendida, que me levou a superar todos os obstáculos da vida para aqui chegar.

Ao meu amigo Gustavo Eduardo Humphreys, que me acolheu, apoiou e auxiliou na minha chegada ao Rio, e pela sincera amizade desde os tempos do CEFET-PR.

Aos meus orientadores, Michèle Schubert Pfeil e Ronaldo Carvalho Battista, pelo apoio, amizade, paciência e orientação.

Aos meus irmãos Rossana e Walter e à minha sobrinha Laís, que tanto me apoiaram.

À minha namorada Helena, por todo o amor, paciência, companheirismo, amizade e dedicação.

Aos amigos Adcleides, Jonylson, Emerson, Walber e meu xará Carlão, pela sincera amizade, pelo companheirismo e pelos bons momentos vivenciados, obrigado!

Aos colegas Tiagão, Ana Maria, Guilhermes (Cordeiro e Romano), Janine, Luis Rodriguez Alvariño, Norma, Daniel Mouço, Rafael Sgarbi, Thaís Sampaio, Valéria, Cíntia, Reila, Vivian, Eugênia, Flávio, Raffael Veríssimo, Michele Kreischer Schmid, Nestor, Euler, Ederli, Maurício, João, Miguel, Andrey, Thelmo, Luzidelle, Sandra, Jô e Cristina, pela grandiosa amizade.

Aos professores Sérgio Scheer e Roberto Dalledone Machado, da UFPR, pela confiança em mim depositada quando da indicação à pós-graduação na COPPE/UFRJ.

Aos meus colegas de apartamento, pela excelente convivência: Nobar, Alvaro, Patricio e Alessandro.

Às velhas amizades.

A todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho e que não foram aqui citados. Muito obrigado!

Índice

I Introdução

I.1	Motivação	1
I.2	Objetivos e metodologia	3
I.3	Revisão bibliográfica	4
I.4	Apresentação do trabalho	8

II Tráfego de veículos pesados nas rodovias brasileiras

II.1	Veículos rodoviários pesados	9
II.1.1	Classes de veículos	9
II.1.2	A Lei da Balança	14
II.1.3	As CVC e a segurança das obras de arte	17
II.2	Monitoração do tráfego rodoviário	18
II.2.1	Tipos de monitoração	18
II.2.2	Registros dos Postos de Monitoramento do DNIT	19
II.2.3	Posto representativo	25
II.3	Base de dados utilizada neste trabalho	30
II.3.1	Redução da base de dados do DNIT	30
II.3.2	Dimensões dos veículos	31
II.3.3	Histogramas finais de peso para as classes de veículos usadas	34
II.4	Cargas móveis rodoviárias da norma brasileira	39

III Distribuições de probabilidade e extrapolações

III.1	Variáveis discretas	42
III.2	Variáveis contínuas	45
III.3	Funções de distribuição de probabilidade	48
III.3.1	Parâmetros	48
III.3.2	Síntese de distribuições	48
III.4	Ajuste de distribuições de probabilidade a dados observados	54
III.5	Testes de aderência	57
III.6	Conceitos relacionados ao período de retorno	60

III.6.1	A seqüência de Bernoulli	60
III.6.2	A distribuição binomial	61
III.6.3	A distribuição geométrica	61
III.6.4	O período de retorno	62
III.7	Extrapolações	63
III.7.1	Sistemática de extrapolação	63
III.7.2	Extrapolação pela Estatística de Extremos	64
III.7.3	Formas assintóticas	66
III.7.4	Extrapolação pelo inverso do período de retorno	68
III.7.5	Comparação entre os métodos de extrapolação	69
IV	Efeitos da passagem dos veículos sobre as pontes	
IV.1	Introdução	70
IV.2	Geometria das pontes analisadas	71
IV.3	Esforços solicitantes considerados	74
IV.4	Carregamento	75
IV.5	Modelo estrutural e análise	80
IV.6	Distribuições de freqüência dos esforços solicitantes devidos aos veículos reais	84
IV.7	Comparação dos efeitos dos veículos reais isolados com os efeitos dos veículos normativos	88
IV.8	Uma nova base de dados considerando somente os veículos mais pesados	93
V	Extrapolação dos efeitos da passagem dos veículos sobre as pontes	
V.1	Introdução	97
V.2	Funções densidade de probabilidade dos efeitos devidos aos veículos isolados	97
V.3	Comparação entre as Estatísticas de Extremos usando todos os registros e usando os veículos mais pesados	107
V.4	Valores representativos das extrapolações	108
V.5	Períodos de retorno considerados	111
V.6	Comparação dos efeitos do tráfego real com o dos veículos de projeto	113
V.7	Valores-alvo dos efeitos para os modelos de carga	119

VI Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	
VI.1 Conclusões	124
VI.2 Sugestões para trabalhos futuros	126
Referências Bibliográficas	
Anexo A Classificação dos veículos rodoviários	
A.1 Tipos de veículos e ligações	133
A.2 Sistemas de identificação dos veículos	135
Anexo B As CVC e a durabilidade dos pavimentos	
B.1 Descrição das CVC	140
B.2 Legislação	144
B.3 Impacto nos pavimentos	146
Anexo C Análise de alguns dados disponibilizados pela base do DNIT	
C.1 Introdução	150
C.2 Peso por tipo de eixo	150
C.3 Pesos das classes de veículos consideradas neste trabalho	153
C.4 Velocidades	157

Índice de Figuras

Figura I.1 Modelos de carga LM1 e LM2 do Eurocódigo 1 (O'CONNOR <i>et al.</i> , 2000)	6
Figura I.2 Modelo de carga HL-93 da AASHTO (O'CONNOR <i>et al.</i> , 2000)	7
Figura II.1 Cavalos mecânicos (www.scania.com.br, www.mercedes-benz.com.br), com a quinta roda indicada pela seta	10
Figura II.2 Veículo semi-reboque (www.pastre.com.br)	10
Figura II.3 Caminhões rígidos rebocando carretas (veículos tipo reboque) (www.mercedes-benz.com.br, WIDMER, 2002)	10
Figura II.4 Caminhões rígidos convencionais (www.mercedes-benz.com.br, www.pastre.com.br)	10
Figura II.5 Nomenclaturas de veículos	12
Figura II.6 Configurações de eixos e seus limites de peso	15
Figura II.7 Postos de Contagem do DNIT (www.dnit.gov.br)	18
Figura II.8 Postos de Monitoramento do DNIT (www.dnit.gov.br)	19
Figura II.9 Distribuição de frequências relativas das classes de veículos	21
Figura II.10a Distribuição do peso por eixo simples de rodas simples ($\bar{X} = 48,7kN$; $s = 18,4kN$)	22
Figura II.10b Distribuição do peso por eixo simples de rodas duplas ($\bar{X} = 69,2kN$; $s = 41,0kN$)	23
Figura II.10c Distribuição do peso por eixo <i>tandem</i> duplo ($\bar{X} = 116kN$; $s = 59,2kN$)	23
Figura II.10d Distribuição do peso por eixo <i>tandem</i> triplo ($\bar{X} = 208kN$; $s = 76,3kN$)	24
Figura II.11 Percentuais do peso total em cada eixo dos veículos de configuração mais freqüente	25
Figura II.12 Estradas destacadas na malha rodoviária brasileira: (a) BR-101 e (b) BR-393 (www.dnit.gov.br)	26
Figura II.13 Localização do posto P51 no norte do ES (www.dnit.gov.br)	27
Figura II.14a Série das distribuições de peso dos eixos <i>tandem</i> triplo em P51: 2000	28

Figura II.14b Série das distribuições de peso dos eixos <i>tandem</i> triplo em P51: 2001	28
Figura II.14c Série das distribuições de peso dos eixos <i>tandem</i> triplo em P51: 2002	29
Figura II.15 Distribuição de freqüências relativas das classes de veículos em P51	29
Figura II.16 Distribuição de freqüências relativas das classes de veículos em P51, em ordem decrescente, sem considerar as classes de veículos Leves e Utilitários	30
Figura II.17 Distribuição de freqüências relativas em P51, apenas com as classes de veículos consideradas neste trabalho	31
Figura II.18 Padrão usado para representar as dimensões dos veículos	33
Figura II.19 Variação do peso no eixo <i>tandem</i> triplo dos veículos 2S3 com o seu peso total	35
Figura II.20a Histograma refinado de peso da classe O2C em P51 ($\bar{X} = 110kN$; $s = 56,5kN$)	36
Figura II.20b Histograma refinado de peso da classe O3C em P51 ($\bar{X} = 144kN$; $s = 104kN$)	36
Figura II.20c Histograma refinado de peso da classe 2C em P51 ($\bar{X} = 58,5kN$; $s = 37,9kN$)	36
Figura II.20d Histograma refinado de peso da classe 3C em P51 ($\bar{X} = 134kN$; $s = 107kN$)	37
Figura II.20e Histograma refinado de peso da classe 2S2 em P51 ($\bar{X} = 151kN$; $s = 111kN$)	37
Figura II.20f Histograma refinado de peso da classe 2S3 em P51 ($\bar{X} = 304kN$; $s = 229kN$)	37
Figura II.21 Veículos-tipo da NB 6	39
Figura II.22 Veículos-tipo da NBR 7188	41
Figura III.1 Ilustração da inferência e da estimação (ANG <i>et al.</i> , 1975)	55
Figura III.2 Valores críticos da discrepância no teste de Kolmogorov-Smirnov para quatro níveis de significância	60

Figura IV.1 Tabuleiros de modelo antigo do DNER (a) e o atual (b) (PFEIL, 1985)	72
Figura IV.2 Seções transversais das pontes com tabuleiro de modelo antigo do DNER (a) e de modelo atual (b), ambas com duas longarinas	73
Figura IV.3 Distâncias entre eixos e percentuais do peso total em cada eixo dos veículos utilizados neste trabalho	76
Figura IV.4a Variação do peso percentual por eixo nos veículos de classe 2C	77
Figura IV.4b Variação do peso percentual por eixo nos veículos de classe 3C	77
Figura IV.4c Variação do peso percentual por eixo nos veículos de classe 2S3	78
Figura IV.5 Desvio do eixo do veículo em relação ao centro da faixa	79
Figura IV.6 Posições mais desfavoráveis para a passagem dos veículos	80
Figura IV.7 Modelo estrutural para a ponte considerada em viga biapoiada	81
Figura IV.8 Nomenclatura utilizada para as dimensões das transversinas e das longarinas	81
Figura IV.9a Esforço cortante no apoio, devida ao veículo de peso unitário de cada classe, em função do comprimento do vão, no modelo biapoiado com tabuleiro de modelo antigo	83
Figura IV.9b Momento fletor no meio do vão, devido ao veículo de peso unitário de cada classe, em função do comprimento do vão, no modelo biapoiado com tabuleiro de modelo antigo	83
Figura IV.10a Distribuição de freqüências do esforço cortante devido ao tráfego real no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 98,8kN$; $s = 56,0kN$)	85
Figura IV.10b Distribuição de freqüências do esforço cortante devido ao tráfego real, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 102kNm$; $s = 57,8kNm$)	86
Figura IV.10c Distribuição de freqüências do momento fletor positivo devido ao tráfego real, no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 190kNm$; $s = 110kNm$)	86
Figura IV.10d Distribuição de freqüências do momento fletor positivo devido ao tráfego real, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 164kNm$; $s = 94,3kNm$)	87

Figura IV.10e Distribuição de freqüências do momento fletor negativo devido ao tráfego real, no sistema em balanço com 2,5m de vão e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 159kNm$; $s = 80,9kNm$)	87
Figura IV.10f Distribuição de freqüências do momento fletor negativo devido ao tráfego real, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 127kNm$; $s = 80,0kNm$)	88
Figura IV.11a Esforço cortante no apoio, devido a cada veículo-tipo, em função do comprimento do vão, no sistema biapoiado em tabuleiro de modelo antigo	89
Figura IV.11b Momento fletor no meio do vão, devido a cada veículo-tipo, em função do comprimento do vão, no sistema biapoiado de tabuleiro antigo	89
Figura IV.12a Distribuição de freqüências da razão entre os esforços cortantes devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,299$; $s = 0,169$)	90
Figura IV.12b Distribuição de freqüências da razão entre os esforços cortantes devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,280$; $s = 0,159$)	90
Figura IV.12c Distribuição de freqüências da razão entre os momentos fletores positivos devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,263$; $s = 0,152$)	91
Figura IV.12d Distribuição de freqüências da razão entre os momentos fletores positivos devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,283$; $s = 0,162$)	91
Figura IV.12e Distribuição de freqüências da razão entre os momentos fletores negativos devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema com balanço de 2,5m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,385$; $s = 0,197$)	92

Figura IV.12f Distribuição de freqüências da razão entre os momentos fletores negativos devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,286; s = 0,181$)	92
Figura IV.13 Distribuição de freqüências das classes de veículos no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo do DNER, considerando apenas solicitações maiores ou iguais a 75% dos efeitos do carregamento Classe 36	95
Figura IV.14a Distribuição de freqüências do esforço cortante, relativamente ao carregamento Classe 36, no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo, considerando os veículos mais pesados ($\bar{X} = 0,786; s = 0,040$)	96
Figura IV.14b Distribuição de freqüências do momento fletor positivo, relativamente ao carregamento Classe 36, sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo, considerando os veículos mais pesados ($\bar{X} = 0,762; s = 0,035$)	96
Figura V.1a Distribuições de probabilidade ajustadas ao histograma de esforços cortantes na estrutura-exemplo, considerando todos os registros ($\bar{X} = 98,8kN; s = 56,0kN$)	98
Figura V.1b Distribuições de probabilidade ajustadas ao histograma de momentos fletores positivos na estrutura-exemplo, considerando todos os registros ($\bar{X} = 190kNm; s = 110kNm$)	99
Figura V.2a Teste de qui-quadrado aplicado ao histograma de esforços cortantes da estrutura-exemplo, considerando todos os veículos	100
Figura V.2b Teste de qui-quadrado aplicado ao histograma de momentos fletores da estrutura-exemplo, considerando todos os veículos	101
Figura V.3 Teste de Kolmogorov-Smirnov aplicado ao histograma de momentos fletores da estrutura-exemplo, considerando todos os veículos	102
Figura V.4a Teste de qui-quadrado aplicado ao histograma de esforços cortantes da estrutura-exemplo, considerando os veículos mais pesados	103
Figura V.4b Teste de qui-quadrado aplicado ao histograma de momentos fletores da estrutura-exemplo, considerando os veículos mais pesados	103

Figura V.5a Distribuição normal ajustada ao histograma de esforços cortantes na estrutura-exemplo, considerando todos os veículos ($\mu = 98,8kN$; $\sigma = 56,0kN$)	105
Figura V.5b Distribuição normal ajustada ao histograma de momentos fletores positivos na estrutura-exemplo, considerando todos os veículos ($\mu = 190kNm$; $\sigma = 110kNm$)	105
Figura V.6a Distribuição de Gumbel ajustada ao histograma de esforços cortantes na estrutura-exemplo, considerando os veículos mais pesados ($\mu = 260kN$; $\sigma = 13,3kN$)	106
Figura V.6b Distribuição de Gumbel ajustada ao histograma de momentos fletores positivos na estrutura-exemplo, considerando os veículos mais pesados ($\mu = 552kNm$; $\sigma = 25,2kNm$)	106
Figura V.7a Distribuições de máximos dos esforços cortantes na estrutura-exemplo	107
Figura V.7b Distribuições de máximos dos momentos fletores positivos na estrutura-exemplo	108
Figura V.8a Variação dos valores representativos das extrapolações dos esforços cortantes, na estrutura-exemplo	110
Figura V.8b Variação dos valores representativos das extrapolações dos momentos fletores, na estrutura-exemplo	111
Figura V.9a Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema biapoiado, com tabuleiro de modelo antigo, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36	113
Figura V.9b Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema contínuo de dois vãos, com tabuleiro de modelo antigo, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36	114
Figura V.9c Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema em balanço, com tabuleiro de modelo antigo, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36	114
Figura V.9d Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema biapoiado, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36	115

Figura V.9e Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema biapoiado, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 45	115
Figura V.9f Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema contínuo de dois vãos, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36	116
Figura V.9g Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema contínuo de dois vãos, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 45	116
Figura V.9h Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema em balanço, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36	117
Figura V.9i Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema em balanço, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 45	117
Figura V.10a Valores-alvo dos esforços cortantes nos sistemas com tabuleiro de modelo antigo	120
Figura V.10b Valores-alvo dos momentos fletores positivos nos sistemas com tabuleiro de modelo antigo	120
Figura V.10c Valores-alvo dos momentos fletores negativos nos sistemas em balanço, com tabuleiro de modelo antigo	121
Figura V.10d Valores-alvo dos momentos fletores negativos nos sistemas contínuos de dois vãos, com tabuleiro de modelo antigo	121
Figura V.10e Valores-alvo dos esforços cortantes nos sistemas com tabuleiro de modelo antigo	122
Figura V.10f Valores-alvo dos momentos fletores positivos nos sistemas com tabuleiro de modelo atual	122
Figura V.10g Valores-alvo dos momentos fletores negativos nos sistemas em balanço, com tabuleiro de modelo atual	123
Figura V.10h Valores-alvo dos momentos fletores negativos nos sistemas contínuos de dois vãos, com tabuleiro de modelo atual	123
Figura A.1 Encaixe da carreta num <i>dolly</i> de um eixo, para torná-la rebocável, alterando o tipo de engate (www.pastre.com.br)	134

Figura A.2 <i>Dolly</i> com engate tipo A, de dois eixos, com as ligações vertical (quinta roda indicada pela seta) e horizontal (barra) (www.pastre.com.br)	134
Figura A.3 Conexão reboque: engate tipo C (www.hunkstruckpictures.com)	134
Figura A.4 (a) engate tipo A (barras convergentes); (b) engate tipo C (barras paralelas); (c) engate tipo B (pino-rei e quinta roda) (www.guiadotrc.com.br)	135
Figura B.1 Treminhões (www.mercedes-benz.com.br , www.dnit.gov.br)	141
Figura B.2 Bitrem (www.goydo.com.br)	142
Figura B.3 Tritrem (SILVEIRA, G. L. <i>et al.</i> , 2004)	143
Figura B.4 Rodotrem (www.hunkstruckpictures.com)	143
Figura B.5 Fatores de equivalência dos caminhões por tonelada (com PBT/PBTC)	148
Figura C.1a Distribuição do peso por eixo simples de rodas simples em P51 ($\bar{X} = 47,7kN$; $s = 23,4kN$)	151
Figura C.1b Distribuição do peso por eixo simples de rodas duplas em P51 ($\bar{X} = 64,7kN$; $s = 39,8kN$)	151
Figura C.1c Distribuição do peso por eixo <i>tandem</i> duplo em P51 ($\bar{X} = 109kN$; $s = 55,0kN$)	152
Figura C.1d Distribuição do peso por eixo <i>tandem</i> triplo em P51 ($\bar{X} = 207kN$; $s = 78,4kN$)	152
Figura C.2 Comparação entre os pesos médios dos eixos no posto P51 e em todos os postos	153
Figura C.3a Histograma de peso da classe O2C ($\bar{X} = 108kN$; $s = 71,4kN$)	153
Figura C.3b Histograma de peso da classe O3C ($\bar{X} = 174kN$; $s = 139kN$)	154
Figura C.3c Histograma de peso da classe 2C ($\bar{X} = 56,9kN$; $s = 38,4kN$)	154
Figura C.3d Histograma de peso da classe 3C ($\bar{X} = 145kN$; $s = 116kN$)	154
Figura C.3e Histograma de peso da classe 2S2 ($\bar{X} = 174kN$; $s = 134kN$)	155
Figura C.3f Histograma de peso da classe 2S3 ($\bar{X} = 334kN$; $s = 252kN$)	155
Figura C.4a Histograma de peso da classe O2C em P51 ($\bar{X} = 121kN$; $s =$ $61,9kN$)	155

Figura C.4b Histograma de peso da classe O3C em P51 ($\bar{X} = 158kN$; $s = 114kN$)	156
Figura C.4c Histograma de peso da classe 2C em P51 ($\bar{X} = 64,4kN$; $s = 41,7kN$)	156
Figura C.4d Histograma de peso da classe 3C em P51 ($\bar{X} = 148kN$; $s = 118kN$)	156
Figura C.4e Histograma de peso da classe 2S2 em P51 ($\bar{X} = 166kN$; $s = 122kN$)	157
Figura C.4f Histograma de peso da classe 2S3 em P51 ($\bar{X} = 334kN$; $s = 248kN$)	157
Figura C.5a Distribuição de velocidades: veículos leves	158
Figura C.5b Distribuição de velocidades: utilitários	158
Figura C.5c Distribuição de velocidades: ônibus	158
Figura C.5d Distribuição de velocidades: caminhões monolíticos e reboques	159
Figura C.5e Distribuição de velocidades: semi-reboques	159
Figura C.6a Distribuição de velocidades em P51: veículos leves	159
Figura C.6b Distribuição de velocidades em P51: utilitários	160
Figura C.6c Distribuição de velocidades em P51: ônibus	160
Figura C.6d Distribuição de velocidades em P51: caminhões rígidos e reboques	160
Figura C.6e Distribuição de velocidades em P51: semi-reboques	161
Figura C.7 Comparação entre as velocidades médias dos veículos de P51 e de todos os Postos de Monitoramento	161

Índice de Tabelas

Tabela II.1 Classes de veículos rodoviários na base de dados do DNIT	14
Tabela II.2 PBT/PBTC das classes de veículos (www.dnit.org.br)	16
Tabela II.3 Localização dos Postos de Monitoramento	20
Tabela II.4 Total de registros mensais de dados nos Postos de Monitoramento, no período de 35 meses	21
Tabela II.5 Valores usados das dimensões dos veículos conforme a Figura II.18	33
Tabela II.6 Freqüências de ocorrência dos pesos dos veículos considerados	38
Tabela II.7a Características dos veículos-tipo da NB 6 (1960)	39
Tabela II.7b Características dos veículos-tipo da NB 6 (1960)	40
Tabela II.8a Características dos veículos-tipo da NBR-7188 (1982)	41
Tabela II.8b Características dos veículos-tipo da NBR-7188 (1982)	41
Tabela III.1 Valores dos parâmetros de cada distribuição pelo método dos momentos	56
Tabela IV.1 Dimensões dos elementos estruturais (m)	73
Tabela IV.2 Esquemas estruturais e linhas de influência consideradas	75
Tabela IV.3a Larguras efetivas de mesa nos modelos estruturais com tabuleiro de modelo antigo	81
Tabela IV.3b Larguras efetivas de mesa nos modelos estruturais com tabuleiros de modelo atual	82
Tabela IV.4a Valores dos esforços devidos aos veículos de peso unitário no modelo biapoiado em tabuleiro de modelo antigo, com vão de $10m$	84
Tabela IV.4b Valores dos esforços devidos aos veículos de peso unitário no modelo biapoiado em tabuleiro de modelo atual, com vão de $10m$	84
Tabela IV.5 Valores dos esforços devidos aos veículos normativos no modelo biapoiado com tabuleiro de modelo antigo, com vão de $10m$	89
Tabela IV.6 Valores de peso para gerar 75% do esforço do veículo-tipo Classe 36 no sistema biapoiado com $10m$ de vão e tabuleiro de modelo antigo	94
Tabela V.1 Valores dos parâmetros de locação e escala das curvas ajustadas	107
Tabela V.2a Valores representativos das extrapolações de esforço cortante (kN) na estrutura-exemplo	109
Tabela V.2b Valores representativos das extrapolações de momento fletor (kNm) na estrutura-exemplo	109
Tabela B.1 Fatores de equivalência de cargas no Brasil	147

Lista de símbolos

Símbolos romanos

a	parâmetro de locação
a_r	momento amostral abstrato de ordem r centrado na média
a_3	momento amostral abstrato de 3 ^a ordem ou coeficiente de assimetria amostral
a_4	momento amostral abstrato de 4 ^a ordem ou coeficiente de curtose amostral
b	parâmetro de escala
b_f	largura total da mesa da longarina
b_t	largura da transversina
b_w	largura da alma da longarina
c, d	parâmetros de forma
$c_{1-\kappa, F}$	valor da distribuição de qui-quadrado onde a probabilidade é igual a $(1 - \kappa)$
$c_{\kappa, F}$	valor da distribuição de qui-quadrado onde a probabilidade é igual a κ
D	discrepância do teste de Kolmogorov-Smirnov
d_i	densidade de probabilidade do intervalo de classe i
e	base do sistema natural de logaritmos
e_i	freqüências teóricas (esperadas) do modelo probabilístico assumido
f_i	freqüência da classe i
$f_{i, \%}$	freqüência percentual da classe i
f_X	função densidade de probabilidade ou distribuição parente
f_{Y_n}	função densidade de probabilidade da variável Y_n
F_i	freqüência acumulada da classe i
$F_{i, \%}$	freqüência percentual acumulada da classe i

F_k	valor característico de uma ação; frequência acumulada no k -ésimo intervalo
F_X	função densidade acumulada de probabilidade da variável inicial
F_{Y_n}	função densidade acumulada de probabilidade da variável Y_n
h	altura total da longarina
h_t	altura da transversina
i, j, r	contadores
k	número de intervalos do histograma
L	comprimento de vão
m_r	momento amostral de ordem r centrado na média
m'_r	momento amostral de ordem r centrado na origem
m'_1	momento amostral de 1ª ordem centrado na origem ou valor médio amostral
m_2	momento amostral de 2ª ordem centrado na média ou variância amostral
n	tamanho da amostra
$n_{\bar{T}}$	tamanho equivalente da amostra, usada para extrapolação correspondente ao período de retorno \bar{T}
p	probabilidade estimada de ocorrência de um evento em uma tentativa de Bernoulli
q	probabilidade estimada de não-ocorrência de um evento em uma tentativa de Bernoulli
$P(X = x)$	probabilidade de a variável aleatória X assumir o valor x
s	desvio padrão amostral
S_i	seqüência dos i últimos intervalos de um histograma
s^2	variância amostral
\bar{T}	período de retorno
t_f	espessura da mesa da longarina ou espessura da laje
u	número de estatísticas fornecidas à distribuição em análise para cálculo do número de graus de liberdade no teste de qui-quadrado
x	variável independente nas distribuições de probabilidade

x_{med}	mediana da distribuição parente
x_{mod}	moda da distribuição parente
X	variável amostral ou aleatória inicial
\bar{X}	valor médio amostral
X_i	valor i tomado pela variável amostral
x_{inf}	extremo inferior de integração
x_{sup}	extremo superior de integração
y	variável independente na distribuição de valores máximos
y_{med}	mediana da distribuição de valores máximos
y_{mod}	moda da distribuição de valores máximos
Y_n	variável aleatória que representa os valores extremos da variável inicial X no período de observação, com amostra de tamanho n
$Y_{n_{\bar{T}}}$	variável aleatória que representa os valores extremos da variável inicial X extrapolada ao período de retorno \bar{T}
z	valor máximo característico da distribuição parente
$z_{\bar{T}}$	valor máximo característico extrapolado da distribuição parente

Símbolos gregos

α_r	momento populacional abstrato de ordem r centrado na média
α_3	momento populacional abstrato de 3 ^a ordem ou coeficiente de assimetria populacional
α_4	momento populacional abstrato de 4 ^a ordem ou coeficiente de curtose populacional
Δt	período de coleta de dados
Δx_i	amplitude do intervalo de classe i
γ	número de Euler
Γ	função gama
φ	coeficiente de impacto da NBR 7187 (2003)

κ	nível de significância
μ	valor médio populacional
μ_r	momento populacional de ordem r centrado na média
$\mu_{Y_{nT}}$	valor médio da distribuição de máximos extrapolada ao período de retorno \bar{T}
μ'_r	momento populacional de ordem r centrado na origem
μ'_1	momento populacional de 1ª ordem centrado na origem ou valor médio populacional
μ_2	momento populacional de 2ª ordem centrado na média ou variância populacional
ν	número de graus de liberdade da distribuição de qui-quadrado
χ^2	soma de qui-quadrado
σ	desvio padrão populacional
σ^2	variância populacional

Lista de siglas

Sigla	Significado
ABEIVA	Associação Nacional das Empresas Importadoras de Veículos Automotores
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANFIR	Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CVC	Combinação de Veículos de Carga
CVP	Combinação de Veículos de Passageiros
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
PBT	Peso Bruto Total
PBTC	Peso Bruto Total Combinado
SRD	eixo simples de rodas duplas
SRS	eixo simples de rodas simples
TMD	tráfego médio diário
TD	eixo <i>tandem</i> duplo
TT	eixo <i>tandem</i> triplo

I Introdução

I.1 Motivação

O desenvolvimento do tráfego de veículos no Brasil tem se caracterizado pela multiplicidade de configurações dos veículos, bem como o acréscimo de seu peso bruto total e seu volume de tráfego.

Para levar em conta o crescimento do peso dos veículos, a norma brasileira de cargas móveis para pontes rodoviárias, NBR 7188 (1982), antiga NB 6 (1960), evoluiu no sentido de substituir os veículos-tipo de 12, 24 e 36 toneladas por classes mais pesadas (atualmente 12, 30 e 45 toneladas), aumentando também os valores das “cargas de multidão” (dadas em unidade de força por m^2) que acompanham o veículo-tipo, para simular os efeitos da passagem simultânea de veículos mais leves na ponte. A configuração do veículo, no entanto, foi convenientemente mantida. Trata-se de um veículo de 3 eixos, copiado das antigas normas alemãs, para o qual foram elaboradas tabelas utilizadas durante décadas na prática de projetos para determinação das envoltórias de esforços em vigas. Com o desenvolvimento dos métodos numéricos de cálculo e a ampla comercialização dos programas computacionais específicos para análise estrutural de pontes, aquelas tabelas não são mais usadas e, conseqüentemente, desaparece a necessidade de se manter a configuração do veículo-tipo.

Uma estrutura cujo projeto foi elaborado segundo as normas oficiais é considerada segura, pois idealmente os coeficientes de segurança foram determinados, por meio de métodos probabilísticos, de modo a garantir uma pequena probabilidade de falha. Quando não se têm dados estatísticos sobre as ações, utilizam-se carregamentos idealizados, como é o caso da NBR 7188, e coeficientes de segurança determinados a partir de distribuições estatísticas também idealizadas.

Este trabalho constitui o primeiro estudo de uma linha de pesquisa que pretende contribuir com a modernização das normas de cargas de veículos no Brasil. Tratando estas cargas como variáveis aleatórias no contexto do método semi-probabilístico de projeto, denominado no Brasil método dos estados limites, pretende-se obter modelos de cargas de veículos que representem o tráfego real e efetuar calibração de novos coeficientes de segurança.

No que se refere ao desenvolvimento dos modelos de carga, prevê-se um extenso programa de trabalho, cujas etapas são resumidas a seguir:

1. Seleção dos sistemas estruturais representativos das obras de arte existentes na malha rodoviária brasileira e das tendências das obras a serem projetadas no futuro.
2. Monitoração do tráfego real e posterior estudo estatístico envolvendo as seguintes variáveis: classificação dos veículos por número de eixos, distâncias entre eixos, peso total dos veículos e sua distribuição por eixo, comprimento dos veículos, espaçamento entre veículos, velocidade e densidade de veículos por faixa de rolamento.
3. Simulação de situações de tráfego tais como escoamento livre com um ou mais veículos sobre a pista e engarrafamentos, que reproduzam as condições reais.
4. Cálculo dos efeitos dinâmicos do tráfego real em pontes representativas das obras brasileiras considerando diferentes comprimentos de vão, números de faixas de tráfego e classes de rodovia. Os efeitos a serem calculados são esforços solicitantes em seções transversais críticas dos elementos estruturais das obras representativas.
5. Extrapolação dos efeitos calculados para um determinado período de retorno.
6. Busca, através de processos de otimização, de modelos de carga, compostos de forças concentradas e distribuídas, que reproduzam os efeitos do tráfego real levando em conta os níveis de probabilidade selecionados.

Os modelos de carga assim desenvolvidos substituiriam o carregamento de projeto constante atualmente na NBR 7188, devendo estar sujeitos a periódicas recalibrações em função de novos dados de tráfego e de sua própria evolução.

Há pouco tempo foi reativada a operação de alguns dos Postos de Monitoramento, Contagem e Pesagem de veículos espalhados pelo país. O Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT) disponibiliza atualmente em seu sítio na internet (www.dnit.gov.br) os resultados das medições efetuadas entre dezembro de 1999 e outubro de 2002 em 15 Postos de Monitoramento espalhados pelo Brasil.

Como estes dados se referem a apenas alguns pontos da malha viária brasileira, não podem chegar a ser altamente conclusivos e deverão ser ampliados futuramente. Porém, já são indícios da representação atual do tráfego, pois refletem o carregamento real circulante atualmente nas rodovias brasileiras.

Com a reativação e publicidade dos estudos de tráfego, surgem novas perspectivas com relação à modelagem das cargas móveis; pretende-se avançar nas etapas mencionadas em direção ao desenvolvimento de modelos de carga de veículos no Brasil.

I.2 Objetivos e Metodologia

O principal objetivo deste trabalho é a obtenção dos valores característicos de esforços solicitantes nas pontes devidos ao tráfego de veículos reais, os quais deverão, posteriormente, ser reproduzidos por modelos de cargas móveis.

Como segundo objetivo tem-se a comparação entre os efeitos do tráfego real e do idealizado pelas normas brasileiras NB 6 (1960) e NBR 7188 (1982), para se verificar a segurança de algumas obras de arte corriqueiras no Brasil.

Para cumprir estes objetivos, o presente trabalho aborda, com algumas restrições, os itens 1 a 5 anteriores, da seguinte forma:

(item 1) Os sistemas estruturais selecionados para este trabalho incluem pontes em grelha, com duas longarinas de seção aberta e transversinas de apoio e intermediárias, com as seguintes configurações: biapoiado, em balanço e dois vãos contínuos. Os comprimentos dos vãos adotados são de 10m, 20m, 30m e 40m para os sistemas biapoiados e contínuos, e de 2,5m, 5m, 7,5m e 10m para os sistemas em balanço.

(item 2) Os dados dos Postos de Monitoramento do DNIT (www.dnit.gov.br) são fornecidos em planilhas mensais, das quais é possível se obter as distribuições de frequência dos veículos por classe, do peso bruto dos veículos por classe, das cargas por eixo por classe e da velocidade. As informações sobre comprimento dos veículos, espaçamento entre eixos e entre veículos não estão disponíveis. Após um cuidadoso estudo dos dados oriundos de 15 Postos de Monitoramento, um deles foi selecionado como sendo representativo do conjunto para, então, se construir uma base de dados para este trabalho.

(item 3) Tendo em vista a ausência de dados referentes aos espaçamentos entre veículos e cruzamentos, foi considerada apenas a passagem de veículos isolados, em tráfego normal, nas pontes. A faixa de comprimentos dos vãos selecionada (até 40m) é perfeitamente compatível com esta situação. Para vãos curtos, a situação de acúmulo de veículos ou engarrafamento não é determinante.

(item 4) Para cada esquema estrutural selecionado, são determinados os esforços solicitantes críticos devidos à passagem dos veículos de cada classe da base de dados. Estes esforços são calculados estaticamente e o efeito dinâmico é considerado, neste trabalho, através do coeficiente de impacto indicado na NBR 7187 (2003), o qual é dependente apenas do comprimento do vão. Com os histogramas de frequência de peso dos veículos chega-se aos histogramas de esforços solicitantes críticos de cada sistema estrutural e de cada comprimento de vão.

(item 5) Funções densidade de probabilidade são ajustadas aos histogramas dos esforços solicitantes, os quais se referem ao período de coleta de dados. A extrapolação é necessária para estimar os efeitos em períodos de tempo equivalentes à vida útil das estruturas.

I.3 Revisão Bibliográfica

Esta Seção apresenta um resumo dos trabalhos de pesquisa que resultaram nos modelos de carga adotados atualmente nas normas de projeto: a norma europeia Eurocódigo 1 (2003), a norma americana AASHTO LRFD (1998) e a norma canadense OHBDC.

Estas normas de pontes rodoviárias estão calcadas em estudos de tráfego complexos, nos quais foram avaliadas várias características gerais dos veículos que circulam nas estradas de cada país.

O Eurocódigo 1 - parte 2, publicado como projeto de norma no *Comité Européen de Normalisation* (CEN) em 1995 como ENV 1991-3 e vigorando como norma EN 1991-2 a partir de 2003, define os modelos de cargas a serem usados no projeto de pontes ferroviárias, rodoviárias e passarelas.

Esses modelos foram selecionados e calibrados de forma a cobrir os efeitos do tráfego mais comum, com uma determinada margem de confiança. O Eurocódigo 1 é provavelmente o código normativo mais elaborado atualmente para o projeto de pontes (CALGARO, 1998).

Para pontes rodoviárias, o Eurocódigo 1 define quatro modelos de carga, LM1-4. O LM1 (*load model 1*) e o LM2 são os carregamentos principais, sendo que este último se destina a algumas verificações locais (ele cobre os efeitos dinâmicos do tráfego normal em pontes de pequeno vão), normalmente aplicado a tabuleiros ortotrópicos.

O LM3 e o LM4 são usados para algum projeto em particular, somente quando requerido pelo cliente; o LM4 representa o acúmulo de veículos no tabuleiro.

Também são considerados 5 modelos de verificação de fadiga (*Fatigue Load Models*, FLM1 a FLM5), bem como modelos de cargas horizontais (frenagem, aceleração, força centrífuga) e de cargas excepcionais (veículos pesados colocados em várias partes do tabuleiro, colisões com pilares etc.), e ainda modelos de carga em aterros.

A calibração original dos modelos de carga definidos no Eurocódigo 1 foi baseada em dados de tráfego registrados entre 1986 e 1987 na rodovia A6, próxima a Auxerre, na França, onde o tráfego é essencialmente internacional; por isso foi considerada representativa do tráfego em vários países da Europa (CALGARO, 1998).

A recalibração dos modelos, a partir de novos dados obtidos entre os anos de 1997 e 2001, acabou por confirmar os valores-alvo dos esforços obtidos na calibração original (PRAT, 2001).

O LM1 e o LM2 foram selecionados e calibrados de forma que seus efeitos reproduzam com precisão os efeitos totais do tráfego real, incluindo amplificação dinâmica, para diversas superfícies de influência em sistemas estruturais com vãos entre 5m e 200m. Os passos para este procedimento são os seguintes:

- seleção de um nível de probabilidade para os valores característicos;
- determinação dos valores-alvo de cada esforço, levando em conta o nível de probabilidade considerado;
- pesquisa do modelo apropriado, que deve ser capaz de reproduzir adequadamente (precisamente) os valores-alvo, através da pesquisa operacional.

A configuração mais satisfatória é conseguida com o teste de sucessivos modelos de carga: os melhores são aqueles que minimizam o módulo da máxima diferença entre a razão dos valores-alvo e os alcançados pelos modelos, e a unidade. Vários modelos foram testados; concluiu-se (CALGARO, 1998) que o modelo mais apropriado foi o que incorporou tanto as cargas concentradas quanto as distribuídas. Foram necessários dois eixos para a reprodução precisa dos valores-alvo, e a intensidade da carga uniformemente distribuída foi considerada como uma função decrescente do comprimento carregado. A magnitude mínima destas cargas distribuídas foi fixada em $2,5kN/m^2$, o mínimo encontrado nos códigos normativos dos países europeus.

O sistema final considerado, recalibrado e atualmente em vigor, considera a faixa de tráfego dividida em faixas hipotéticas com $3m$ de largura, as quais devem ser todas carregadas. O LM1 é composto por uma carga uniformemente distribuída no tabuleiro de $2,5kN/m^2$, exceto na faixa nº 1, carregada com $9,0kN/m^2$, além de eixos *tandem* duplo colocados em no mínimo 3 faixas hipotéticas, que podem ou não ser adjacentes. O peso de cada eixo tandem duplo é $600kN$ na faixa 1, $400kN$ na faixa 2 e $200kN$ na faixa 3. O sistema é colocado na posição mais desfavorável ao esforço analisado. O LM2 consta de apenas um eixo (simples) de $400kN$, destinado a verificações locais, principalmente em tabuleiros ortotrópicos. O LM1 e o LM2, na faixa hipotética nº 1, são mostrados na Figura I.1.

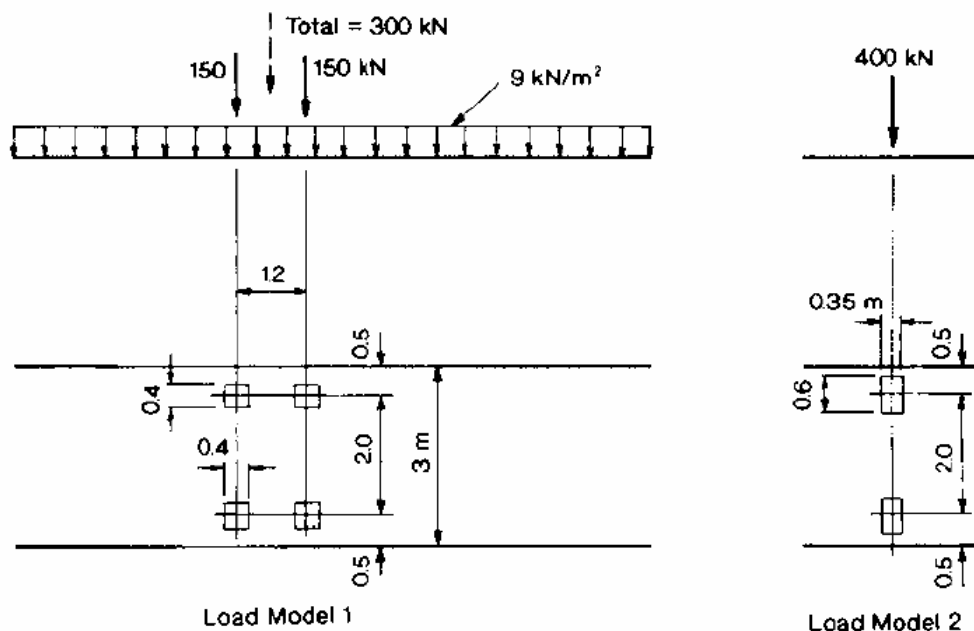


Figura I.1 Modelos de carga LM1 e LM2 do Eurocódigo 1 (O'CONNOR *et al.*, 2000)

Os estudos elaborados por NOWAK(1993) e DAS (1997) para a obtenção do veículo de carga da norma AASHTO LRFD constituíram-se de uma base de dados com 9250 caminhões selecionados, durante um período de 2 semanas: somente foram medidos aqueles que pareciam ser bastante pesados. A base de dados incluiu as dimensões e as cargas (total e por eixo) dos caminhões. Para cada caminhão medido, foram calculados o momento fletor e o esforço cortante em vários vãos. Foram considerados o sistema estrutural biapoiado (linhas de influência de esforço cortante e momento fletor) e o contínuo de dois vãos (linha de influência de momento fletor negativo), com vãos entre $9m$ e $60m$.

Os esforços máximos para vários períodos de recorrência foram determinados por extrapolações. O esforço máximo em uma faixa é causado por um caminhão simples ou por dois ou mais caminhões em seqüência. Para ocorrência múltipla, os parâmetros considerados são as distâncias entre caminhões e o grau de correlação entre os seus pesos. Os efeitos máximos, para o caso de duas ou mais faixas, foram determinados através de simulações. Foram estudados também os fatores de distribuição transversal de cargas entre as longarinas.

O veículo da AASHTO, o HL93, é a superposição do antigo caminhão HS20 (com duas cargas concentradas de $145kN$ e uma de $35kN$) com uma carga uniformemente distribuída de $9,3kN/m$ (mostrado na Figura I.2), sendo que para vãos curtos é especificado um eixo de carga que substitui o veículo.

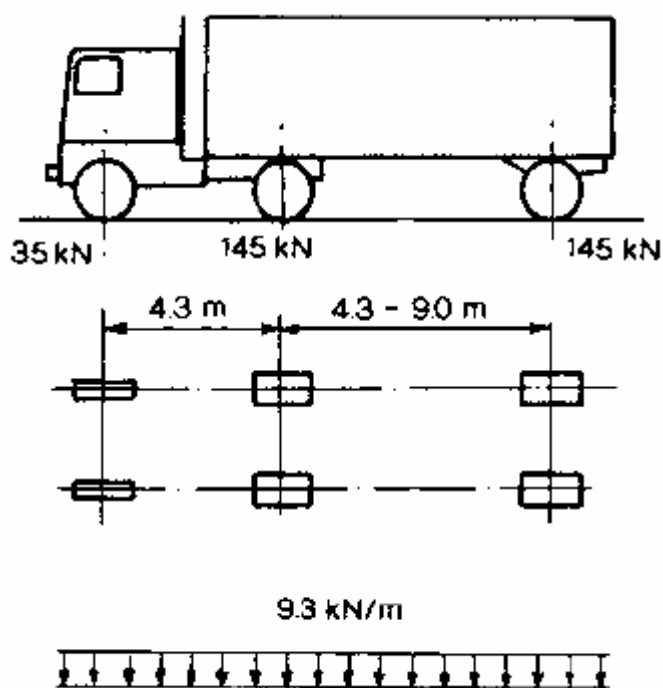


Figura I.2 Modelo de carga HL-93 da AASHTO (O'CONNOR *et al.*, 2000)

Em termos de estudos sobre a passagem de veículos pesados sobre as pontes no Brasil, destaca-se o trabalho de EL DEBS *et al.* (2002), que avalia as solicitações devidas à passagem das chamadas Combinações de Veículos de Carga (CVC) em pontes típicas da malha rodoviária do Estado de São Paulo e as compara aos esforços devidos às ações dos trens-tipo da norma brasileira. Os resultados deste estudo estão reproduzidos na Seção II.1.3 do presente trabalho.

I.4 Apresentação do Trabalho

O texto do trabalho, cujo escopo foi descrito na Seção I.2, é apresentado em capítulos com a formatação indicada a seguir.

No Capítulo II são mostrados os padrões rodoviários atuais do nosso país e algumas informações da base de dados utilizada. No Capítulo III faz-se um resumo de alguns conceitos básicos de Estatística que serão usados ao longo deste trabalho.

Do Capítulo IV constam os detalhes das modelagens consideradas, bem como das simplificações adotadas para a obtenção dos resultados, até os histogramas de esforços solicitantes devidos ao tráfego medido. Já o Capítulo V mostra os ajustes probabilísticos dos histogramas de solicitações e suas Estatísticas de Extremos, para se determinar os esforços característicos nas pontes analisadas. Apresenta ainda uma comparação entre os esforços devidos aos veículos reais e os normativos para estruturas representativas da malha viária nacional.

Por fim, no Capítulo VI são expostas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos desta linha de pesquisa.

II Tráfego de veículos pesados nas rodovias brasileiras

II.1 Veículos rodoviários pesados

II.1.1 Classes de veículos

Existem veículos com várias configurações diferentes trafegando nas estradas. Para se referenciar um determinado tipo de veículo, usam-se nomenclaturas especiais que o identificam univocamente no universo de configurações.

Um veículo é denominado *simples* ou *monolítico* quando formado por somente uma parte. Quando formado por duas ou mais partes (uma unidade tratora transportando uma ou mais unidades de carga), é denominado *composto*.

Um bom sistema de identificação deve contemplar algumas informações sobre o veículo: o número de partes que o constituem, a configuração dos eixos e o tipo de conexão as partes do veículo.

Esta última informação depende do tipo de engate entre as partes dos veículos. Existem basicamente dois tipos de conexão: tipo semi-reboque e tipo reboque. Na conexão tipo semi-reboque, chamada tecnicamente de *engate tipo B*, a unidade traseira (carreta) se engata na dianteira (tratora) pelo pino-rei e se apóia diretamente no prato articulado (denominado quinta roda) montado na unidade dianteira. A unidade tratora que disponibiliza a quinta roda chama-se *cavalo mecânico*; a Figura II.1 mostra dois deles. Os veículos compostos cuja unidade tratora é o cavalo mecânico são conhecidos como *semi-reboques* (Figura II.2).

A conexão tipo reboque é uma barra de tração que conecta o eixo, ou conjunto de eixos, da unidade anterior na unidade posterior. Os veículos compostos que utilizam esse princípio de tração são conhecidos como *reboques* (Figura II.3), sendo a unidade tratora um caminhão rígido convencional (Figura II.4).

Citam-se duas formas principais de classificar os veículos: a usada pelos órgãos rodoviários, como os DERs e o antigo DNER, e a de caráter técnico. A nomenclatura dos órgãos rodoviários é expedita: os veículos monolíticos e as ligações tipo reboque são representados pela letra C, enquanto as ligações semi-reboque são representadas pela letra S. Em ambos os casos, busca-se apenas informar o total de eixos de cada unidade; não há, nesse padrão, preferência em diferenciar seqüências de eixos isolados ou em conjunto.



Figura II.1 Cavalos mecânicos (www.scania.com.br, www.mercedes-benz.com.br), com a quinta roda indicada pela seta



Figura II.2 Veículo semi-reboque (www.pastre.com.br)



Figura II.3 Caminhões rígidos rebocando carretas (veículos tipo reboque) (www.mercedes-benz.com.br, WIDMER, 2002)



Figura II.4 Caminhões rígidos convencionais (www.mercedes-benz.com.br, www.pastre.com.br)

Quando se tratar de um veículo monolítico (ônibus ou caminhão), a nomenclatura rodoviária é codificada pelo número de eixos do veículo, seguido da letra C. No caso dos caminhões, não há confusão com os reboques, porque estes necessitam mais números, posteriores à letra, para caracterizar os eixos da carreta.

Em linhas gerais, a nomenclatura é uma seqüência de números e letras, geralmente intercalados, indicando as configurações da dianteira para a traseira do veículo. Para determinar o total de eixos de uma unidade de um veículo composto, somam-se todos os números compreendidos entre duas letras, ou seja, entre duas conexões – exceção se faz à primeira e à última unidade da combinação.

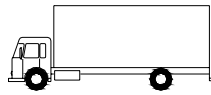
A nomenclatura utilizada atualmente pelo DNIT já contém algumas informações adicionais em relação ao padrão rodoviário geral. As ligações tipo semi-reboque podem ser representadas tanto pela letra I quanto pela letra S. A diferença está na configuração dos eixos da unidade posterior: a letra I representa eixos isolados ou conjuntos isolados de eixos da mesma espécie, e a letra S representa eixos não isolados (em conjunto), em *tandem* ou não. As definições de eixos em *tandem*, eixos não em *tandem* e eixos isolados serão feitas na Seção II.1.2.

As mesmas regras valem, em geral, para caminhões e ônibus; entretanto, para garantir unicidade, seus códigos são diferenciados com a incorporação da letra O inicial ao código destes.

Alguns exemplos de configurações possíveis de caminhões e ônibus são mostrados na Figura II.5, bem como os seus códigos segundo os padrões de nomenclatura rodoviário e técnico (www.dnit.gov.br, WIDMER, 2004). Informações sobre o padrão técnico de nomenclatura encontram-se no Anexo A.

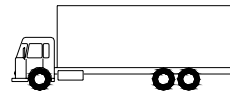
A base de dados utilizada neste trabalho (www.dnit.gov.br) classifica os veículos como indicado na Tabela II.1. Existem três classes indefinidas de veículos, denominadas *7rod*, *8rod* e *9rod*, consideradas na base de dados como semi-reboques. Considerando que se trata de abreviaturas de “rodados” (eixos), essas nomenclaturas podem englobar uma coleção considerável de veículos com configurações diferentes e mesmo número de eixos. Torna-se impossível apontar um único que represente satisfatoriamente cada uma dessas classes; na prática elas se juntam à classe *Outros*.

CAMINHÃO TOCO

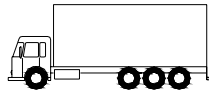


ROD: 2C
TÉCN: 2U

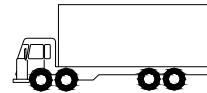
CAMINHÃO TRUCADO



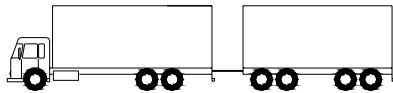
ROD: 3C
TÉCN: 3U



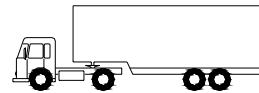
ROD: 4C
TÉCN: 4U



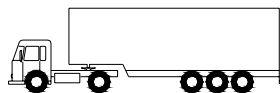
ROD: 4CD
TÉCN: 2-2U



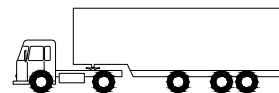
ROD: 3C4
TÉCN: 3UR4



ROD: 2S2
TÉCN: 2S2



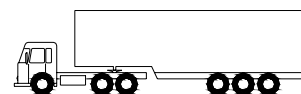
ROD: 2S3
TÉCN: 2S3



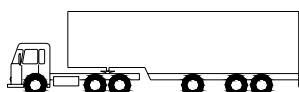
ROD: 2I12
TÉCN: 2S1e2



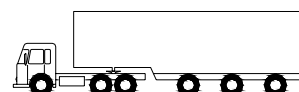
ROD: 3I2
TÉCN: 3S2e



ROD: 3S3
TÉCN: 3S3



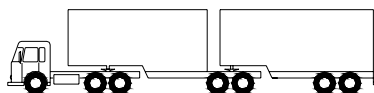
ROD: 3I12
TÉCN: 3S1e2



ROD: 3I3
TÉCN: 3S3e

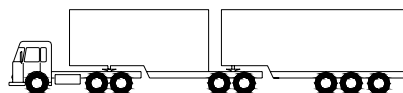
Figura II.5 Nomenclaturas de veículos

BITREM DE 7 EIXOS



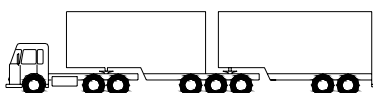
ROD: 3S2S2 / 3D4
TÉCN: 3S2B2

BITREM DE 8 EIXOS



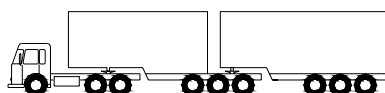
ROD: 3S2S3
TÉCN: 3S2B3

BITREM DE 8 EIXOS



ROD: 3S3S2
TÉCN: 3S3B2

BITREM DE 9 EIXOS



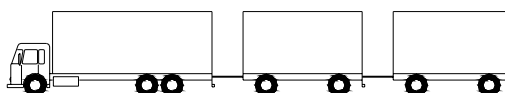
ROD: 3S3S3
TÉCN: 3S3B3

TRITREM



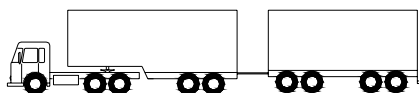
ROD: 3S2S2S2 / 3D6
TÉCN: 3S2B2B2

TREMINHÃO

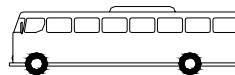


ROD: 3C2C2
TÉCN: 3UR2R2

RODOTREM



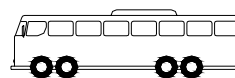
ROD: 3S2C4 / 3T6
TÉCN: 3S2A2S2



ROD: O2C
TÉCN: 2O



ROD: O3C
TÉCN: 3O



ROD: O4CD
TÉCN: 2-2O

ÔNIBUS ARTICULADO



ROD: 2S1
TÉCN: 2OS1

ÔNIBUS BIARTICULADO



ROD: 2S2
TÉCN: 2OS1B1

Figura II.5 (continuação) Nomenclaturas de veículos

Tabela II.1 Classes de veículos rodoviários na base de dados do DNIT

Tipo de veículo	Classes de veículos
<i>Leves</i>	Automóveis
<i>Utilitários</i>	Utilitários
<i>Ônibus</i>	O2C, O3C, O4CD
<i>Caminhões</i>	2C, 3C, 4C, 4CD, 2C2, 2C3, 3C2 e 3C3
<i>Semi-reboques</i>	2S1, 2S2, 2I2, 2S3, 2I12, 2I3, 3S1, 3S2, 3I2, 3S3, 3I12, 3I3, 7rod, 8rod, 9rod
<i>Outros</i>	Outros

Os reboques classificados foram adicionados aos caminhões monolíticos, formando a categoria *Caminhões*.

II.1.2 A Lei da Balança

O que se conhece como *Lei da Balança* é na realidade um conjunto de artigos do Código de Trânsito Brasileiro (CTB) e de Resoluções do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), que regulamentam as configurações dos veículos nas rodovias brasileiras. A Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, instituiu o CTB e outorgou ao CONTRAN o poder de regulamentar, entre outras, as configurações (pesos e dimensões) e a segurança dos veículos rodoviários. Alguns de seus aspectos básicos e suas alterações devem ser conhecidos e serão comentados a seguir.

O *Peso Bruto Total* (PBT), referido aos veículos monolíticos, é definido pela soma algébrica das cargas máximas permitidas em todos os seus eixos componentes. Quando se tratar de veículos compostos, usa-se o *Peso Bruto Total Combinado* (PBTC); a definição é a mesma, valendo para todos os eixos da combinação.

De acordo com a Resolução nº 12 do CONTRAN (06/02/1998), consideram-se *eixos em tandem* os eixos, de quatro pneumáticos cada, que constituam um conjunto integral de suspensão, podendo qualquer um deles ser ou não motriz. O conjunto de dois eixos consecutivos em *tandem* é chamado tecnicamente de *eixo tandem duplo*, e o de três, *eixo tandem triplo*. Não se faz o uso de configurações em *tandem* com mais de três eixos, tampouco de eixos *tandem* triplo em veículos rebocados.

Geralmente, nos eixos em *tandem* e nos eixos duplos especiais, a distância entre os dois planos verticais que contêm os centros das duas rodas consecutivas se situa entre 1,20m e 2,40m. Quando essa distância supera os 2,40m, os eixos estão *isolados* (AKISHINO, 2004); não podem ser tratados como um conjunto.

Existem configurações nas quais dois eixos consecutivos de quatro pneumáticos estão dispostos com distância entre 1,20m e 2,40m, mas *não constituem* um conjunto único de suspensão. Não podem ser considerados em *tandem*, tampouco isolados. Nesse caso, são chamados de *eixos não em tandem*; não serão de muita utilidade neste trabalho porque seus limites de peso são menores que os dos eixos em *tandem*.

Considera-se *eixo duplo especial* o conjunto de dois eixos, interligados por suspensão especial, no qual um deles é dotado de quatro pneumáticos e o outro de dois pneumáticos. Similarmente aos eixos em *tandem*, o enfoque do eixo duplo especial é dado apenas ao caso em que a distância entre eles situa-se entre 1,20m e 2,40m. Caso esta seja menor que 1,20m, o limite de peso é também menor; se for maior que 2,40m, os dois eixos são considerados isolados.

Os eixos isolados de 2 pneumáticos são também chamados de *eixos simples de rodas simples* (SRS) e os isolados de 4 pneumáticos, *eixos simples de rodas duplas* (SRD). O eixo duplo especial (DE) pode existir em duas configurações, simétricas uma da outra. Aparece somente nas classes O3C e O4CD.

A Figura II.6 ilustra os tipos de eixo considerados, bem como seus limites de carga, segundo a Resolução nº 12 do CONTRAN:

- eixo isolado de 2 pneumáticos (SRS): 60kN;
- eixo isolado de 4 pneumáticos (SRD): 100kN;
- eixo *tandem* duplo (TD): 170kN;
- eixo *tandem* triplo (TT): 255kN;
- eixo duplo especial (DE): 135kN.

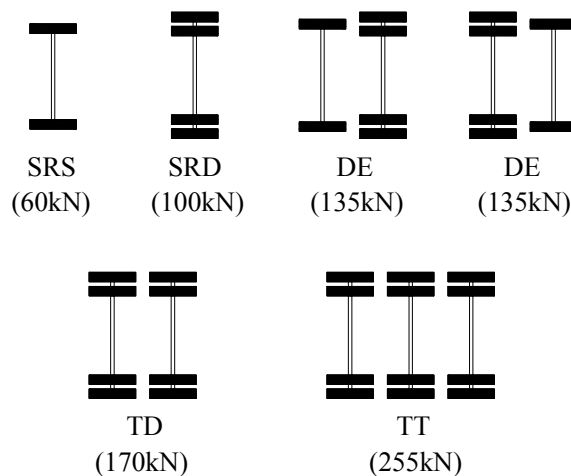


Figura II.6 Configurações de eixos e seus limites de peso

Antes da Resolução nº 12 do CONTRAN, estipulava-se que nenhum veículo poderia ter PBTC maior que 450kN. O Anexo B destaca os pontos mais importantes do histórico de alterações da legislação para permitir veículos compostos mais pesados.

Os limites de PBT/PBTC das classes de veículos constantes na base de dados do DNIT são apresentados na Tabela II.2.

Tabela II.2 PBT/PBTC das classes de veículos (www.dnit.org.br)

Classe (ver Figura II.5)	Número de eixos de cada tipo (ver Figura II.6)					Limite de peso (kN)
	SRS	SRD	DE	TD	TT	
O2C	1	1	0	0	0	160
O3C	1	0	1	0	0	195
O4CD	2	0	1	0	0	255
2C	1	1	0	0	0	160
3C	1	0	0	1	0	230
4C	1	0	0	0	1	315
4CD	2	0	0	1	0	290
2C2	1	3	0	0	0	360
2C3	1	2	0	1	0	430
3C2	1	2	0	1	0	430
3C3*	1	1	0	2	0	500
2S1	1	2	0	0	0	260
2S2	1	1	0	1	0	330
2I2	1	3	0	0	0	360
2S3	1	1	0	0	1	415
2I12	1	2	0	1	0	430
2I3**	1	4	0	0	0	460
3S1	1	1	0	1	0	330
3S2	1	0	0	2	0	400
3I2	1	2	0	1	0	430
3S3**	1	0	0	1	1	485
3I12**	1	1	0	2	0	500
3I3**	1	3	0	1	0	530
7rod	-	-	-	-	-	-
8rod	-	-	-	-	-	-
9rod	-	-	-	-	-	-
Outros	-	-	-	-	-	-

A classe 3C3 está destacada com um asterisco porque tinha PBTC maior que $450kN$ autorizado pelo Anexo I da Resolução nº 68 do CONTRAN (23/09/1998); supõe-se que, mesmo com o Anexo I revogado, ainda se permite informalmente a circulação dos veículos lá citados. As classes assinaladas com dois asteriscos têm PBTC maior que $450kN$ autorizado pela Resolução nº 184 do CONTRAN (21/10/2005), desde que tenham comprimento total maior que $17,50m$.

A Lei da Balança está sendo gradativamente alterada, ainda que por vezes de forma confusa, para acompanhar a evolução logística e tecnológica dos padrões rodoviários de nosso país. O perfil dos veículos de carga do século XXI, com caminhões mais rentáveis e eficientes, será bem diferente do perfil do século passado, quando predominaram os veículos monolíticos.

II.1.3 As CVC e a segurança das obras de arte

Quanto às solicitações, a compatibilidade da carga dos veículos com as cargas-limite das pontes pode ser, grosso modo, analisada por meio da carga distribuída por comprimento. Os maiores comprimentos e o maior número de eixos das CVC permitem uma boa distribuição das suas maiores cargas, resultando em solicitações inferiores aos semi-reboques 2S3 e 3S3, por exemplo. Exceção se faz ao caso dos rodotrens de menor tamanho, cujo impacto é bastante prejudicial às obras de arte – um rodotrem com $19,80m$ de comprimento chega a impor na obra de arte um carregamento de $37kN/m$. O bitrem de mesmo comprimento, com PBTC de $570kN$, tem uma relação de $29kN/m$. Um limite prático de referência para as cargas móveis distribuídas em pontes é o valor de $30kN/m$ (www.ntcelogistica.org.br).

De acordo com EL DEBS *et al.* (2002), os rodotrens de pequeno comprimento são incompatíveis com as pontes Classe 36, pois quando carregados, suas solicitações ultrapassam às do veículo-tipo em até 30%, dependendo da configuração estrutural; no caso da Classe 45, a superação do esforço normativo é em alguns casos de até 10%, exceto em vãos inferiores a $25m$ – na prática, portanto, também devem ser considerados incompatíveis com a Classe 45. Quando se aumenta o comprimento das CVC para $25m$, as solicitações produzidas tanto pelos rodotrens quanto pelos bitrens de 9 eixos ultrapassam em grau muito menor os valores resultantes do veículo-tipo Classe 36, para qualquer tipo de estrutura: esses veículos podem ser considerados compatíveis com as pontes Classe 45 e até mesmo com as pontes Classe 36.

Na maioria dos casos, os semi-reboques 3S3 basculantes curtos, de 13m a 14m de comprimento e 485kN de PBTC, que via de regra transporta cargas de elevado peso específico, podem ser tão ou mais danosos às estruturas das obras de arte do que CVC mais longas; isso mostra que o PBTC desse veículo, quando curto, realmente deve ser limitado a 450kN.

A passagem de veículos pesados com maior frequência e/ou excesso de peso sobre as pontes tende a acelerar a deterioração dos elementos estruturais; portanto, o controle de peso dos veículos, através das limitações nas suas cargas por eixo, é fundamental para preservar a integridade estrutural das pontes (EL DEBS *et al.*, 2002).

II.2 Monitoração do tráfego rodoviário

II.2.1 Tipos de monitoração

O DNIT avalia o tráfego pelos Postos de Pesagem, de Contagem e de Monitoramento. Os Postos de Pesagem efetuam a pesagem dos veículos em baixas velocidades, portanto sem os efeitos dinâmicos. Os Postos de Contagem têm como objetivo coletar os dados do fluxo de trânsito; existem no Brasil 121 deles (Figura II.7), sendo que apenas 26 operam normalmente.

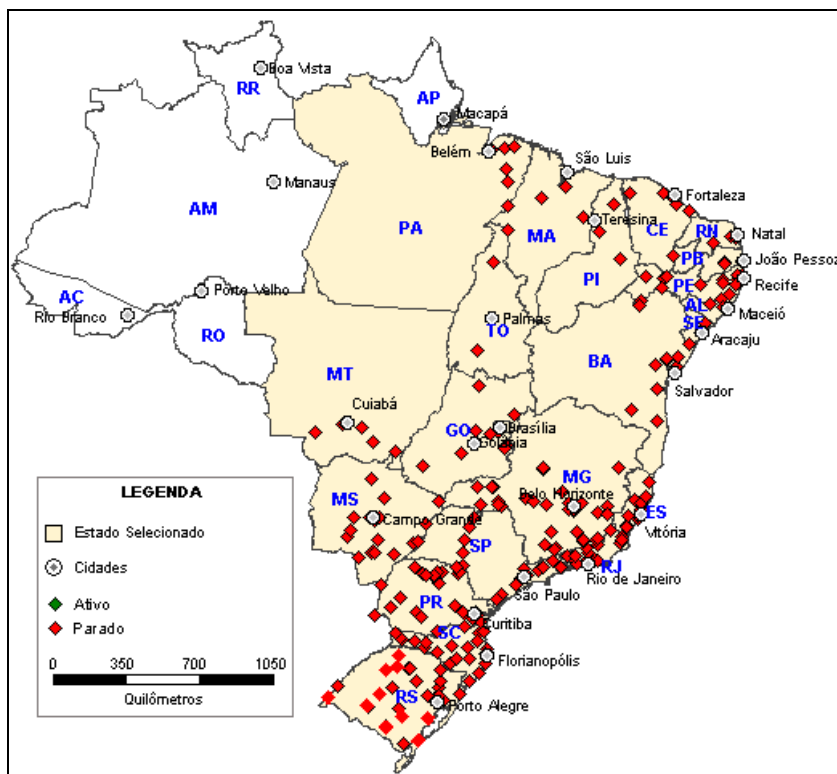


Figura II.7 Postos de Contagem do DNIT (www.dnit.gov.br)

Os Postos de Monitoramento objetivam o levantamento de dados relativos ao volume de tráfego, velocidades dos veículos e cargas por eixo. Existe um total de 100 deles no território nacional, entre os planejados e os em operação; a Figura II.8 mostra a sua distribuição pelo Brasil. Entretanto, o programa de coleta de dados está suspenso.

De acordo com o DNIT, esses dados, associados às características físicas dos trechos rodoviários, permitem um melhor conhecimento dos aspectos operacionais do tráfego nos principais eixos de transporte do país, subsidiando os estudos voltados para a definição das políticas de construção, manutenção e administração de rodovias.

Como as medições incluem as velocidades dos veículos, as cargas medidas pelos sensores nos Postos de Monitoramento incluem efeitos dinâmicos.

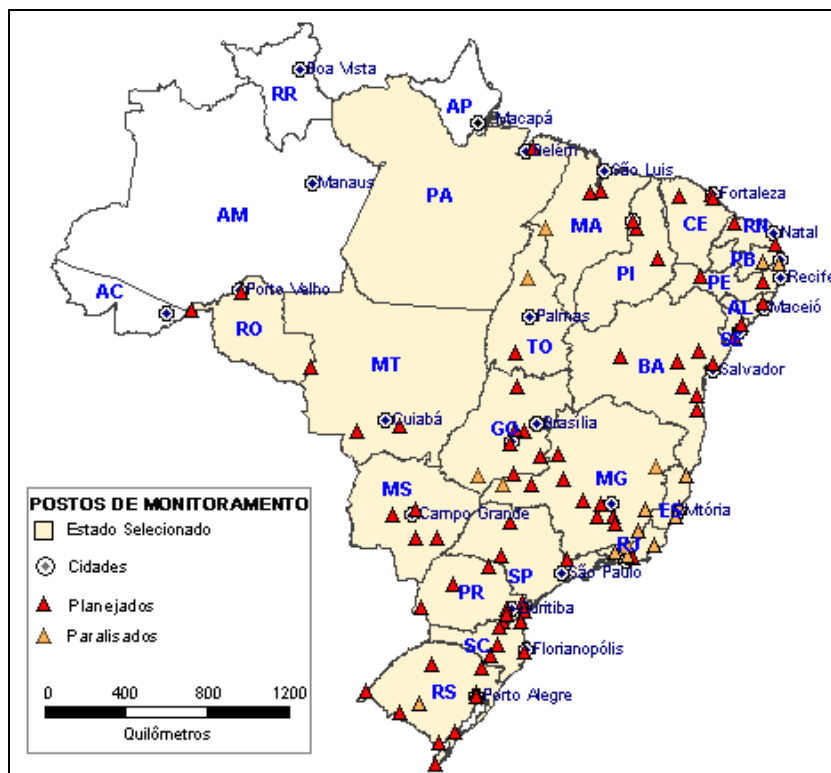


Figura II.8 Postos de Monitoramento do DNIT (www.dnit.gov.br)

II.2.2 Registros dos Postos de Monitoramento do DNIT

A base de dados usada neste trabalho compreende 315 planilhas com informações mensais, em rodovias federais, dos resultados das medições de tráfego, essencialmente volume, peso e velocidade, referidos a 15 Postos de Monitoramento espalhados pelo Brasil. Sem contar os veículos leves e utilitários, há um total de $2,1 \times 10^7$ registros. Os postos que apresentam dados disponíveis são mostrados na Tabela II.3.

Tabela II.3 Localização dos Postos de Monitoramento (ver Figura II.8)

Posto	Local	Rodovia	km
P51	Pedro Canário, ES	BR-101	26
P52	Serra, ES	BR-101	252
P53	Guarapari, ES	BR-101	335
P93	Cachoeira Alta, GO	BR-364	83
P08	Imperatriz, MA	BR-010	230
P40	Teófilo Otoni, MG	BR-116	291
P41	Leopoldina MG	BR-116	734
P43	Realeza, MG	BR-262	46
P48	Ituiutaba, MG	BR-365	784
P23	Magé, RJ	BR-493	23
P54	Serrinha, RJ	BR-101	20
P57	Barra do Pirai, RJ	BR-393	246
P89	Sapucaia, RJ	BR-393	151
P85	São Gabriel, RS	BR-290	408
P06	Colinas, TO	BR-153	156

Não foi possível conhecer os detalhes dos sensores utilizados e nem dos procedimentos de medição e coleta de dados disponibilizados pelo DNIT. De acordo com informações obtidas, via mensagem eletrônica, junto à Gerência de Operações do DNIT, as medições foram realizadas com o tráfego corrente por meio de células de carga instaladas sob o pavimento da rodovia. Com este tipo de sensores acoplados a um sistema de aquisição de dados, podem-se coletar as seguintes informações: velocidade de cada veículo, distância entre os eixos de cada veículo, força que cada eixo imprime sobre o pavimento e distância entre veículos.

A força de cada eixo sobre o pavimento é a carga estática do eixo afetada pelos efeitos dinâmicos oriundos da vibração vertical do veículo em movimento sobre o pavimento rugoso. Portanto, para se obter a carga estática por eixo a partir de medições com o veículo em movimento, são necessários procedimentos de calibração, dos quais não se têm informações. As planilhas disponibilizadas pelo DNIT tratam de:

- tráfego médio diário (TMD) por classe;
- peso total dos veículos por classe;
- peso por tipo de eixo dos veículos para cada classe;
- sobrecarga total e por eixo;

- velocidade dos veículos;
- distribuição dos veículos por faixa de rolamento;
- distribuição dos veículos no decorrer do tempo.

Nas planilhas não há informações sobre distâncias entre eixos dos veículos e nem sobre distâncias entre veículos.

Os dados disponíveis foram coletados entre dezembro de 1999 e outubro de 2002; entretanto, nenhum posto apresenta seqüência mensal ininterrupta de medições do início ao final do período de coleta de dados, como mostra a Tabela II.4.

Tabela II.4 Total de registros mensais de dados nos Postos de Monitoramento, no período de 35 meses

Posto	P06	P08	P23	P40	P41	P43	P48	P51	P52	P53	P54	P57	P85	P89	P93
Total de meses	07	06	34	17	31	03	13	32	21	33	29	33	31	09	16

As planilhas da base de dados com o *Tráfego Médio Diário por Classe* apresentam os totais mensais de veículos contados; somando todos os dados, de todos os Postos de Monitoramento, pode-se elaborar a distribuição mostrada na Figura II.9, que destaca a frequência relativa de cada classe de veículo.

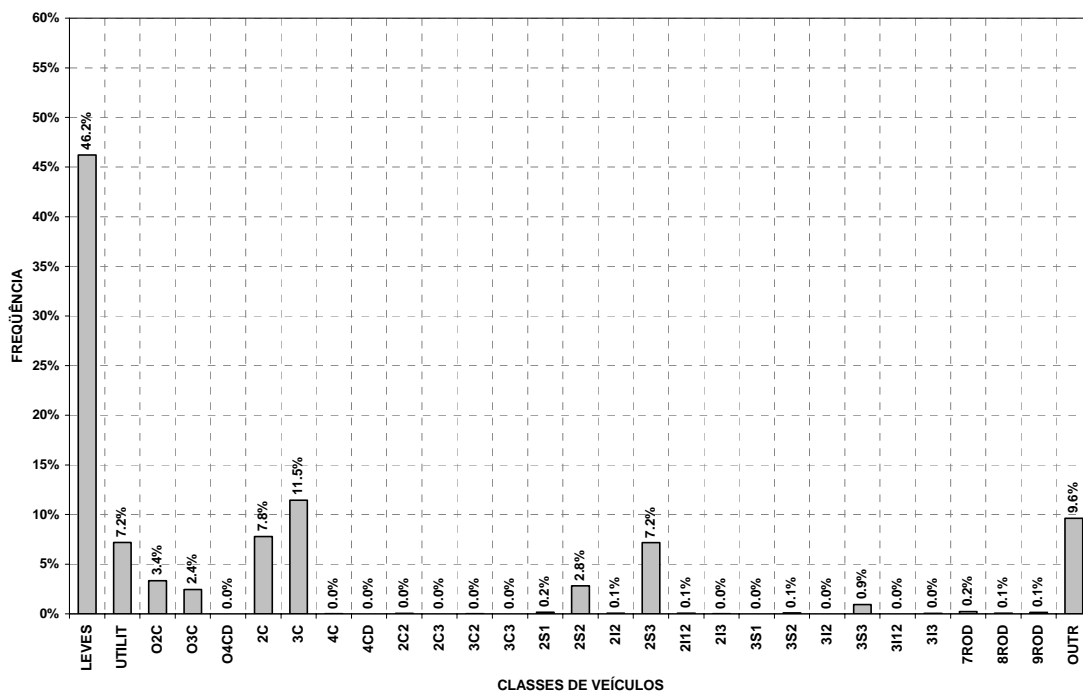


Figura II.9 Distribuição de frequências relativas das classes de veículos

Em geral, as classes de veículos denominadas *7rod*, *8rod* e *9rod* aparecem na base de dados somente a partir de 2001. Provavelmente as medições de 1999 e 2000 consideraram essas classes englobadas na categoria *Outros*.

Sem contar as classes de veículos *Outros*, *Leves* e *Utilitários*, verifica-se na Figura II.9 que os veículos pesados mais freqüentes são os das classes O2C, O3C, 2C, 3C, 2S2 e 2S3.

A reunião de todas as planilhas de *Freqüência de peso por tipo de eixo* permitiu a execução dos histogramas de peso para cada espécie de eixo considerada: simples de rodas simples (SRS), simples de rodas duplas (SRD), *tandem* duplo (TD) e *tandem* triplo (TT); ver a Figura II.6. As Figuras II.10a-d mostram essas distribuições, bem como as cargas máximas legais em cada configuração.

A distribuição de peso dos eixos de rodas simples (Figura II.10a) é unimodal, com $\bar{X} = 48,7kN$, $s = 18,4kN$ e moda entre $50kN$ e $60kN$. Já as distribuições de peso dos eixos simples de rodas duplas (Figura II.10b) e *tandem* triplo (Figura II.10d) têm uma moda bem caracterizada (entre 40 e $50kN$ nos eixos SRD e entre 220 e $230kN$ nos eixos TT) e outra pouco pronunciada, com $\bar{X} = 69,2kN$ e $s = 41,0kN$ nos eixos simples de rodas duplas, e $\bar{X} = 208kN$ e $s = 76,3kN$ nos eixos *tandem* triplo.

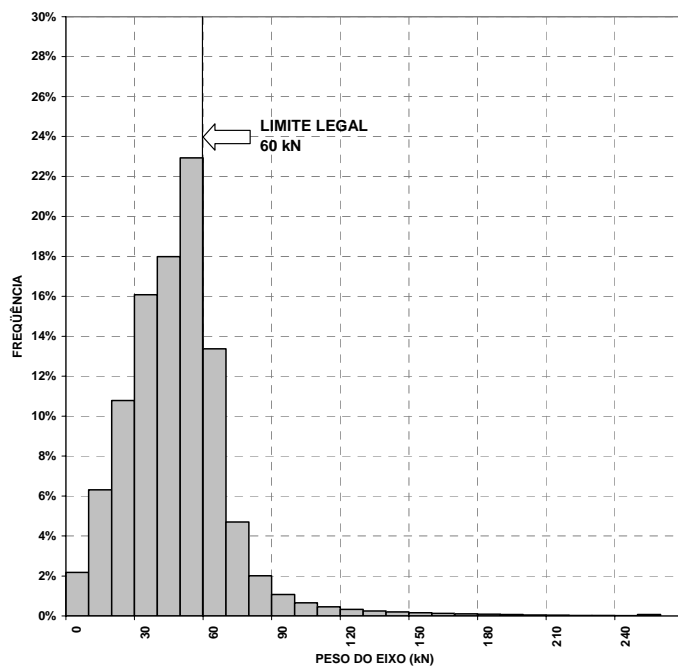


Figura II.10a Distribuição do peso por eixo simples de rodas simples ($\bar{X} = 48,7kN$; $s = 18,4kN$)

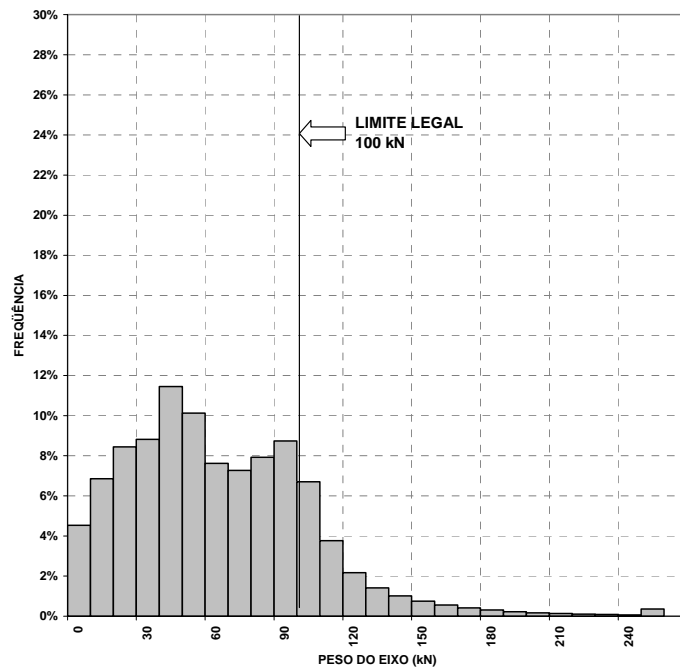


Figura II.10b Distribuição do peso por eixo simples de rodas duplas ($\bar{X} = 69,2kN$; $s = 41,0kN$)

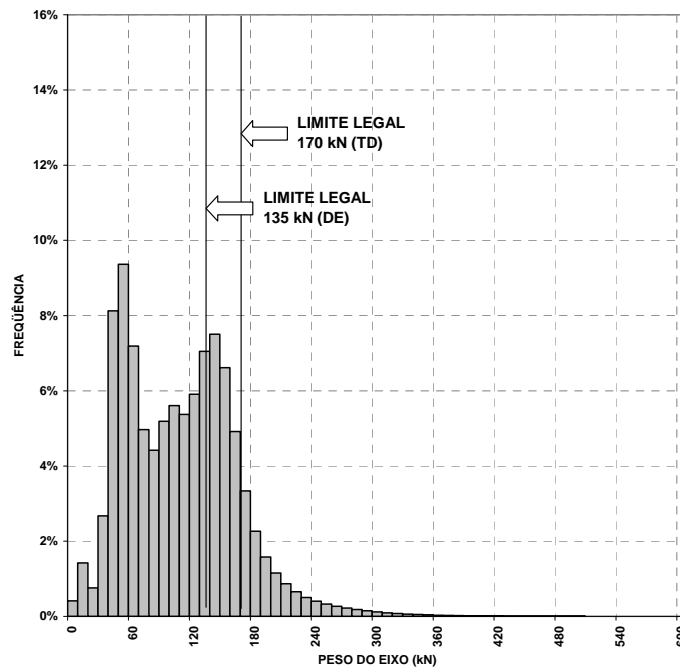


Figura II.10c Distribuição do peso por eixo *tandem* duplo ($\bar{X} = 116kN$; $s = 59,2kN$)

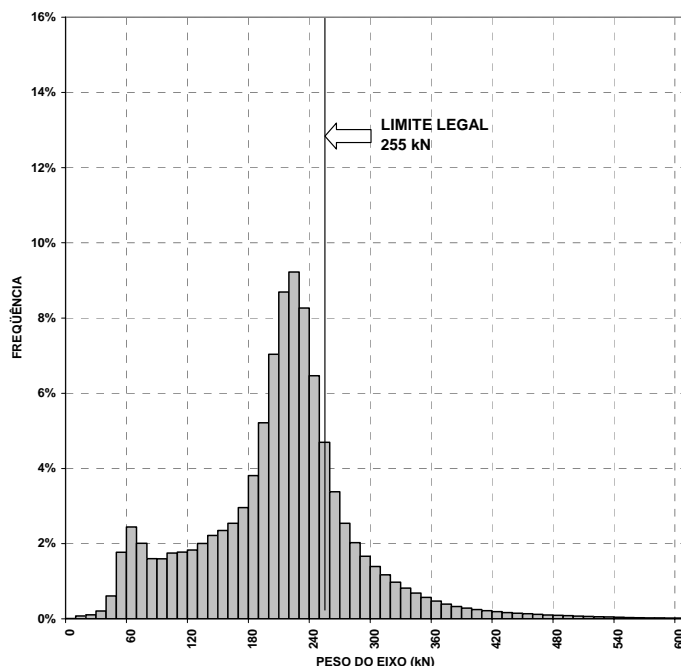


Figura II.10d Distribuição do peso por eixo *tandem* triplo ($\bar{X} = 208kN$; $s = 76,3kN$)

Em geral, a base de dados do DNIT considera todos os eixos em conjunto como *eixos em tandem*; nos eixos caracterizados como *tandem* duplo são reunidas outras configurações além dele próprio, como os eixos duplos não em *tandem* e os eixos duplos especiais.

Os eixos reunidos na categoria *tandem* duplo (Figura II.10c) têm distribuição bimodal, com $\bar{X} = 116kN$, $s = 59,2kN$, a primeira moda entre $50kN$ e $60kN$ e a segunda entre $140kN$ e $150kN$; a primeira moda é bastante pronunciada devido ao fato de estas configurações agregadas ao eixo *tandem* duplo serem consideravelmente freqüentes.

Verifica-se, nas Figuras II.10, que há registros, com significativa freqüência de ocorrência, que ultrapassam os limites legais de peso para cada tipo de eixo, indicando a extensão da prática do excesso de carga.

No Anexo C encontram-se outros histogramas que refletem os dados de tráfego coletados em todos os Postos de Monitoramento, tais como os de velocidade por classe e peso por classe.

A base de dados intuiu-se em caracterizar de forma prática os pesos de todas as classes de veículos, considerando como limites dos intervalos de classe, nas planilhas de *Distribuição dos veículos comerciais por faixa de peso*, os PBTC dos veículos mais comuns; entretanto, o resultado desse procedimento são seqüências de intervalos com

amplitudes bem diferentes umas das outras, o que acarreta perda de precisão e de homogeneidade.

Além disso, o último intervalo de todas as distribuições é aberto: contém todos os veículos de cada classe com peso maior que 450kN. Como o interesse desse trabalho está exatamente nas maiores solicitações, é necessário um estudo mais detalhado da base de dados para se poderem estimar os pesos máximos dos veículos ou, ao menos, dividir o intervalo aberto em subintervalos, como será visto na Seção II.3.3.

As planilhas de *Peso total na rodovia* mostram os pesos médios mensais de cada classe de veículo, bem como os pesos médios dos eixos componentes de cada configuração. Assim, com a reunião de todas estas planilhas, podem-se obter os percentuais médios de peso por eixo de cada veículo. A Figura II.11 mostra estes percentuais médios para as seis classes de veículos pesados mais frequentes na base de dados.

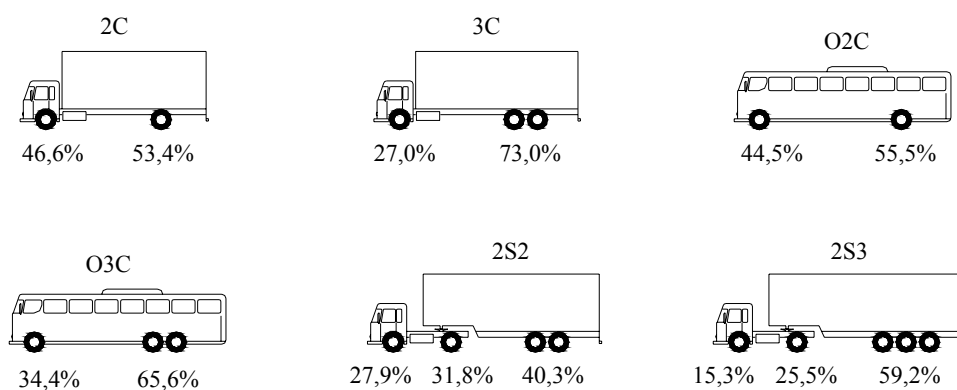


Figura II.11 Percentuais do peso total em cada eixo dos veículos de configuração mais frequente

II.2.3 Posto representativo

Como a massa de dados é grande e relativamente heterogênea, decidiu-se eleger um posto que represente de forma satisfatória todo o tráfego medido no país. Assim pode-se também proceder aos cálculos de forma facilitada e evitar redundâncias.

De acordo com a organização dos dados apresentados nas planilhas, usaram-se as seguintes variáveis como critérios de decisão:

- tráfego pesado (com peso médio elevado);
- número satisfatório de meses de contagem, bem como de horas diárias de monitoração do tráfego;

- continuidade nas medições (menor número de meses intermediários sem monitoração);
- maior TMD, que representa amostras de tamanho maior e, portanto, mais confiáveis e representativas das rodovias federais;
- menor quantidade de dados heterogêneos, fora do padrão global de semelhança, na análise das seqüências mensais das distribuições de peso e velocidade, tanto de cada classe de veículo quanto de cada tipo de eixo: dianteiro, traseiro, *tandem* duplo e *tandem* triplo.

A medida da heterogeneidade e da semelhança relativa entre os dados é subjetiva: observadores diferentes, analisando os mesmos dados, podem chegar a conclusões completamente discordantes. De qualquer forma, são variáveis imprescindíveis à seleção.

Na Tabela II.4, verifica-se que apenas os postos P23, P41, P51, P53, P54, P57 e P85 satisfazem os quesitos de maior número de registros mensais e continuidade nas medições.

De todos os Postos de Monitoramento, os postos P51 (na BR-101) e P57 (na BR-393) foram os únicos a apresentar comportamento satisfatório em todos os critérios subjetivos de decisão adotados. A escolha entre um deles foi definida em função da *representatividade* de cada rodovia. A Figura II.12 destaca as rodovias BR-101 e BR-393 na malha rodoviária do Brasil.

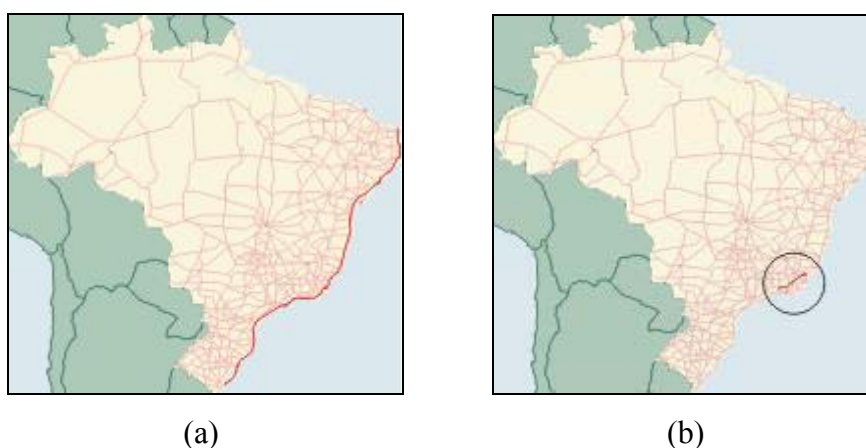


Figura II.12 Estradas destacadas na malha rodoviária brasileira: (a) BR-101 e (b) BR-393
(www.dnit.gov.br)

A rodovia longitudinal BR-101 é de enorme importância em nossa malha rodoviária, pois interliga boa parte das regiões mais populosas (e de maior tráfego) do Brasil; além disso, é a terceira maior rodovia do país, com 4553km de extensão

(www.transportes.gov.br). A rodovia diagonal BR-393, com apenas 441km, tem importância relativa bem menor no cenário nacional, ainda que com um considerável volume de tráfego registrado em P57 (www.dnit.gov.br). Esse aspecto acabou por eleger o posto P51 como o representativo: aquele que apresentou medições coerentes e de uma rodovia importante do Brasil. Sua localização é dada na Figura II.13.

Não há registros de contagem do posto P51 nos meses de dezembro/1999, janeiro/2000 e agosto/2000. Este posto representa aproximadamente 7,5% do volume total apresentado na base de dados, com $1,6 \times 10^6$ registros de veículos pesados.

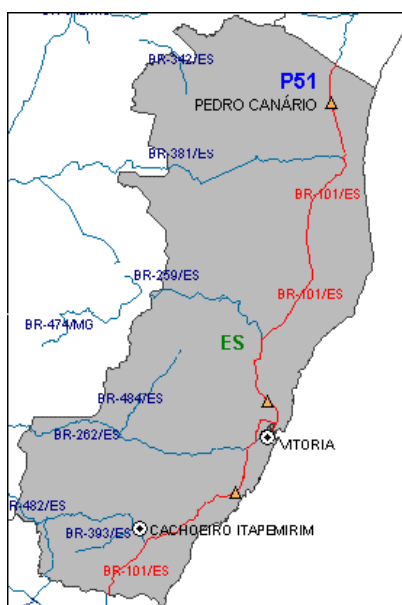


Figura II.13 Localização do posto P51 no norte do ES (www.dnit.gov.br)

Ao se comparar os dados mensais de P51 entre si, nota-se que aqueles relativos aos períodos finais da coleta de dados, em especial os referentes aos meses de setembro e outubro de 2002 (os dois últimos meses de medição), são os que têm comportamento mais fora do padrão. Os dados relativos aos primeiros meses de monitoração são mais homogêneos. Possivelmente essas discrepâncias aconteceram por causa da queda de qualidade na medição, oriunda da crescente degradação das condições da rodovia no trecho onde os dados foram adquiridos, ocorridas durante o período de monitoração. Estes meses com dados anormais foram descartados do cômputo geral.

Para ilustrar essa mudança de padrão, as Figuras II.14 mostram as séries mensais de distribuição de peso dos eixos *tandem* triplo, divididas em gráficos anuais, onde é possível constatar os registros anômalos citados (destacados na Figura II.14c).

Após a exclusão dos meses de setembro e outubro de 2002, resultam em P51 os seguintes padrões:

- peso médio (sem contar veículos leves e utilitários): 190kN;
- quantidade total de registros (sem contar veículos leves e utilitários): $1,5 \times 10^6$;
- tempo de contagem: 30 meses (2,5 anos);
- número médio de horas diárias de contagem: 21,2.

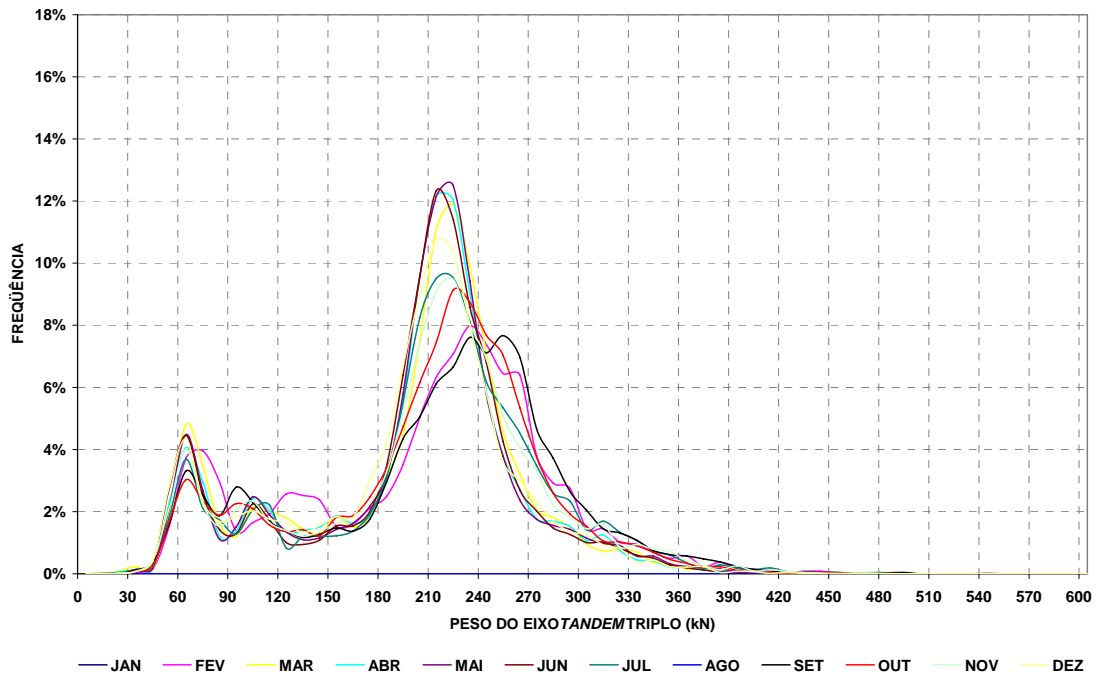


Figura II.14a Série das distribuições de peso dos eixos *tandem* triplo em P51: 2000

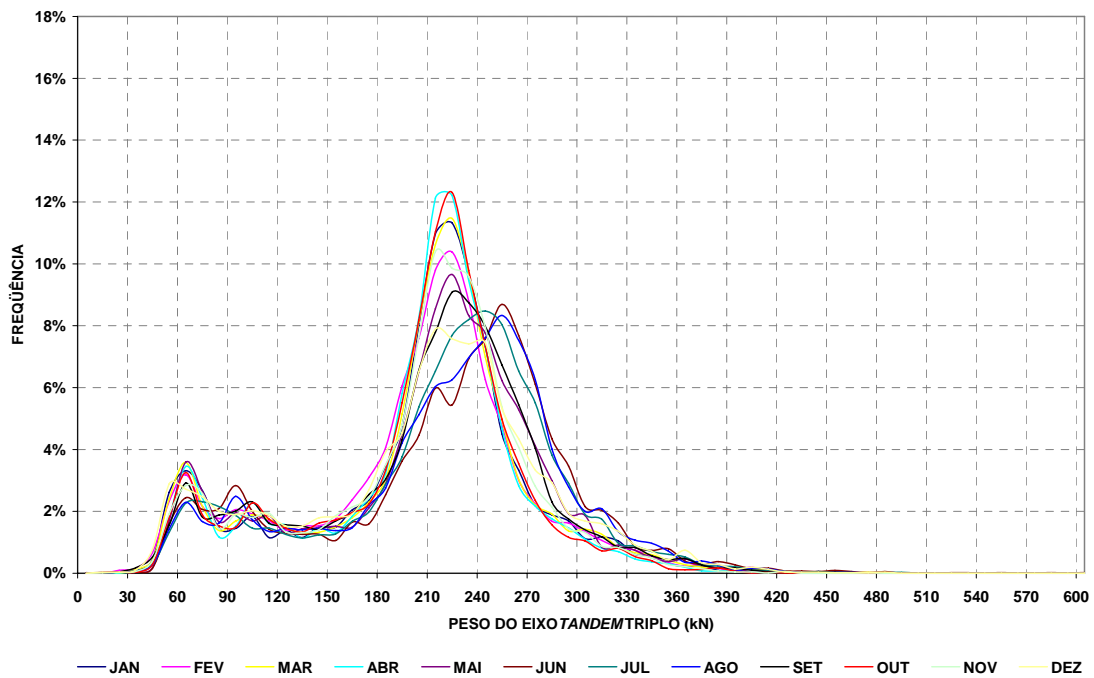


Figura II.14b Série das distribuições de peso dos eixos *tandem* triplo em P51: 2001

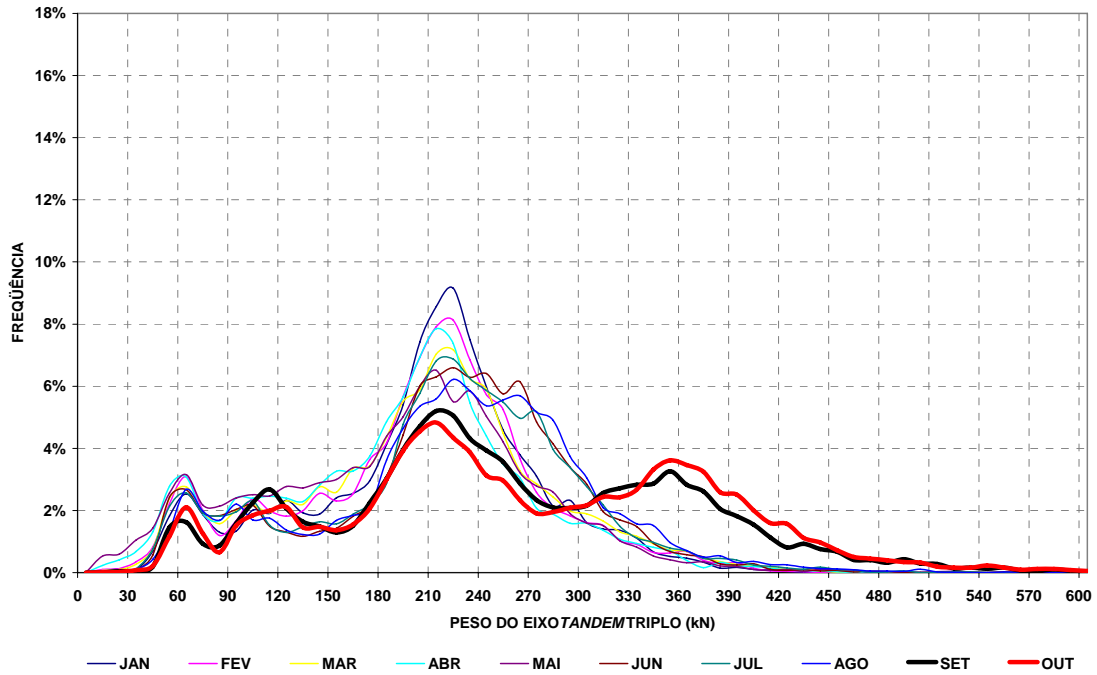


Figura II.14c Série das distribuições de peso dos eixos *tandem* triplo em P51: 2002

A Figura II.15 mostra o histograma de freqüências relativas de cada classe de veículo no posto P51. Comparando-a com a Figura II.9 (que considera os registros de todos os Postos de Monitoramento), percebe-se a semelhança entre a distribuição percentual de P51 e o padrão geral medido em todos os registros.

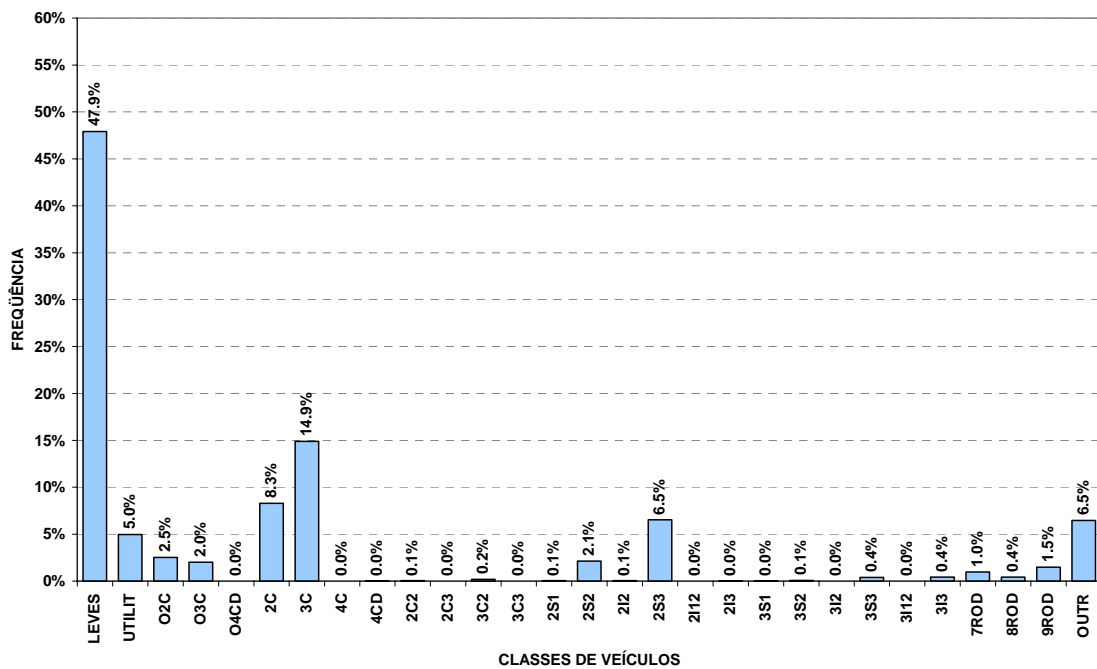


Figura II.15 Distribuição de freqüências relativas das classes de veículos em P51

II.3 Base de dados utilizada neste trabalho

II.3.1 Redução da base de dados do DNIT

Excluindo-se da Figura II.15 as classes de veículos Leves e Utilitários e rearranjando as classes em ordem decrescente, obtém-se a distribuição mostrada na Figura II.16.

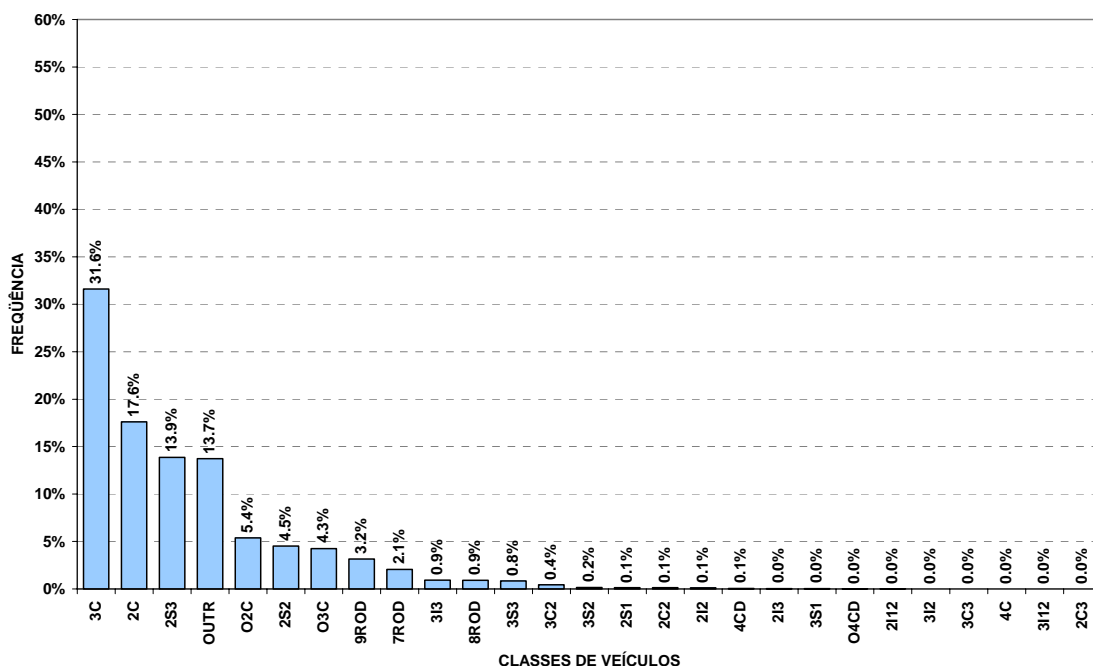


Figura II.16 Distribuição de frequências relativas das classes de veículos em P51, em ordem decrescente, sem considerar as classes de veículos Leves e Utilitários

Verifica-se que as classes 3C, 2C, 2S3, O2C, 2S2 e O3C correspondem a 77,3% do total de veículos pesados; se for descartada também a categoria indefinida *Outros*, essas seis classes juntas respondem a 89,5% do conjunto de veículos pesados conhecidos; por isso foram adotadas, simplificarmente, apenas essas classes ao longo das análises subseqüentes. A consideração de uma base reduzida simplifica algumas etapas de trabalho, sem prejuízo ao resultado final. Foram selecionadas as seis classes de veículos mais freqüentes, com especial atenção aos veículos mais pesados e de maior comprimento, isto é, os veículos que promovem as maiores solicitações nas pontes.

Devido à alteração acelerada no perfil rodoviário brasileiro, estima-se que circule atualmente nas estradas um número de CVC maior que quando das medições efetuadas pelo DNIT (1999 a 2002); mas como os efeitos nas pontes são devidos à ação

dos eixos dos veículos, os esforços proporcionados pelos eixos das CVC não são maiores que aqueles proporcionados pelos eixos dos semi-reboques convencionais, porque todos os veículos são sujeitos aos mesmos limites de peso por eixo da Lei da Balança. Portanto, a exclusão da classe *Outros* e das classes *7rod*, *8rod* e *9rod*, que incluem as CVC, não implicam em imprecisões significativas dos valores de esforços extremos.

Com as classes 3C, 2C, 2S3, O2C, 2S2 e O3C, a quantidade total de registros reduz-se a $1,1 \times 10^6$; o perfil considerado dos veículos está na Figura II.17.

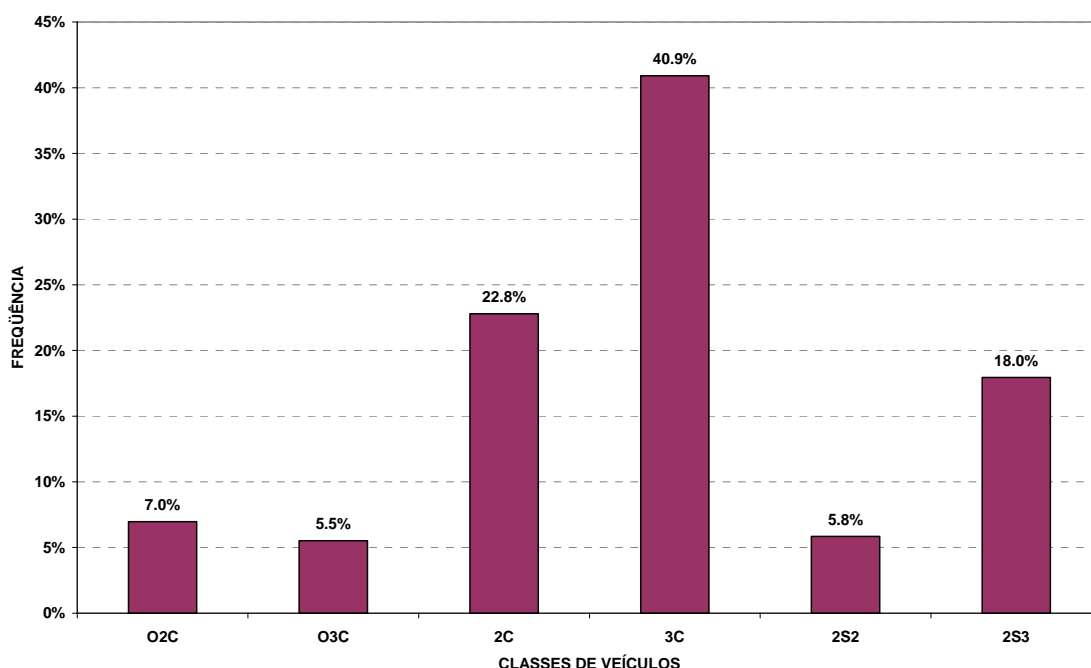


Figura II.17 Distribuição de frequências relativas em P51, apenas com as classes de veículos consideradas neste trabalho

II.3.2 Dimensões dos veículos

As simplificações resultantes da escolha de 6 classes de veículos para compor a base de dados utilizada neste trabalho se refletem em duas etapas importantes:

- definição das configurações geométricas dos veículos;
- refino das distribuições de peso dos veículos para cada classe (Seção II.3.3).

A base de dados não fornece dados relativos a distâncias. Para se estimar as dimensões dos veículos, foi necessária a realização de um levantamento das informações técnicas fornecidas pelos fabricantes de veículos e implementos rodoviários.

As dimensões dos ônibus, caminhões rígidos e cavalos mecânicos foram obtidas a partir das especificações técnicas dos modelos correspondentes a cada classe, cujos totais de vendas constam nos dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, ANFAVEA (www.anfavea.com.br) e da Associação Nacional das Empresas Importadoras de Veículos Automotores, ABEIVA (www.abeiva.com.br). As dimensões consideradas de cada veículo são as médias ponderadas dos registros obtidos, cujas dimensões foram adquiridas nos sites dos fabricantes de veículos na internet (catálogos técnicos dos fabricantes Volkswagen of America, Inc., Volkswagen do Brasil LTDA, Automobiles Citroën, Peugeot Citroën do Brasil Automóveis LTDA., Agrale S.A., Ford Motor Company Brasil S.A., DaimlerChrysler do Brasil LTDA., DaimlerChrysler AG., Scania Latin America LTDA., Scania Group, Volvo do Brasil, Volvo Group, General Motors do Brasil LTDA. e Iveco Latin America, nos respectivos sites na internet), sendo fator de peso o número de unidades vendidas de cada modelo. Por simplificação, foram computados apenas os modelos mais vendidos entre dezembro de 1999 e agosto de 2002 (o período de coleta de dados considerado para o posto P51). Também foram computados os pesos axiais de cada modelo quando vazios, que serão usados para algumas comparações na Seção IV.4.

Os registros de vendas incluem vários veículos classificados como pesados, mas de pequeno porte, cujo tráfego é predominantemente urbano. Por isso, foram eliminados os registros de microônibus e caminhões semileves (com PBT entre 35kN e 60kN, segundo a classificação de caminhões da ANFAVEA), para garantir uma base de registros de dimensões formada por veículos de uso rodoviário ou misto.

Já a Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários (ANFIR) fornece em seu site na internet (www.anfir.org.br) apenas dados gerais de produção e vendas destes equipamentos; não se obtiveram registros de vendas de implementos rodoviários classificados em quaisquer classes; portanto, não foi possível considerar médias ponderadas no cálculo das dimensões das carretas semi-reboque de 2 e 3 eixos, componentes dos veículos 2S2 e 2S3. Para a estimativa das dimensões representativas destas carretas, considerou-se a média aritmética dos valores de distância registrados diretamente das especificações técnicas dos fabricantes (catálogos técnicos dos fabricantes Randon S.A. Implementos e Participações, A. Guerra S.A. Implementos Rodoviários, Facchini S.A., Indústria Metalúrgica Pastre LTDA., Goydo Implementos Rodoviários LTDA., Dambroz S.A. Indústria Mecânica e Metalúrgica, Kronorte S.A. Implementos para o Transporte, Grupo Hübner, Irmãos Librelato LTDA., Pierino Gotti

Indústria de Implementos Rodoviários e Mecânicos LTDA., América Implementos Rodoviários LTDA., Rodosinos Carrocerias e Refrigeração LTDA., Rossetti Equipamentos Rodoviários LTDA., Metalúrgica Schiffer S.A. e Noma do Brasil S.A., nos respectivos sítios na internet). Em cada registro, a catalogação das dimensões foi feita de acordo com o padrão mostrado na Figura II.18. As dimensões médias resultantes, usadas neste trabalho, são as indicadas na Tabela II.5.

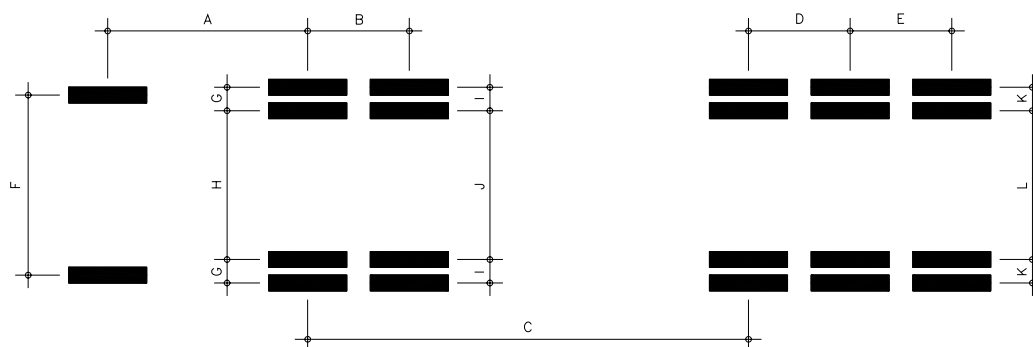


Figura II.18 Padrão usado para representar as dimensões dos veículos

Tabela II.5 Valores usados das dimensões dos veículos, conforme a Figura II.18

Veículo	Dimensões médias (m)											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
O2C	5,9	-	-	-	-	1,9	0,3	1,5	-	-	-	-
O3C	6,0	1,3	-	-	-	2,0	-	1,8	0,3	1,5	-	-
2C	4,0	-	-	-	-	1,8	0,3	1,4	-	-	-	-
3C	4,8	1,3	-	-	-	1,9	0,3	1,5	0,3	1,8	-	-
2S2	3,9	-	8,6	1,3	-	2,0	0,3	1,5	-	-	0,3	1,7
2S3	3,9	-	5,9	1,3	1,3	2,0	0,3	1,5	-	-	0,3	1,6

Não foram considerados dados de fabricantes não filiadas à ANFAVEA e à ABEIVA. É evidente que a aproximação adotada, considerando apenas as vendas recentes para o cálculo das dimensões, não reflete de forma precisa as configurações que rodam nas estradas. O trabalho de definição da tipologia do veículo representativo de cada classe foi significativamente reduzido com a seleção das 6 classes de veículos mais frequentes.

II.3.3 Histogramas finais de peso para as classes de veículos usadas

Para se considerar os histogramas finais de peso, é necessário um melhor detalhamento do trecho final das distribuições de peso, já que elas têm o último intervalo aberto.

Conhecidos os PBTC dos veículos (Tabela II.2), obtém-se um primeiro refino da porção final dos histogramas cruzando as informações das planilhas de *Distribuição de veículos comerciais por faixa de peso* com as das planilhas de *Percentual de sobrecarga dos veículos com excessos*; esta divide o excesso de peso de cada classe de veículo em intervalos de sobrecarga: até 10%; de 10 a 20%; de 20 a 30%; e mais de 30% de excesso no PBT ou PBTC.

Ainda assim, o último intervalo de peso da classe 2S3 tem frequência relativa muito alta, o que mostra que estes veículos trafegam com pesos muito acima do permitido pela Lei da Balança. Buscou-se, então, uma nova melhoria no detalhamento de pesos desta classe.

De acordo com o padrão de discriminação das configurações de veículos utilizado pelo DNIT, percebe-se que o eixo *tandem* triplo se faz presente nas classes 4C, 2S3, 3S3, 7rod, 8rod, 9rod e Outros. Nas planilhas de P51 relativas a 2000, devido à ausência das classes indefinidas 7rod, 8rod e 9rod (que só foram registradas, em geral, a partir de 2001) e às baixas frequências relativas das classes 4C, 3S3 e Outros, praticamente todos os eixos *tandem* triplo registrados pertencem à classe 2S3.

Podem-se usar, então, os dados referentes aos eixos *tandem* triplo das planilhas de *Frequência de peso por tipo de eixo* para se obter um segundo refino da distribuição final de peso da classe 2S3. A vantagem do uso destas planilhas é que elas apresentam o detalhamento completo da porção final das distribuições de peso: as cargas registradas pelos sensores foram publicadas divididas em intervalos de $1tf$ ($9,81kN$) na base de dados, até o valor de $75tf$ ($736kN$).

Portanto, através do cruzamento das frequências relativas acumuladas entre estas planilhas e as duas anteriores (usadas no primeiro refino), é possível refinar de forma bastante eficaz a porção final do histograma de peso da classe 2S3; além disso, é possível obter a variação do peso do eixo *tandem* triplo dos veículos 2S3 em função do seu peso total, como mostra a Figura II.19.

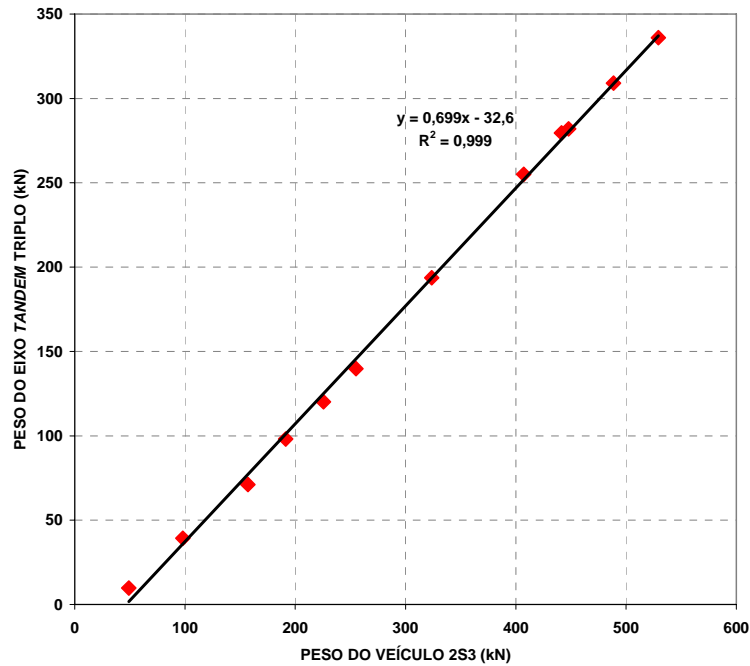


Figura II.19 Variação do peso no eixo *tandem* triplo dos veículos 2S3 com o seu peso total

Verifica-se variação linear do peso do eixo do veículo com o peso total, com excelente grau de correlação.

Conforme mencionado na Seção II.2.2, estes dados foram coletados com o tráfego corrente, e não através da pesagem com os veículos em repouso ou baixa velocidade; por isso, a força medida não é exatamente igual ao peso dos veículos. Com o movimento do veículo, a força vertical de cada eixo sobre o pavimento oscila em torno do valor da sua carga estática, devido aos efeitos de vibração vertical do veículo provocada pelas irregularidades no pavimento. Quanto mais liso o pavimento, mais próxima da carga estática será a força medida, com o veículo em movimento, pelos sensores instalados sob o pavimento. Para se obter corretamente a carga de cada eixo com este tipo de medição, deve-se proceder a algum tipo de calibração frente a valores de pesagem estática. Um sistema de medições com diversos sensores ao longo da pista também forneceria, com a média dos valores medidos, uma melhor aproximação da carga por eixo.

Por falta de informações a respeito dos procedimentos de calibração, convencionou-se dividir todos os valores de peso por 1,10, de forma semelhante ao processo adotado na calibração do Eurocódigo 1 (PRAT, 2001).

As Figuras II.20 mostram os histogramas de peso finais usados neste trabalho, para as seis classes de veículos mais frequentes.

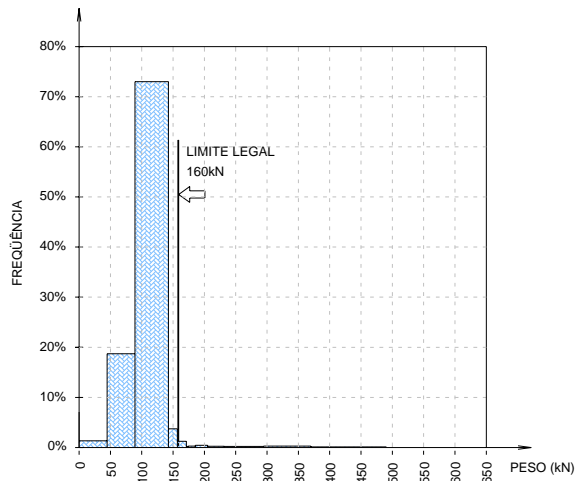


Figura II.20a Histograma refinado de peso da classe O2C em P51 ($\bar{X} = 110kN$; $s = 56,5kN$)

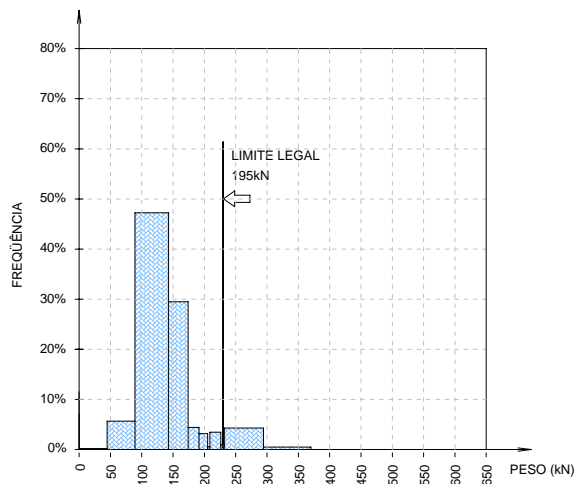


Figura II.20b Histograma refinado de peso da classe O3C em P51 ($\bar{X} = 144kN$; $s = 104kN$)

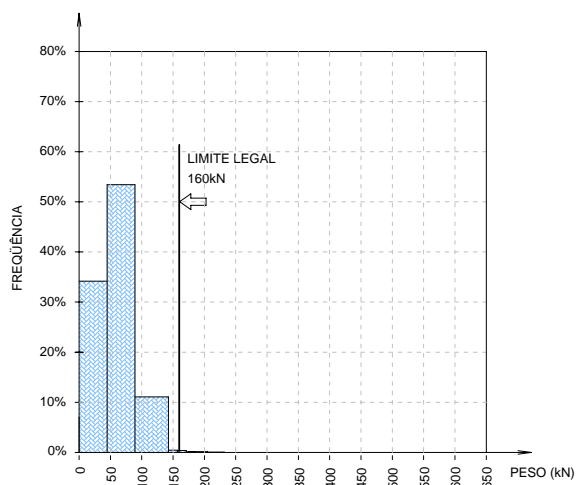


Figura II.20c Histograma refinado de peso da classe 2C em P51 ($\bar{X} = 58,5kN$; $s = 37,9kN$)

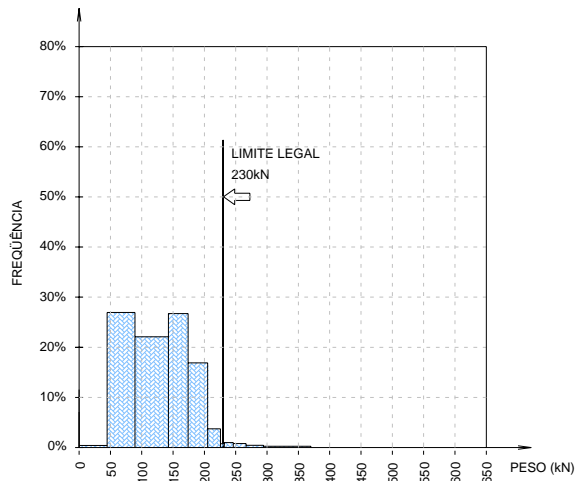


Figura II.20d Histograma refinado de peso da classe 3C em P51 ($\bar{X} = 134kN$; $s = 107kN$)

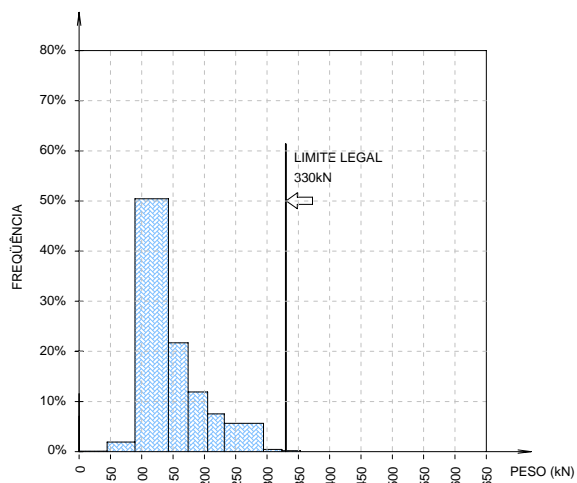


Figura II.20e Histograma refinado de peso da classe 2S2 em P51 ($\bar{X} = 151kN$; $s = 111kN$)

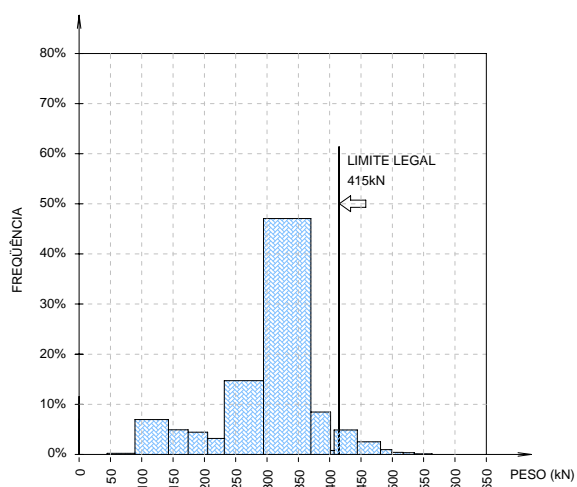


Figura II.20f Histograma refinado de peso da classe 2S3 em P51 ($\bar{X} = 304kN$; $s = 229kN$)

Com a distribuição de frequências de cada classe de veículo mostrada na Figura II.17 e os histogramas de pesos das Figuras II.20, pode-se determinar a frequência global de ocorrência de cada intervalo de peso dos veículos, como mostra a Tabela II.6. As frequências individuais são calculadas efetuando-se o produto de cada frequência relativa de peso pela frequência de ocorrência de cada classe de veículo. Os pesos indicados referem-se ao valor médio de cada faixa de peso total.

Tabela II.6 Frequências de ocorrência dos pesos dos veículos considerados

ÔNIBUS			CAMINHÕES RÍGIDOS			SEMI-REBOQUES		
CLASSE	PESO (kN)	FREQ.	CLASSE	PESO (kN)	FREQ.	CLASSE	PESO (kN)	FREQ.
O2C	22,3	0,093%	2C	22,3	7,790%	2S2	22,3	0,005%
O2C	66,9	1,305%	2C	66,9	12,179%	2S2	66,9	0,111%
O2C	116	5,090%	2C	116	2,526%	2S2	116	2,948%
O2C	150	0,260%	2C	150	0,099%	2S2	158	1,268%
O2C	164	0,087%	2C	164	0,085%	2S2	190	0,696%
O2C	173	0,015%	2C	173	0,016%	2S2	218	0,440%
O2C	180	0,020%	2C	180	0,042%	2S2	263	0,330%
O2C	195	0,031%	2C	195	0,034%	2S2	309	0,026%
O2C	218	0,018%	2C	218	0,014%	2S2	338	0,011%
O2C	263	0,016%	2C	263	0,010%	2S2	362	0,004%
O2C	332	0,020%	2C	332	0,003%	2S2	376	0,002%
O2C	386	0,008%	2C	386	0,000%	2S2	392	0,003%
O2C	446	0,008%	2C	446	0,000%	2S2	446	0,003%
O3C	22,3	0,011%	3C	22,3	0,165%	2S3	22,3	0,000%
O3C	66,9	0,313%	3C	66,9	11,021%	2S3	66,9	0,037%
O3C	116	2,605%	3C	116	9,044%	2S3	116	1,250%
O3C	158	1,627%	3C	158	10,934%	2S3	158	0,882%
O3C	183	0,245%	3C	190	6,907%	2S3	190	0,798%
O3C	198	0,175%	3C	215	1,524%	2S3	218	0,575%
O3C	207	0,032%	3C	229	0,314%	2S3	263	2,644%
O3C	217	0,191%	3C	239	0,402%	2S3	332	8,451%
O3C	229	0,050%	3C	256	0,319%	2S3	386	1,519%
O3C	263	0,237%	3C	280	0,186%	2S3	404	0,143%
O3C	332	0,027%	3C	332	0,097%	2S3	426	0,875%
O3C	386	0,001%	3C	386	0,002%	2S3	463	0,451%
O3C	446	0,000%	3C	446	0,001%	2S3	490	0,172%
-	-	-	-	-	-	2S3	508	0,076%
-	-	-	-	-	-	2S3	526	0,060%
-	-	-	-	-	-	2S3	549	0,021%

II.4 Cargas móveis rodoviárias da norma brasileira

Os carregamentos móveis provenientes do tráfego de veículos nas pontes têm seus valores calculados atualmente pela NBR 7188 (1982) – “Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre”, que orienta a adoção de *cargas de multidão* e de *veículos-tipo*, escolhidos geralmente em função da classe da rodovia. As pontes que são utilizadas não raramente por veículos especiais devem ser verificadas para veículos-tipo também especiais.

A norma anterior à NBR 7188 era a NB 6 (1960), que vigorou até 1982. Nela eram considerados três veículos-tipo: Classe 36, Classe 24 e Classe 12, indicados na Figura II.21. Suas características estão detalhadas nas Tabelas II.7, extraídas da própria NB 6.

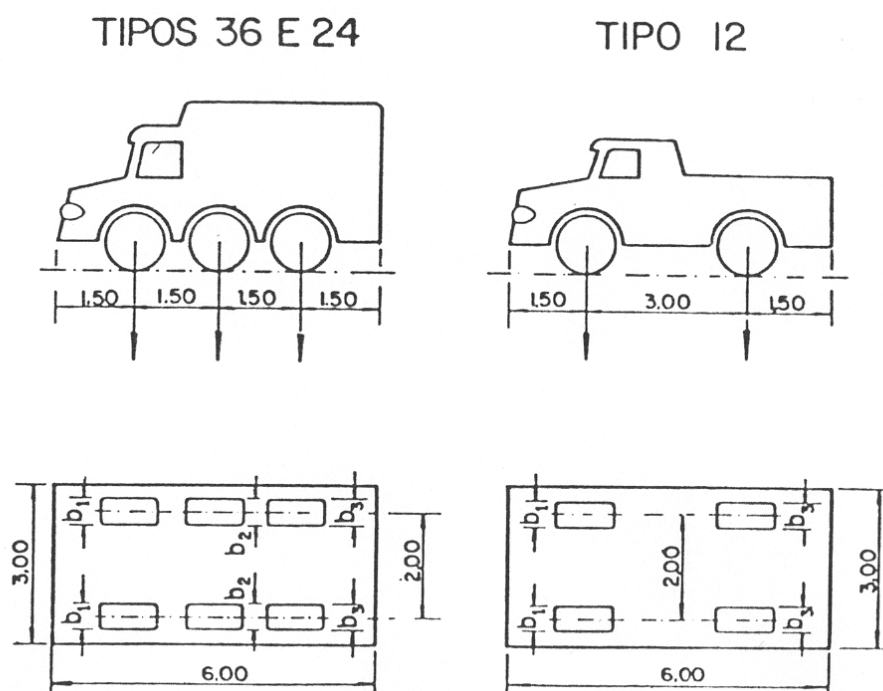


Figura II.21 Veículos-tipo da NB 6

Tabela II.7a Características dos veículos-tipo da NB 6 (1960)

Classe da ponte	Peso do veículo-tipo (kN)	Carga uniformemente distribuída	
		p (kN/m ²)	p' (kN/m ²)
36	360	5	3
24	240	4	3
12	120	3	3

Tabela II.7b Características dos veículos-tipo da NB 6 (1960)

ITEM	Classe 36	Classe 24	Classe 12
Peso de cada roda dianteira (kN)	60	40	20
Peso de cada roda intermediária (kN)	60	40	-
Peso de cada roda traseira (kN)	60	40	40
Largura de contato de cada roda dianteira, b_1 (m)	0,45	0,35	0,20
Largura de contato de cada roda intermediária, b_2 (m)	0,45	0,35	-
Largura de contato de cada roda traseira, b_3 (m)	0,45	0,35	0,30
Comprimento de contato de cada roda (m)	0,20	0,20	0,20
Distância (longitudinal) entre eixos (m)	1,50	1,50	3,00
Distância (transversal) entre centros de roda de cada eixo (m)	2,00	2,00	2,00

Os veículos-tipo têm $3m$ de largura e $6m$ de comprimento. Adota-se um único veículo, colocado na posição mais desfavorável para a solicitação estudada.

A carga de cálculo constituía-se de uma faixa principal com $3m$ de largura, na qual se encontravam o veículo-tipo e uma carga distribuída principal, p , à frente e atrás deste. A faixa principal era colocada na direção longitudinal do tabuleiro da ponte (na direção do tráfego), na posição mais desfavorável para o elemento estrutural estudado. Na parte da pista não ocupada pela faixa principal, colocava-se a carga distribuída secundária p' .

A NB 6 foi reeditada em 1982 e aprovada em 1984, passando a vigorar como NBR 7188; os veículos-tipo das classes 24 e 36 passaram a ser mais pesados, de classes 30 e 45, respectivamente. As cargas uniformemente distribuídas p e p' também foram alteradas: além da revisão nos seus valores, a carga de multidão p da NBR 7188 carrega toda a pista (onde for desfavorável) e a carga p' atua apenas nos passeios. Algumas dimensões das rodas dos veículos também sofreram alterações. As Tabelas II.8 e a Figura II.22 ilustram estas novas configurações.

As cargas móveis de cálculo, obviamente, não coincidem com as cargas que circulam nas rodovias. As cargas reais são devidas à passagem de carros, camionetas e, principalmente, caminhões e carretas com dimensões e pesos fixados nas regulamentações da Lei da Balança. Os veículos-tipo das classes 24 e 36 tiveram suas dimensões copiadas das normas alemãs; a carga de 36 toneladas correspondia, na época, ao peso de um tanque médio do exército. As Classes 30 e 45 são, tão-só, tentativas de

atualizar as solicitações de projeto, frente às mudanças nos padrões do tráfego brasileiro.

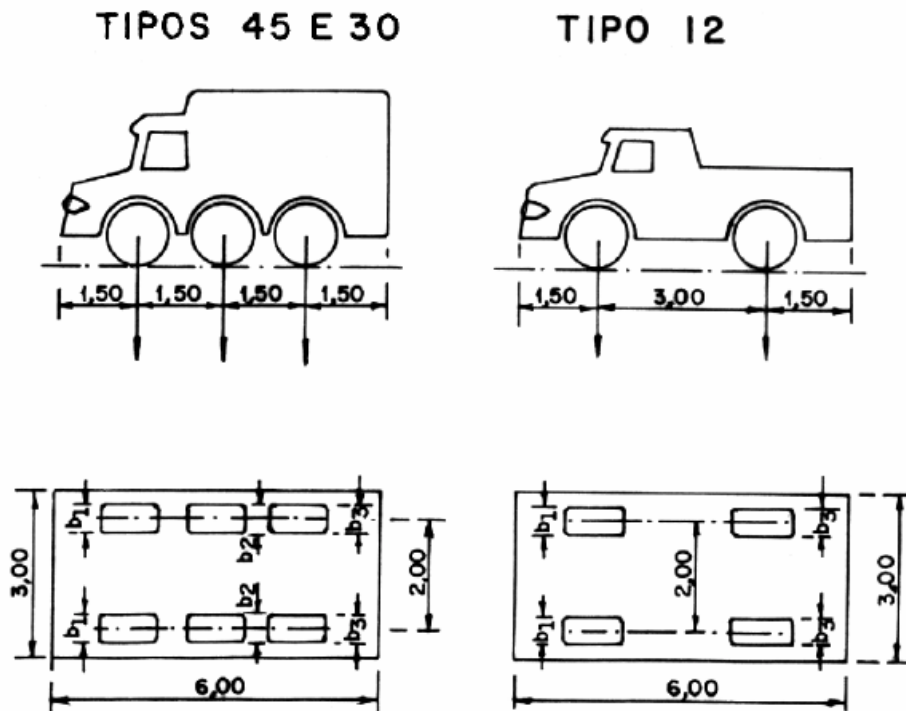


Figura II.22 Veículos-tipo da NBR 7188

Tabela II.8a Características dos veículos-tipo da NBR-7188 (1982)

Classe da ponte	Peso do Veículo-tipo (kN)	Carga uniformemente distribuída	
		p (kN/m ²)	p' (kN/m ²)
45	450	5	3
30	360	5	3
12	120	4	3

Tabela II.8b Características dos veículos-tipo da NBR-7188 (1982)

ITEM	Classe 45	Classe 30	Classe 12
Peso de cada roda dianteira (kN)	75	50	20
Peso de cada roda intermediária (kN)	75	50	-
Peso de cada roda traseira (kN)	75	50	40
Largura de contato de cada roda dianteira, b_1 (m)	0,50	0,40	0,20
Largura de contato de cada roda intermediária, b_2 (m)	0,50	0,40	-
Largura de contato de cada roda traseira, b_3 (m)	0,50	0,40	0,30
Comprimento de contato de cada roda (m)	0,20	0,20	0,20
Distância (longitudinal) entre eixos (m)	1,50	1,50	3,00
Distância (transversal) entre centros de roda de cada eixo (m)	2,00	2,00	2,00

III Distribuições de probabilidade e extrapolações

III.1 Variáveis discretas

Ao se coletar dados referentes às características de um grupo de objetos, geralmente é impraticável observar todo o grupo, especialmente se ele for muito grande. Ao invés de examinar todo o grupo, denominado *população*, examina-se uma pequena parte dele, chamada de *amostra*.

Quando se resumem grandes massas de dados amostrais brutos (que ainda não foram numericamente organizados), costuma-se distribuí-los em classes e determinar o número de dados pertencente a cada classe (*freqüência*), o que é conhecido como distribuição de freqüência: divide-se a amplitude total (a diferença entre o maior e o menor valor observados) em um número conveniente de intervalos de classe (k), de preferência com a mesma amplitude, determinando-se o número de observações que caem dentro de cada intervalo de classe, isto é, calculam-se as freqüências de cada classe (f_i) (SPIEGEL, 1994).

A representação mais comum das distribuições de freqüência, através de retângulos, é chamada de *histograma*. Os dados medidos são representados pela variável X , sendo cada valor da variável representado por x_i .

Quando, a partir de um determinado valor dos dados observados, as freqüências se tornam muito pequenas e dispersas no padrão de amplitudes usado, ou seja, quando há muitas classes vazias na parte final do histograma, pode-se evitar esses vazios deixando o último intervalo “aberto” (com limite superior e/ou amplitude de classe não informadas). Alheia à praticidade, a desvantagem disso é que a distribuição se torna inaproveitável à realização de alguns cálculos matemáticos, em especial à determinação do valor máximo (quando não se conhecem, a princípio, os dados brutos; apenas a sua distribuição de freqüências) da amostra.

Se as classes vazias ocorrerem em trechos intermediários do histograma, ou quando se necessitar fazer os limites de classe coincidirem com valores não eqüidistantes uns dos outros, podem-se usar intervalos com amplitudes diferentes. Isso também pode trazer desvantagens: existe a perda de homogeneidade e da simplicidade com que certos cálculos matemáticos poderiam ser efetuados.

É muito comum o uso do *histograma de freqüências acumuladas*, no qual as freqüências (ordenadas) são dadas pela soma de todas as freqüências anteriores à do intervalo considerado, além daquela que conta no próprio intervalo:

$$F_j = \sum_{i=1}^j f_i \quad (\text{III.1})$$

A freqüência acumulada no último intervalo é o tamanho total da amostra (n):

$$F_k = n.$$

Os histogramas de freqüência e de freqüência acumulada são muitas vezes apresentados na sua forma percentual ou relativa: o valor de cada freqüência (f_i ou F_i) é dividido pela soma das freqüências de todos os intervalos, ou o tamanho total da amostra: $f_{i,\%} = f_i / n$ ou $F_{i,\%} = F_i / n$; nesse caso, a soma das freqüências de todos os intervalos do histograma relativo é unitária, ou seja, o último intervalo do histograma de freqüência percentual acumulada é igual à unidade: $F_{k,\%} = 1$.

Para o cálculo de qualquer grandeza amostral discreta, admite-se que todas as observações relativas a certo intervalo de classe do histograma coincidem com o seu ponto médio; assim, considera-se o valor x_i como a média entre os extremos (limites superior e inferior) de seu intervalo i (SPIEGEL, 1994).

No histograma de freqüências, absolutas ou relativas, define-se a *moda* (x_{mod}) como o valor (média entre os limites do intervalo i) mais comum, ou seja, o que tem maior freqüência. Já no histograma de freqüências acumuladas, absolutas ou relativas, define-se a *mediana* (x_{med}) como o valor (média entre os limites do intervalo i) que contenha as relações $F_i = n/2$ ou $F_{i,\%} = 0,5$, ou seja, o valor x_i no qual a freqüência relativa acumulada iguale ou ultrapasse o valor 0,5 (ANG *et al.*, 1975, SAGRILO *et al.*, 2004).

Outras grandezas são definidas em função dos *momentos* de cada distribuição. Os momentos de ordem r centrados na origem são definidos por

$$m'_r = \frac{\sum_{i=1}^k f_i \cdot (x_i)^r}{n} \quad (\text{III.2})$$

O momento de primeira ordem ($r = 1$) centrado na origem é o *valor médio*:

$$\bar{X} = m'_1 = \frac{\sum_{i=1}^k f_i \cdot x_i}{n} \quad (\text{III.3})$$

Os momentos de ordem r centrados na média são definidos por

$$m_r = \frac{\sum_{i=1}^k f_i \cdot (x_i - \bar{X})^r}{n} \quad (\text{III.4})$$

O momento de segunda ordem ($r = 2$) centrado na média é a *variância*:

$$s^2 = m_2 = \frac{\sum_{i=1}^k f_i \cdot (x_i - \bar{X})^2}{n} \quad (\text{III.5})$$

O *desvio padrão* é a raiz quadrada da variância:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k f_i \cdot (x_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (\text{III.6})$$

O momento abstrato de ordem r , centrado na média, é definido por

$$a_r = \frac{m_r}{(\sqrt{m_2})^r} = \frac{m_r}{s^r} \quad (\text{III.7})$$

O momento abstrato de terceira ordem ($r = 3$) centrado na média é o *coeficiente de assimetria*:

$$a_3 = \frac{m_3}{s^3} \quad (\text{III.8})$$

O momento abstrato de quarta ordem ($r = 4$) centrado na média é o *coeficiente de curtose*:

$$a_4 = \frac{m_4}{s^4} \quad (\text{III.9})$$

As *medidas de tendência central* (valor médio, mediana e moda) são muitas vezes tomadas como um valor representativo do conjunto de dados. Entre elas, é mais comum o uso do valor médio. O desvio padrão é uma medida de *dispersão*; seu valor mostra quão afastados os dados estão do seu valor médio. Às vezes o desvio padrão é definido com $(n-1)$ ao invés de n no denominador da Eq. III.6; isso garante uma estimativa menos tendenciosa do desvio padrão populacional. Para grandes valores de n

(certamente quando superior a 30), não há praticamente nenhuma diferença entre as duas definições.

A *densidade de freqüência* de cada intervalo i do histograma é definida como o quociente entre o valor da freqüência relativa do intervalo e a sua amplitude (SAGRILO *et al.*, 2004):

$$d_i = \frac{f_i}{(\Delta x)_i} \quad (\text{III.10})$$

sendo a amplitude igual à diferença entre os limites superior e inferior de cada intervalo. Se o histograma de freqüências relativas tiver amplitudes de classe iguais, a distribuição de densidade terá aspecto semelhante a ele, pois nesse caso todos os valores da ordenada (a freqüência relativa) estão multiplicados por uma constante.

III.2 Variáveis contínuas

Se os resultados dos experimentos de um determinado fenômeno são imprevisíveis, ele é chamado de *aleatório*; nesse caso cada experimento deve ser associado a um valor de probabilidade de ocorrência do evento relacionado ao fenômeno em estudo. Observa-se, intuitivamente, que a probabilidade está relacionada com a freqüência de ocorrência do evento ao longo de uma seqüência com grande número de experimentos: a probabilidade estimada de um evento, representada por $P(x)$, é considerada como o limite da freqüência relativa de sua ocorrência, sua forma teórica ou ideal, quando o número de observações cresce indefinidamente (SAGRILO *et al.*, 2004). A variável amostral medida, X , passa a ser uma *variável aleatória*.

Pode-se supor que as distribuições de probabilidade referem-se a populações, ao passo que as distribuições de freqüência relativa referem-se a amostras dela extraídas. De forma equivalente, podem-se considerar, mediante o acúmulo de probabilidades, as *distribuições acumuladas de probabilidade*, análogas às de freqüência relativa acumulada.

Os histogramas de freqüência relativa de uma amostra tornam-se, no caso limite de uma população, uma curva contínua denominada *função densidade de probabilidade*: um gráfico que relaciona a *variável aleatória contínua* X com a densidade de probabilidade. Da mesma forma que o histograma de freqüências relativas, a função densidade de probabilidade mostra de que forma as probabilidades de

ocorrência do evento se dão; porém, a obtenção das probabilidades não está mais ligada à ordenada, mas sim à área do gráfico compreendida entre certos valores.

A função densidade de probabilidade, usualmente representada por $f_X(x)$, deve satisfazer as seguintes propriedades:

$$\begin{aligned}
 & \text{(a) } f_X(x) \geq 0, \forall x \in \mathfrak{R} \\
 & \text{(b) } \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx = 1 \\
 & \text{(c) } \int_{x_{\text{inf}}}^{x_{\text{sup}}} f_X(x) dx = P(x_{\text{inf}} \leq x \leq x_{\text{sup}})
 \end{aligned}
 \tag{III.11}$$

Qualquer função que satisfaça as Eqs. III.11 pode ser considerada como uma função densidade de probabilidade.

A última propriedade (Eq. III.11c) mostra que a probabilidade de a variável aleatória X ter valor entre x_{inf} e x_{sup} é igual à integral da função densidade de probabilidade entre os extremos x_{inf} e x_{sup} .

Da mesma forma do que no caso discreto (Eq. III.1), aqui também se define a *função acumulada de probabilidade*, $F_X(x)$:

$$F_X(x_{\text{sup}}) = \int_{-\infty}^{x_{\text{sup}}} f_X(x) dx
 \tag{III.12}$$

onde $F_X(x_{\text{sup}})$ denota a probabilidade de a variável aleatória X assumir valores menores ou iguais a x_{sup} .

A função acumulada de probabilidade deve satisfazer às propriedades mostradas nas Eqs. III.13:

$$\begin{aligned}
 & \text{(a) } \lim_{x \rightarrow -\infty} F_X(x) = 0 \\
 & \text{(b) } 0 \leq F_X(x) \leq 1 \\
 & \text{(c) } \lim_{x \rightarrow \infty} F_X(x) = 1
 \end{aligned}
 \tag{III.13}$$

A função densidade de probabilidade é a derivada da função acumulada:

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx}
 \tag{III.14}$$

De forma análoga ao caso amostral, podem-se também definir grandezas e momentos populacionais da variável aleatória X . Define-se a *moda* (x_{mod}) como o seu máximo local (o valor onde a derivada da função densidade de probabilidade se anula) e a *mediana* como o valor onde $F_X(x_{\text{med}}) = 0,5$.

O momento de ordem r centrado na origem é dado por

$$\mu'_r = \int_{-\infty}^{\infty} x^r \cdot f_X(x) dx \quad (\text{III.15})$$

O momento de primeira ordem ($r = 1$) centrado na origem é o valor médio:

$$\mu = \mu'_1 = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f_X(x) dx \quad (\text{III.16})$$

O momento de ordem r centrado na média é dado por

$$\mu_r = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^r \cdot f_X(x) dx \quad (\text{III.17})$$

O momento de segunda ordem ($r = 2$) centrado na média é a variância:

$$\sigma^2 = \mu_2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \cdot f_X(x) dx \quad (\text{III.18})$$

O desvio padrão é a raiz quadrada da variância:

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \cdot f_X(x) dx} \quad (\text{III.19})$$

Os momentos abstratos são definidos da mesma forma que na Eq. (III.7):

$$\alpha_r = \frac{m_r}{(\sqrt{m_2})^r} = \frac{m_r}{s^r} \quad (\text{III.20})$$

O momento abstrato de terceira ordem ($r = 3$) centrado na média é o coeficiente de assimetria (α_3) e o momento abstrato de quarta ordem ($r = 4$) centrado na média é o coeficiente de curtose (α_4).

As características probabilísticas de uma variável aleatória podem ser descritas aproximadamente em termos de certas quantidades fundamentais, chamadas de *principais descritoras* da variável: um valor central, como o valor médio, e uma medida de dispersão, como o desvio padrão (ANG *et al.*, 1975).

III.3 Funções de distribuição de probabilidade

III.3.1 Parâmetros

Devido ao fato de as distribuições de probabilidade possuírem um ou mais parâmetros de forma (representados pelas letras c e d), muitas delas não são uma única distribuição, mas de fato uma família de distribuições. Estes parâmetros permitem a uma distribuição uma grande variedade de padrões geométricos, dependendo de seus valores; são particularmente úteis para modelar várias aplicações, porque tornam uma mesma distribuição flexível o suficiente para modelar uma variedade de conjuntos de dados. Entretanto, os parâmetros de forma não estão presentes em todas as distribuições.

Os parâmetros de locação (a) e de escala (b), comuns a todas as distribuições, influem quantitativamente nos valores de probabilidade da variável modelada, em contrapartida aos qualitativos parâmetros de forma; seus valores implicam diretamente na escolha da distribuição de probabilidade que tenha o melhor ajuste aos dados amostrais. São mais visíveis no gráfico de densidade de probabilidade. O efeito do parâmetro de locação é transladar o gráfico em a unidades: para a direita, se for positivo; para a esquerda, se for negativo. Se for nulo o gráfico não sofre translação. O parâmetro de escala comanda a proporção vertical: se for maior que a unidade, seu efeito é “abrir” o gráfico, tanto mais quanto maior for o seu valor; se for menor que a unidade, o seu efeito é “estretar” (fechar) o gráfico, tanto mais quanto menor for o seu valor. O valor unitário não altera o padrão do diagrama. O parâmetro de escala não pode ser negativo. Uma distribuição está na *forma padrão* se ela tiver parâmetro de locação nulo e parâmetro de escala unitário: $a = 0$ e $b = 1$ (ANG *et al.*, 1975, WALCK, 2001, SAGRILO *et al.*, 2004, EHLERS *et al.*, 2006, www.itl.nist.gov/div898/handbook).

O parâmetro de locação é a principal referência no cálculo do valor médio; o parâmetro de escala influi nos valores do desvio padrão e da curtose.

III.3.2 Síntese de distribuições

Existem na literatura várias distribuições discretas de probabilidades consagradas, como a de Poisson, binomial, binomial negativa, multinomial, geométrica, hipergeométrica etc.; porém, não serão consideradas neste trabalho por dois motivos:

- suas próprias limitações;

- muitas distribuições discretas, no caso limite, tendem a outras contínuas que serão aqui apresentadas.

Portanto, dar-se-á atenção apenas às distribuições contínuas de probabilidade.

Apresenta-se a seguir a relação das distribuições de probabilidade utilizadas neste trabalho (ANG *et al.*, 1975, ANG *et al.*, 1984, KREISZIG, 1993, SPIEGEL, 1994, HOLMES, 2001, WALCK, 2001, BAUTISTA, 2002, SAGRILO *et al.*, 2004, EHLERS *et al.*, 2006, www.itl.nist.gov/div898/handbook). As distribuições binomial e geométrica serão mencionadas adiante (Seções III.6.2 e III.6.3) para a definição do período de retorno. As distribuições assintóticas (distribuições Tipos I, II e III) serão comentadas na Seção III.7.3.

- *Distribuição normal ou de Gauss*

$$\text{Equação: } f_X(x) = \frac{1}{b \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2b^2}} \quad (\text{III.21})$$

$$\text{Domínio: } (-\infty ; \infty) \quad (\text{III.22})$$

$$\text{Média: } \mu = a \quad (\text{III.23})$$

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = b \quad (\text{III.24})$$

- *Distribuição lognormal*

$$\text{Equação: } f_X(x) = \frac{1}{c \cdot x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\left[\ln\left(\frac{x-a}{b}\right)\right]^2}{2c^2}} \quad (\text{III.25})$$

$$\text{Domínio: } [a ; \infty) \quad (\text{III.26})$$

$$\text{Média: } \mu = a + b \cdot e^{\frac{c^2}{2}} \quad (\text{III.27})$$

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = \sqrt{b \cdot e^{\frac{3c^2-2}{2}}} \quad (\text{III.28})$$

- Distribuição gama

$$\text{Equação: } f_X(x) = \frac{\left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \cdot e^{-\frac{x-a}{b}}}{b \cdot \Gamma(c)} \quad (\text{III.29})$$

$$\text{Domínio: } [a; \infty) \quad (\text{III.30})$$

$$\text{Média: } \mu = a + b \cdot c \quad (\text{III.31})$$

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = b \cdot \sqrt{c} \quad (\text{III.32})$$

- Distribuição exponencial dupla

$$\text{Equação: } f_X(x) = \frac{e^{-\frac{|x-a|}{b}}}{2b} \quad (\text{III.33})$$

$$\text{Domínio: } (-\infty; \infty) \quad (\text{III.34})$$

$$\text{Média: } \mu = a \quad (\text{III.35})$$

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = b \cdot \sqrt{2} \quad (\text{III.36})$$

- Distribuição beta

$$\text{Equação: } f_X(x) = \frac{\Gamma(c+d)}{\Gamma(c) \cdot \Gamma(d)} \cdot \frac{(x-a)^{c-1} \cdot (a+b-x)^{d-1}}{b^{c+d-1}} \quad (\text{III.37})$$

$$\text{Domínio: } [a; a+b] \quad (\text{III.38})$$

$$\text{Média: } \mu = a + \frac{c \cdot (b-a)}{c+d} \quad (\text{III.39})$$

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = \sqrt{\frac{c \cdot d}{c+d+1}} \cdot \left(\frac{b-a}{c+d}\right) \quad (\text{III.40})$$

- Distribuição de Student

$$\text{Equação: } f_X(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{c+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{c}{2}\right) \cdot b \cdot \sqrt{\pi \cdot c}} \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{x-a}{b}\right)^2}{c}\right]^{-\frac{(c+1)}{2}} \quad (\text{III.41})$$

$$\text{Domínio: } (-\infty ; \infty) \quad (\text{III.42})$$

$$\text{Média: } \mu = a \quad (\text{III.43})$$

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = b \cdot \sqrt{\frac{c}{c-2}} \quad (\text{III.44})$$

- Distribuição logística

$$\text{Equação: } f_X(x) = \frac{e^{-\frac{(x-a)}{b}}}{b \cdot \left[1 + e^{-\frac{(x-a)}{b}}\right]^2} \quad (\text{III.45})$$

$$\text{Domínio: } (-\infty ; \infty) \quad (\text{III.46})$$

$$\text{Média: } \mu = a \quad (\text{III.47})$$

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = b \cdot \frac{\pi}{\sqrt{3}} \quad (\text{III.48})$$

- Distribuição de Gumbel (Tipo I)

$$\text{Equação: } f_X(x) = \frac{1}{b} \cdot e^{-\frac{(x-a)}{b}} \cdot e^{-e^{-\frac{(x-a)}{b}}} \quad (\text{III.49})$$

$$\text{Domínio: } (-\infty ; \infty) \quad (\text{III.50})$$

$$\text{Média: } \mu = a + \gamma \cdot b \quad (\text{III.51})$$

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = \frac{\pi}{6} \cdot b \quad (\text{III.52})$$

- Distribuição de Frèchet (Tipo II)

$$\text{Equação: } f_x(x) = \frac{1}{b} \cdot \left[1 + c \cdot \frac{(x-a)}{b} \right]^{-\frac{(c+1)}{c}} \cdot e^{-\left[1 + c \cdot \frac{(x-a)}{b} \right]^{\frac{1}{c}}} \quad (\text{III.53})$$

$$\text{Domínio: } [a - (b/c) ; \infty) \quad (\text{III.54})$$

$$\text{Média: } \mu = a + b \cdot \Gamma\left(1 - \frac{1}{c}\right) \quad (\text{III.55})$$

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = \sqrt{\Gamma\left(1 - \frac{2}{c}\right) - \left[\Gamma\left(1 - \frac{1}{c}\right)\right]^2} \quad (\text{III.56})$$

- Distribuição de Weibull (Tipo III)

$$\text{Equação: } f_x(x) = \frac{1}{b} \cdot \left[1 - c \cdot \frac{(x-a)}{b} \right]^{-\frac{(c-1)}{c}} \cdot e^{-\left[1 - c \cdot \frac{(x-a)}{b} \right]^{\frac{1}{c}}} \quad (\text{III.57})$$

$$\text{Domínio: } (-\infty ; a + (b/c)] \quad (\text{III.58})$$

$$\text{Média: } \mu = a + b \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right) \quad (\text{III.59})$$

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right)\right]^2} \quad (\text{III.60})$$

Devem-se registrar algumas observações a respeito dessas distribuições de probabilidade.

A função Gama é a generalização do fatorial, definida por

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \cdot e^{-t} dt \quad (\text{III.61})$$

O número de Euler, $\gamma \cong 0,5772$, é definido por

$$\gamma = \frac{d\Gamma(1)}{dx} \quad (\text{III.62})$$

De acordo com certos valores dos parâmetros de locação, escala e forma, algumas das distribuições citadas recebem nomes particulares.

A distribuição gama com $b = 1$ é a *distribuição de Erlang*:

$$f_X(x) = \frac{(x-a)^{c-1} \cdot e^{-(x-a)}}{\Gamma(c)} \quad (\text{III.63})$$

A distribuição gama com $c = 1$ é a *distribuição exponencial*:

$$f_X(x) = \frac{1}{b} \cdot e^{-\frac{(x-a)}{b}} \quad (\text{III.64})$$

A distribuição gama com $c = \nu/2$ e $b = 2$ é a *distribuição de qui-quadrado com ν graus de liberdade*:

$$f_X(x) = \frac{\left(\frac{x-a}{2}\right)^{\frac{\nu}{2}-1} \cdot e^{-\frac{(x-a)}{2}}}{2 \cdot \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \quad (\text{III.65})$$

A distribuição de Student com $c = 1$ é a *distribuição de Cauchy*:

$$f_X(x) = \frac{1}{\pi \cdot b \cdot \left[1 + \left(\frac{x-a}{b}\right)^2\right]} \quad (\text{III.66})$$

A distribuição de Student com $c \rightarrow \infty$ tende à distribuição normal; na prática a semelhança já se torna satisfatória para amostra de tamanho n maior que 30.

A distribuição de Weibull com $c = 1$ é a *distribuição exponencial* (Eq. III.64).

A distribuição de Weibull com $a = 0$ e $c = 2$ é a *distribuição de Rayleigh*:

$$f_X(x) = \left(\frac{x}{b^2}\right) \cdot e^{-\frac{x^2}{2b^2}} \quad (\text{III.67})$$

Os dois casos particulares da distribuição de Weibull (Eqs. III.64 e III.67) não são definidos diretamente a partir da Eq. III.57; tratam-se, a rigor, de combinações de valores apropriados e rearranjos nas definições de cada parâmetro, em função do significado físico de cada um. A literatura é bastante confusa na padronização de equações e parâmetros.

III.4 Ajuste de distribuições de probabilidade a dados observados

Na inferência estatística, as informações obtidas através de dados amostrais são usadas para fazer generalizações sobre a população da qual as amostras foram obtidas. Os *métodos de inferência* ligam o mundo real aos modelos probabilísticos (ideais) assumidos.

Mesmo quando a distribuição e seus parâmetros são conhecidos, não se pode prever com certeza a ocorrência, ou não-ocorrência, de certos eventos específicos. O que se pode dizer é que *um evento ocorrerá com uma probabilidade a ele associada*. A incerteza, nesse caso, é devida à aleatoriedade do fenômeno. Entretanto, as incertezas também provêm da falta de precisão da estimativa dos seus parâmetros e da escolha da distribuição de probabilidade.

Ao se aumentar o tamanho das amostras, com a coleta de mais dados, as incertezas associadas aos erros da estimativa de parâmetros podem ser reduzidas; entretanto, as incertezas advindas da variabilidade inerente do fenômeno não diminuirão, podendo inclusive aumentar (ANG *et al.*, 1975).

A população, que representa o mundo real, pode ser modelada por uma variável aleatória X , com sua distribuição de probabilidades $f_X(x)$ e seus parâmetros de localização, escala e forma. O aspecto da distribuição pode advir de considerações físicas ou até mesmo empíricas; entretanto, seus parâmetros são relacionados com o mundo real e terão de ser obtidos somente com base no conjunto de dados observados, a partir da população; são necessariamente *estimados*, pois seus valores exatos são desconhecidos. Estimar os valores dos parâmetros populacionais é o melhor que se pode fazer. A Figura III.1 sintetiza a inferência e a estimação.

A estimativa dos parâmetros populacionais de uma distribuição é feita por ponto ou por intervalo. As estimações por pontos concernem ao cálculo de um único número, advindo do conjunto de dados amostrais observado, que representa o correspondente parâmetro. Já as estimativas por intervalos estabelecem um *intervalo de confiança* para o valor de cada parâmetro; esses intervalos indicam a sua própria precisão e são preferíveis às estimativas por pontos (SPIEGEL, 1994). Por simplificação, não serão abordadas neste trabalho as estimativas por intervalos.

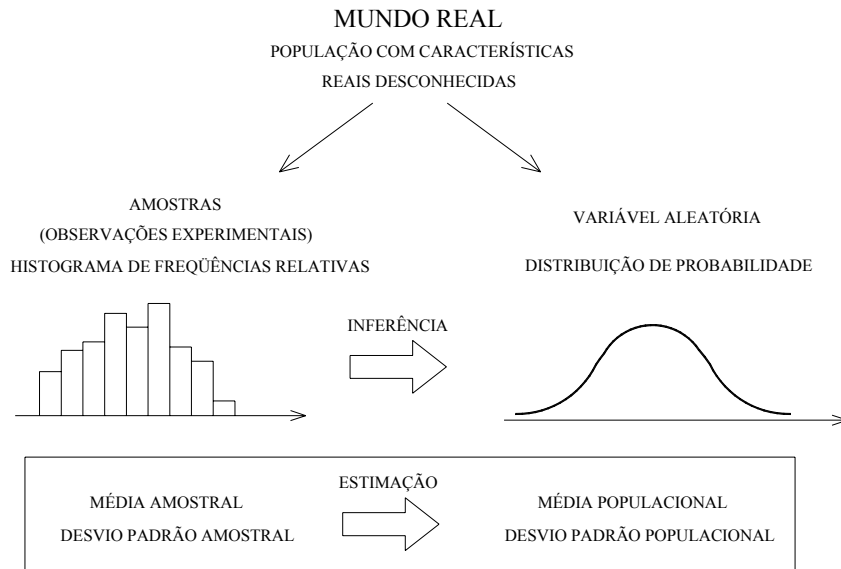


Figura III.1 Ilustração da inferência e da estimação (ANG *et al.*, 1975)

Existem alguns métodos pontuais consagrados de estimar os parâmetros de uma distribuição, entre eles o *método dos momentos*, usado neste trabalho por ser o de mais fácil aplicação. Nele, os j parâmetros populacionais podem ser obtidos, pontualmente, a partir das estimativas dos j primeiros momentos amostrais, admitidos iguais aos seus correspondentes momentos populacionais. Para essas estimativas dos momentos podem-se usar as equações discretas III.3, III.6, III.8 e III.9.

Como os momentos populacionais de cada distribuição são funções de seus próprios parâmetros, podem-se obter os valores desses parâmetros resolvendo simultaneamente as j equações, com j parâmetros incógnitos. Em suma, é esse procedimento que caracteriza o método.

Como algumas distribuições têm até quatro parâmetros, seria necessário calcular, em alguns casos, momentos até a quarta ordem; entretanto, quanto maior a ordem do momento, mais complexa e imprecisa é a sua equação.

Sem prejuízo ao método, utilizaram-se somente as equações dos *dois primeiros momentos* (valor médio e desvio padrão), por meio das Eqs. III.3 e III.6, por serem estes os principais descritores de uma distribuição de probabilidade (ANG *et al.*, 1975). Para não haver indeterminações no sistema, os parâmetros que sobram, geralmente os de forma, são determinados a partir de interpretações geométricas - seus valores são previamente obtidos em função das condições de contorno. Restam sempre duas equações teóricas, que definem o valor médio e o desvio padrão de cada distribuição, e no máximo dois parâmetros incógnitos, sem indeterminações. É imediata a solução dos

sistemas de equações resultantes: o uso de apenas as duas primeiras ordens garante ao método rapidez e simplicidade.

A Tabela III.1 mostra as respostas de cada sistema, ou seja, os valores de cada parâmetro das distribuições catalogadas em função apenas do valor médio e do desvio padrão.

A única distribuição com dois parâmetros de forma é a beta; o parâmetro d é dado por

$$d = \frac{b - \mu}{b - a} \cdot \left[\frac{(\mu - a)(b - \mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (\text{III.68})$$

Tabela III.1 Valores dos parâmetros de cada distribuição pelo método dos momentos

Distribuição	a	b	c
Normal	μ	σ	h
Lognormal	Cond. contorno	$\frac{\mu}{\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}}}$	$\sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right)}$
Gama	Cond. contorno	$\frac{\sigma^2}{\mu}$	$\frac{\mu^2}{\sigma^2}$
Exp. dupla	μ	$\frac{\sigma}{\sqrt{2}}$	-
Beta	Cond. contorno	Cond. contorno	$\frac{\mu - a}{b - a} \cdot \left[\frac{(\mu - a)(b - \mu)}{\sigma^2} - 1 \right]$
Student	μ	σ	$n - 1$
Logística	μ	$\sigma \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi}$	-
Gumbel	$\mu - \frac{\gamma \cdot \sigma \cdot \sqrt{6}}{\pi}$	$\sigma \cdot \frac{\sqrt{3}}{\pi}$	0
Frèchet	Cond. contorno	Solução de $b \cdot \Gamma\left(1 - \frac{1}{c}\right) = \mu$	Solução de $c \cdot \sqrt{\Gamma\left(1 - \frac{2}{c}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{c}\right)} = \sigma$
Weibull	Cond. contorno	Solução de $b \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right) = \mu$	Solução de $c \cdot \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{c}\right)} = \sigma$

Quando os momentos populacionais são definidos, o método dos momentos tem as vantagens da rapidez e da simplicidade. A desvantagem é que várias vezes os momentos não são definidos numa forma fechada (equação), o que dificulta ou impossibilita o uso do método; por outro lado, ele não dispõe das propriedades de otimização, que são apresentadas por outros métodos de estimação mais complexos, como o *método da máxima verossimilhança* e o dos *mínimos quadrados* (ANG *et al.*, 1975, www.itl.nist.gov/div898/handbook); porém, esses métodos não estão no escopo deste trabalho.

III.5 Testes de aderência

A representação de um fenômeno por uma função distribuição de probabilidades é algo que facilita sobremaneira o seu tratamento; uma vez definida a distribuição e os seus respectivos parâmetros, torna-se mais fácil calcular os níveis de probabilidade associados aos diversos eventos que envolvem tal fenômeno.

Ao se testar uma hipótese estabelecida, a probabilidade máxima com a qual se está disposto a correr um *erro Tipo I* (quando uma hipótese é rejeitada ao invés de ser aceita) é denominado *nível de significância* (κ) do teste (SPIEGEL, 1994). A área que contém os valores para os quais se rejeita a hipótese é chamada *região de rejeição* ou região crítica, ao passo que a área que contém dos valores para os quais não se rejeita a hipótese é a *região de aceitação* (KREISZIG, 1993).

Os resultados obtidos por meio de amostras nem sempre concordam com os resultados teóricos esperados, de acordo com as regras de probabilidade; utilizam-se então os *testes de aderência* para verificar a qualidade do ajuste da distribuição de probabilidade assumida. Além disso, quando duas ou mais distribuições aparentam ser modelos probabilísticos plausíveis, os testes de aderência podem ser usados para delinear o grau relativo de validade de cada uma delas, ajustando a eleger a distribuição mais adequada (ANG *et al.*, 1975). Citam-se neste trabalho dois testes de aderência: o *teste de qui-quadrado* e o *teste de Kolmogorov-Smirnov*.

Considerando-se uma amostra de tamanho n , o teste de qui-quadrado compara as frequências observadas f_1, f_2, \dots, f_k , já organizadas no histograma de frequência relativa em k intervalos, com as frequências teóricas e_1, e_2, \dots, e_k , da distribuição de probabilidade assumida; cada frequência teórica (e_i) é obtida através da função

distribuição acumulada de probabilidades, avaliada entre os limites inferior e superior do i -ésimo intervalo de classe.

A quantidade

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - e_i)^2}{e_i} \quad (\text{III.69})$$

é uma medida direta da discrepância entre as freqüências observadas e as teóricas e tem distribuição de probabilidade que se aproxima da distribuição de qui-quadrado com ν graus de liberdade (Eq. III.65) quando $n \rightarrow \infty$, sendo

$$\nu = k - 1 - u \quad (\text{III.70})$$

em que u é o número de estatísticas fornecidas à distribuição; por isso, a estatística χ^2 é chamada de *soma de qui-quadrado*. Na sistemática deste trabalho, são fornecidos a média e o desvio padrão; tem-se, portanto, $u = 2$ e $\nu = k - 3$.

Se a distribuição assumida satisfizer a inequação

$$\chi^2 < c_{1-\kappa, f} \quad (\text{III.71})$$

onde $c_{1-\kappa, f}$ é o valor (X) da distribuição de qui-quadrado (f) em que a probabilidade acumulada é igual a $(1 - \kappa)$, então a distribuição de probabilidade assumida é um modelo com concordância *aceitável* no nível de significância κ . Caso contrário a distribuição assumida é rejeitada, pelo menos nesse nível.

Segundo SPIEGEL (1994), são bastante suspeitas as circunstâncias em que χ^2 é muito próximo de zero, porque raramente as freqüências observadas concordam muito bem, quase perfeitamente, com as esperadas. Para lidar com essas situações, recomenda-se examinar os casos em que

$$\chi^2 > c_{\kappa, f} \quad (\text{III.72})$$

quando, em caso afirmativo, se pode dizer com mais segurança que a concordância é *muito boa* no nível de significância κ .

Quando em função de freqüências relativas, a soma de qui-quadrado é dada por

$$\chi^2 = n \cdot \sum_{i=1}^k \frac{(f_{i,\%} - e_{i,\%})^2}{e_{i,\%}} \quad (\text{III.73})$$

O teste de qui-quadrado perde a eficiência quando $k < 5$ ou quando algum $e_i < 5$ (ANG *et al.*, 1975, SPIEGEL, 1994).

A idéia do teste de Kolmogorov-Smirnov é comparar a distribuição acumulada de probabilidade, do modelo populacional assumido, com o histograma amostral de freqüências relativas acumuladas.

No caso de os dados amostrais já estarem dispostos em k intervalos de classe, computam-se, no ponto médio de cada intervalo, as diferenças entre as ordenadas da distribuição acumulada de probabilidade e do histograma de freqüência relativa acumulada, e considera-se a *discrepância* como o módulo da máxima diferença observada:

$$D = \max |F_{i,\%} - F_X(x_i)| \quad (\text{III.74})$$

Teoricamente essa discrepância é uma variável aleatória, cuja distribuição depende, entre outros, de n (ANG *et al.*, 1975). Os valores críticos (tolerâncias) da discrepância, de acordo com o tamanho da amostra, estão indicados na Figura III.2. Se a discrepância obtida para a distribuição em estudo for maior que a tolerância, o modelo estatístico é rejeitado; caso contrário, é considerado aceitável.

O teste de Kolmogorov-Smirnov apresenta as seguintes vantagens em relação ao teste de qui-quadrado:

- não depende de dados já divididos em intervalos (ele pode ser aplicado diretamente aos dados brutos das amostras);
- não são necessários valores mínimos de k e e_i para garantir a sua eficiência;
- não há perda de graus de liberdade.

Além do tamanho da amostra, a tolerância depende do nível de significância considerado. Como esse valor é arbitrário, os testes de aderência não fornecem informação absoluta sobre a validade do modelo probabilístico; uma distribuição que seja aceitável num certo nível de significância poderá não mais ser em outro nível. Entretanto, os testes são úteis na determinação da *qualidade relativa* entre duas ou mais distribuições (ANG *et al.*, 1975).

Portanto, os testes de aderência foram utilizados neste trabalho apenas com o intuito de comparar entre si as distribuições de probabilidade e indicar aquela mais adequada, que apresentar os melhores resultados nesses testes, independente de seus valores absolutos.

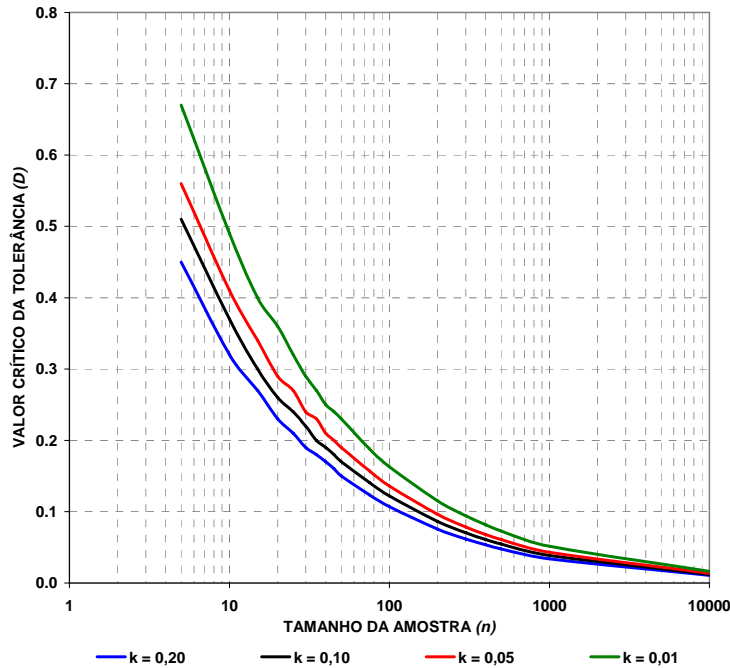


Figura III.2 Valores críticos da discrepância no teste de Kolmogorov-Smirnov para quatro níveis de significância

III.6 Conceitos relacionados ao período de retorno

III.6.1 A seqüência de Bernoulli

Uma sucessão de eventos similares pode ser modelada por uma *seqüência de Bernoulli* (ANG *et al.*, 1975), desde que satisfaça as seguintes condições:

- em cada tentativa pode haver somente dois resultados possíveis: a ocorrência (sucesso) ou a não-ocorrência (fracasso) do evento;
- a probabilidade de sucesso em cada tentativa, p , deve permanecer constante;
- cada tentativa deve ser estatisticamente independente das outras.

Pode-se considerar como uma *tentativa* a passagem de cada veículo sobre a obra de arte: cada veículo trafegando pode, ou não, gerar efeitos que excedam algum valor determinado. Cada veículo cruza a ponte de forma independente dos outros (ao menos com o tráfego fluindo livremente); a probabilidade de excedência dos valores dos esforços normativos (a probabilidade de sucesso, p), embora pequena, pode ser considerada constante para cada um deles. Portanto, a passagem dos veículos sobre a estrutura de uma ponte, nela gerando esforços solicitantes, pode constituir uma seqüência de Bernoulli.

III.6.2 A distribuição binomial

Denotando-se por p a probabilidade de sucesso de um evento em cada tentativa, então a probabilidade de ocorrerem exatamente x sucessos, entre n tentativas modeladas por uma seqüência de Bernoulli, é dada pela distribuição binomial

$$P(X = x) = \binom{n}{x} \cdot p^x \cdot (1-p)^{n-x}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, n \quad (\text{III.75})$$

com parâmetros n e p ; o *coeficiente binomial* é definido por

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} \quad (\text{III.76})$$

A distribuição binomial tem média e desvio padrão dados por

$$\bar{X} = n \cdot p \quad \text{e} \quad s = \sqrt{n \cdot p \cdot (1-p)} \quad (\text{III.77})$$

A probabilidade de se realizar uma seqüência particular, com exatamente x sucessos, é igual a $p^x \cdot (1-p)^{n-x}$; entretanto, a seqüência específica de tentativas na qual o evento pode ocorrer x vezes pode ser combinada entre n tentativas, de forma que o número de seqüências *diferentes* com exatamente x sucessos em n tentativas é igual ao número de combinações definidas pelo coeficiente binomial.

III.6.3 A distribuição geométrica

Na distribuição binomial, (Eq. III.75), a probabilidade de ocorrer *um único sucesso* em n tentativas é dada por:

$$P(X = 1) = n \cdot p \cdot (1-p)^{n-1} \quad (\text{III.78})$$

Portanto, a probabilidade de se realizar uma seqüência particular, com exatamente um sucesso em n tentativas, é igual a $p \cdot (1-p)^{n-1}$; como a seqüência específica de tentativas na qual o evento pode ocorrer x vezes pode ser combinada entre n tentativas, o número de seqüências diferentes com exatamente um sucesso em n tentativas é $\binom{n}{1} = n$. A distribuição binomial com $X = 1$ é conhecida como *distribuição geométrica*.

É de interesse a seqüência em que o único sucesso ocorra exatamente na última (n -ésima) tentativa; neste caso, convém referir-se à distribuição não mais em função do número de sucessos, mas em função do *número de tentativas* necessárias até o sucesso

do evento. Assim, a distribuição geométrica pode ser considerada como a distribuição discreta de probabilidades do número de tentativas, numa seqüência de Bernoulli, necessárias para a obtenção do primeiro sucesso; sua equação é dada por

$$P(X = x) = p \cdot (1 - p)^{x-1}, \quad x = 1, 2, \dots \quad (\text{III.79})$$

A variável x denota agora o número de tentativas até a ocorrência do evento. As probabilidades de sucesso em cada número de tentativas seguem uma progressão geométrica com o primeiro termo igual à probabilidade de ocorrência e razão igual à probabilidade de não-ocorrência ($q = 1 - p$).

A distribuição geométrica tem a propriedade de *perda de memória*: ao se repetir uma tentativa antes do primeiro sucesso, como ele ainda não ocorreu, o número de tentativas adicionais até a ocorrência não depende de quantos fracassos foram observados até então.

No caso limite da função contínua, a distribuição geométrica tende à distribuição exponencial, definida pela Eq. III.64.

O valor médio e o desvio padrão da distribuição geométrica são dados por

$$\bar{X} = \frac{1}{p} \quad \text{e} \quad s = \frac{\sqrt{1-p}}{p} \quad (\text{III.80})$$

III.6.4 O período de retorno

Em um problema temporal que possa ser modelado por uma seqüência de Bernoulli, se as tentativas individuais (ou intervalos) na seqüência forem estatisticamente independentes, o tempo decorrido até a primeira ocorrência (o número de intervalos de tempo até o primeiro sucesso de um evento) deve ser igual ao tempo decorrido entre duas ocorrências consecutivas quaisquer do mesmo evento, ou seja, o tempo médio de recorrência deve ser igual ao tempo decorrido até a primeira ocorrência: a probabilidade de ocorrência é constante em cada intervalo de tempo. Portanto, pode-se modelar o tempo de recorrência por uma distribuição geométrica.

O tempo médio de recorrência é conhecido como *período de retorno*; é o intervalo de tempo (geralmente em anos) ao final do qual um evento tem 100% de probabilidade de ocorrer. Numericamente, o período de retorno é igual ao valor médio da distribuição geométrica; portanto, de acordo com as Eqs. III.80, pode-se afirmar que, *em média*, o período de retorno é recíproco à probabilidade de ocorrência do evento em

um intervalo de tempo unitário (correspondente a cada tentativa individual da seqüência de Bernoulli). Em outras palavras, em um período de retorno de \bar{T} anos, o evento de superação tem probabilidade de sucesso (ser igualado ou excedido) igual a $(1/\bar{T})$ por ano. O período de retorno é apenas uma duração média entre dois eventos; não pode ser considerado como o tempo real entre ocorrências, que é uma variável aleatória.

III.7 Extrapolações

III.7.1 Sistemática de extrapolação

As estatísticas e probabilidades associadas a valores extremos são informações de importância especial, pois a consideração de situações extremas futuras é fundamental na elaboração dos códigos normativos (ANG *et al.*, 1984).

O procedimento ideal seria o ajuste de uma distribuição de probabilidade a amostras de valores extremos observados (SAGRILO *et al.*, 2004); entretanto, na maioria das vezes os valores extremos das variáveis observadas não estão disponíveis nas bases de dados. A aquisição de dados de valores extremos demanda períodos de tempo consideráveis. Quando esses valores existem, suas amostras disponíveis geralmente são pequenas; as extrapolações são quase sempre necessárias para se estimar comportamentos em longo prazo.

Se os valores extremos de longo prazo não forem disponíveis, como no presente trabalho, efetua-se em primeiro lugar o ajuste da melhor distribuição aos dados medidos em curto prazo (Seção III.5), para se seguir posteriormente com a extrapolação.

Para estarem referidas a um período de tempo unitário (equivalente a uma única tentativa), as extrapolações são feitas com base na ampliação do *número de tentativas*.

Inicialmente considera-se como número de tentativas o total de valores observados (o tamanho da amostra, n), no período de observação (denotado por Δt). Os valores observados são extrapolados por uma proporção: se houve n tentativas num intervalo de tempo Δt , então deve haver $n_{\bar{T}}$ tentativas equivalentes a um período de retorno \bar{T} . O número de tentativas referentes à extrapolação é, portanto, igual a

$$n_{\bar{T}} = n \cdot \frac{\bar{T}}{\Delta t} \quad (\text{III.81})$$

Citam-se a seguir dois processos de extrapolação: o primeiro se dá por meio da Estatística de Extremos e o segundo pelo inverso do período de retorno.

III.7.2 Extrapolação pela Estatística de Extremos

A Estatística de Extremos permite definir a distribuição dos valores extremos (máximos ou mínimos) de uma variável aleatória a partir da sua distribuição (ajustada) de probabilidades (SAGRILO *et al.*, 2004).

Sendo X a variável aleatória inicial, com função distribuição acumulada de probabilidade conhecida (já ajustada), $F_X(x)$, considerem-se amostras de tamanho n tomadas da população de X ; cada amostra é um conjunto de n observações, $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, representando, respectivamente, o primeiro, o segundo, ..., e o n -ésimo valor observado.

Se a seqüência de n observações for repetida, *outros* valores máximos e mínimos serão obtidos; portanto, o maior e o menor valor possíveis compõem, por si mesmos, populações próprias. Como cada valor observado é imprevisível antes da sua real observação, pode-se dizer que cada observação é o valor de uma variável aleatória, e que o conjunto de observações $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ é a realização de variáveis aleatórias amostrais $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. Os maiores valores das amostras de tamanho n são também variáveis aleatórias e, portanto, têm suas próprias distribuições de probabilidade. É de se esperar que estas distribuições de valores extremos estejam relacionadas de alguma forma com a distribuição de probabilidade da variável inicial, chamada de *distribuição parente*.

Em uma amostra de tamanho n , busca-se o valor máximo de $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, isto é, a variável aleatória $Y_n = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. De acordo com a Eq. III.12, a probabilidade de se encontrar valores menores ou iguais a y na distribuição F_X é igual a $F_X(y)$. Se Y_n , o maior valor entre $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, for menor que algum valor y , então *todas as outras variáveis aleatórias amostrais* terão necessariamente de ser menores que y ; desta forma, a distribuição acumulada de probabilidades de Y_n é igual a

$$F_{Y_n}(y) = P(Y_n \leq y) = P(X_1 \leq y, X_2 \leq y, \dots, X_n \leq y) = \prod_{i=1}^n F_{X_i}(y) \quad (\text{III.82})$$

Por simplicidade, considera-se que X_1, X_2, \dots, X_n , além de estatisticamente independentes, são *identicamente distribuídas* (todas têm a mesma função distribuição de probabilidades), com a mesma distribuição da variável aleatória inicial, X :

$$F_{X_1}(x) = F_{X_2}(x) = \dots = F_{X_n}(x) = F_X(x) \quad \Rightarrow \quad F_{X_i}(y) = F_X(y), \forall i \quad (\text{III.83})$$

Com todas as distribuições de probabilidades idênticas, tem-se

$$F_{Y_n}(y) = \prod_{i=1}^n F_X(y) = [F_X(y)]^n \quad (\text{III.84})$$

De acordo com a Eq. III.14, a função densidade de probabilidade é dada por

$$f_{Y_n}(y) = \frac{dF_{Y_n}(y)}{dy} = n \cdot [F_X(y)]^{n-1} \cdot f_X(y) \quad (\text{III.85})$$

Portanto, a distribuição de probabilidade dos valores máximos depende do tamanho da amostra e da distribuição parente ajustada. A extrapolação se dá pela substituição, na Eq. III.84, do número de tentativas n pelo valor extrapolado $n_{\bar{T}}$ da Eq. III.81:

$$F_{Y_{n_{\bar{T}}}}(y) = [F_X(y)]^{n_{\bar{T}}} = [F_X(y)]^{n \cdot \frac{\bar{T}}{\Delta t}} \quad (\text{III.86})$$

A função densidade de probabilidade é dada por

$$f_{Y_{n_{\bar{T}}}}(y) = \frac{dF_{Y_{n_{\bar{T}}}}(y)}{dy} = n \cdot \frac{\bar{T}}{\Delta t} \cdot [F_X(y)]^{\left(n \cdot \frac{\bar{T}}{\Delta t}\right)-1} \cdot f_X(y) \quad (\text{III.87})$$

A distribuição $f_{Y_{n_{\bar{T}}}}(y)$, definida pela Eq. III.87, é chamada de *distribuição exata de máximos*.

Para caracterizar a distribuição de máximos por meio de um único número que a represente, deve-se destacar nela um *valor representativo*. Como visto na Seção III.1, o valor representativo deve ser um *valor central*.

O *valor médio* da distribuição de máximos é determinado pela aplicação da Eq. III.16 à Eq. III.87:

$$\mu_{Y_{n_{\bar{T}}}} = n \cdot \frac{\bar{T}}{\Delta t} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} y \cdot [F_X(y)]^{\left(n \cdot \frac{\bar{T}}{\Delta t}\right)-1} \cdot f_X(y) dy \quad (\text{III.88})$$

A mediana é a abscissa y_{med} de $F_{Y_{n_{\bar{T}}}}(y)$ tal que

$$F_{Y_{n\bar{T}}}(y_{med}) = 0,5 \quad (III.89)$$

A moda de $f_{Y_{n\bar{T}}}(y)$, y_{mod} , é o valor mais provável da distribuição.

$$\frac{df_{Y_{n\bar{T}}}(y_{mod})}{dy} = 0 \quad (III.90)$$

Não há uma regra ou determinação específica que indique a adoção de um destes valores centrais, por ser o valor representativo “correto”, em detrimento dos outros; cada qual tem as suas vantagens e desvantagens. O uso do valor médio é vantajoso nas distribuições amostrais discretas, devido à sua simples obtenção e, neste trabalho, devido ao emprego adequado ao método dos momentos. Entretanto, deve-se lembrar que as curvas obtidas pela Estatística de Extremos representam um comportamento populacional; não há o favorecimento ao valor médio.

A forma da distribuição de valores máximos depende basicamente do comportamento da *extremidade final* da distribuição parente; as porções iniciais têm pouquíssima influência em seu aspecto. Portanto, para evitar grandes erros, deve-se usar como distribuição parente da variável em análise, aquela distribuição que melhor se ajuste aos dados observados na extremidade de máximos: os testes de qui-quadrado e de Kolmogorov-Smirnov devem priorizar, neste caso, a porção final dos histogramas.

III.7.3 Formas assintóticas

As distribuições exatas de valores extremos tendem a convergir em certas formas limite, chamadas de *formas assintóticas*, quando $n \rightarrow \infty$. Na realidade, devido ao tamanho finito das amostras, as formas assintóticas são aproximações; entretanto, elas têm grande uso prático, porque tornam a análise de extremos bastante simples, a partir de formas bem definidas, evitando a recorrência à Eq. III.86. Se o tamanho da amostra for suficientemente grande, a diferença entre as formas assintóticas e as distribuições exatas de extremos torna-se irrelevante.

A Eq. III.91 condensa estas formas limite, sendo denominada *distribuição generalizada de valores extremos*.

$$F(y) = e^{-\left[1+c\frac{(y-a)}{b}\right]^{\frac{1}{c}}}, \quad a, c \in \mathfrak{R}, \quad b > 0 \quad (III.91)$$

Dependendo do valor do parâmetro de forma, essas distribuições são conhecidas como *Tipo I* (de Gumbel), *Tipo II* (de Frèchet) e *Tipo III* (de Weibull) (RODRIGUES, 2001, BAUTISTA, 2002):

- se $c > 0$: distribuição de Frèchet;
- se $c = 0$: distribuição de Gumbel;
- se $c < 0$: distribuição de Weibull.

Note-se que, para o Tipo I, deve-se extrair o limite da expressão geral da distribuição acumulada quando c tende a zero:

$$\lim_{c \rightarrow 0} e^{-\left[1+c \cdot \frac{(x-a)}{b}\right]^{\frac{-1}{c}}} = e^{-\frac{-(x-a)}{b}} \quad (\text{III.92})$$

A distribuição de Gumbel é, portanto, um caso particular tanto da distribuição de Frèchet quanto da distribuição de Weibull, quando o parâmetro de forma se anula.

Embora as formas assintóticas Tipos I, II e III (Eqs. III.49, III.53 e III.57) sejam deduzidas a partir da Estatística de Extremos, elas podem ser igualmente usadas como distribuições parentes, para representar variáveis aleatórias que não necessariamente representem eventos de extremos, auxiliando na busca de uma distribuição que melhor se ajuste aos dados amostrais. De fato, as distribuições assintóticas só serão usadas neste trabalho como distribuições parentes; preferiu-se trabalhar com as distribuições exatas na Estatística de Extremos.

As três formas assintóticas não englobam todos os tipos possíveis de distribuições; porém, quase todas as equações disponíveis na literatura seguem uma forma assintótica de um dos três tipos quando $n \rightarrow \infty$. Assim como no caso das distribuições exatas, a definição de um ou outro tipo de forma assintótica de máximos depende da extremidade final da distribuição parente (SAGRILO *et al.*, 2004, ANG *et al.*, 1984, BAUTISTA, 2002): se o decaimento da extremidade final da distribuição parente for exponencial (como nas distribuições normal, gama ou exponencial), a distribuição de máximos é do Tipo I; se for polinomial (como na distribuição de Cauchy), a distribuição de máximos é do Tipo II; se a distribuição parente tiver domínio limitado superiormente (como na distribuição beta), a distribuição de máximos é do Tipo III.

A existência das formas assintóticas é baseada no postulado da estabilidade, que demonstra que uma variável inicial cuja distribuição é uma das três formas assintóticas,

tem distribuição de extremos com a mesma forma assintótica correspondente (RODRIGUES, 1999, ANG *et al.*, 1984).

III.7.4 Extrapolação pelo inverso do período de retorno

Uma forma mais simples de extrapolação é obtida com a própria distribuição parente ajustada.

De acordo com o exposto na Seção III.6.4, a probabilidade de ocorrência de um evento é, em média, recíproca ao período de retorno. Como visto na Seção III.7.1, para se referenciar um intervalo de tempo unitário, deve-se considerar este intervalo como o próprio tamanho da amostra, n ; a probabilidade de ocorrência do evento é, portanto, igual a

$$p = \frac{1}{n} \quad (\text{III.93})$$

Por outro lado, de acordo com as Eqs. III.11b e III.12, a probabilidade de ocorrência do evento é igual a

$$p = 1 - \int_{-\infty}^z f_X(x) dx = 1 - F_X(z) \quad (\text{III.94})$$

Igualando as Eqs. III.93 e III.94, tem-se

$$F_X(z) = 1 - \frac{1}{n} \quad (\text{III.95})$$

O valor z da variável aleatória X que satisfaz a Eq. III.95 é definido como *valor máximo característico*: é o valor de X tal que, numa amostra de tamanho n (referida a um intervalo de tempo Δt), o número esperado de valores amostrais maiores que z seja igual a 1 (ANG *et al.*, 1984).

$$n \cdot [1 - F_X(z)] = 1 \quad (\text{III.96})$$

A quantidade à direita da Eq. III.94 é chamada de *nível de probabilidade*; representa, neste trabalho, a probabilidade de ocorrer numa ponte a passagem de um veículo cujas solicitações iguaem ou superem um determinado valor, num intervalo de tempo Δt (a probabilidade de excedência).

Para a extrapolação, substitui-se na Eq. III.95 o tamanho da amostra, n , pela variável $n_{\bar{T}}$ da Eq. III.81; obtém-se, assim, o *valor máximo característico extrapolado*, $z_{\bar{T}}$, tal que seja satisfeita a condição

$$F_X(z_{\bar{T}}) = 1 - \frac{\Delta t}{n \cdot T} \quad (\text{III.97})$$

III.7.5 Comparação entre os métodos de extrapolação

A Estatística de Extremos permite maior flexibilidade na análise estatística porque obtém uma *curva de extrapolação*, na qual se podem definir precisamente quaisquer estatísticas e probabilidades associadas ao modelo populacional, além de seus valores representativos.

A extrapolação pelo inverso do período de retorno, em contrapartida, não possibilita a obtenção de uma nova curva, pois fornece apenas um valor representativo; entretanto, é um processo menos laborioso, pois calcula este valor representativo da extrapolação baseando-se apenas na distribuição parente, já ajustada.

Quanto aos valores representativos obtidos em cada método, é de se esperar que o valor máximo característico extrapolado, $z_{\bar{T}}$, da Eq. III.97, seja próximo aos valores representativos da curva extrapolada por meio da Estatística de Extremos, dados pelas Eqs. III.88, III.89 e III.90.

A moda, por ser a abscissa *mais provável* da distribuição de valores máximos, é o valor central que mais se assemelha ao valor $z_{\bar{T}}$ da distribuição parente. No caso de uma distribuição parente normal, seu valor máximo característico extrapolado é muito próximo da moda da correspondente distribuição de valores máximos (O'CONNOR *et al.*, 2000). Se a distribuição parente for uma forma assintótica, seu valor máximo característico extrapolado é exatamente igual ao valor modal da distribuição de valores máximos (ANG *et al.*, 1984).

IV Efeitos da passagem dos veículos sobre as pontes

IV.1 Introdução

O objetivo do Capítulo IV é apresentar os histogramas de frequência de ocorrência de esforços solicitantes devidos à ação do tráfego em pontes típicas da malha rodoviária brasileira, conforme registrado pelos Postos de Monitoramento do DNIT (ver Seção II.2.2). Apresenta-se também uma comparação entre os esforços solicitantes devidos ao tráfego e aqueles produzidos pelos veículos-tipo da NB 6 (1960) e da NBR 7188 (1982). A partir da base de dados utilizada neste trabalho, expressa pelos histogramas de peso das Figuras II.20, determinam-se, por análise dos modelos estruturais das pontes, os histogramas de esforços solicitantes, os quais se referem a um intervalo de tempo de 2,5 anos. A extrapolação destes esforços para um período de retorno compatível com o de projeto será apresentada no Capítulo V.

As seguintes simplificações são adotadas nas análises estruturais deste trabalho:

- análise estática para cargas verticais. O efeito dinâmico será considerado por meio do coeficiente de impacto usualmente adotado pela NBR 7187 (2003), o qual depende apenas do comprimento do vão. Os efeitos de frenagem e aceleração não são considerados.

- os esforços solicitantes são calculados para passagem de veículos isolados - não se considera mais de um veículo sobre a ponte.

Neste trabalho foram consideradas pontes com pista simples de duas faixas de tráfego, com dois valores de largura do tabuleiro, correspondentes aos modelos antigo do DNER e o atual. As pontes analisadas são estruturas em grelha com duas longarinas e transversinas de seção retangular constante, com vãos entre 10m e 40m (2,5m a 10m no caso dos balanços). Nesta faixa de comprimentos de vão, as solicitações determinantes são devidas à passagem do tráfego normal, em velocidade, enquanto que para grandes vãos os maiores esforços são oriundos de situações de engarrafamentos, com acúmulo de caminhões trafegando em baixa velocidade (sem efeito dinâmico) (CALGARO, 1998, PRAT, 2001).

Neste trabalho consideraram-se pontes em grelha de concreto com 2 longarinas de seção retangular em sistemas biapoiados, contínuos de dois vãos e em balanço.

As dimensões dos elementos da supraestrutura (laje, longarinas e transversinas) foram tomadas admitindo-se pontes executadas em concreto armado. Esta escolha

reflete a realidade brasileira das obras de arte especiais na faixa de comprimento de vãos considerada. Ainda assim, as pontes executadas em outros materiais (concreto protendido, aço ou mistas) não estão excluídas desta análise, pois os esforços solicitantes em obras com o mesmo sistema estrutural adotado (grelha com elementos de seção constante) seriam semelhantes aos das pontes em concreto armado, para os sistemas usuais de distribuição transversal de cargas.

IV.2 Geometria das pontes analisadas

A seção transversal das pontes é fixada em função das dimensões mínimas dos veículos que nelas deverão circular e do número de faixas de tráfego; além destas, podem compor a seção transversal as faixas de segurança, os guarda-rodas e os acostamentos. Para a passagem de pedestres são previstos passeios (MASON, 1977).

Os acostamentos são usados como desvios eventuais, parada de veículos ou mesmo o trânsito de pedestres, quando não houver passeios. A finalidade de desvio importa ao acondicionamento psicológico do motorista; no caso de redução de largura ou eliminação do acostamento, há considerável redução na velocidade do escoamento.

As rodovias federais de Classe I com pista simples de duas faixas de tráfego (rodovias de mão dupla) são padronizadas com largura entre $7,00m$ e $7,20m$, com acostamentos de $2,50m$; durante muitos anos, os tabuleiros das pontes para estas rodovias foram construídos de forma padronizada, com pista de $8,20m$ de largura e guarda-rodas de $0,90m$, com largura total de $10m$ (modelo antigo do DNER), sem acostamentos (ver a Figura IV.1). Para compensar a obstrução psicológica provocada pelos $0,30m$ de altura dos guarda-rodas, alargava-se a pista $0,50m$ ou $0,60m$ para cada lado. Posteriormente o DNER orientou-se pelo padrão americano e adotou para as pontes rurais a largura total da estrada, com a pista e os acostamentos, de modo a reduzir a obstrução psicológica: passou-se a considerar a largura útil padrão de $12,20m$ (o modelo atual). Para impedir a saída dos veículos da pista, alguns guarda-rodas dos tabuleiros estreitos antigos foram substituídos por barreiras laterais (PFEIL, 1985). Esses tabuleiros são, portanto, representativos das obras de arte na malha rodoviária nacional, que ainda têm pistas de mão dupla.

Muitas das principais rodovias do país foram construídas entre as décadas de 1960 e de 1980, adotando-se o modelo antigo do DNER e utilizando-se para o projeto das pontes o veículo-tipo Classe 36. Os tabuleiros do modelo atual começaram a ser

utilizados pelo DNER anteriormente à mudança da NB 6 para a NBR 7188; portanto, existem obras com a geometria do modelo atual projetadas para as Classes 36 e 45.

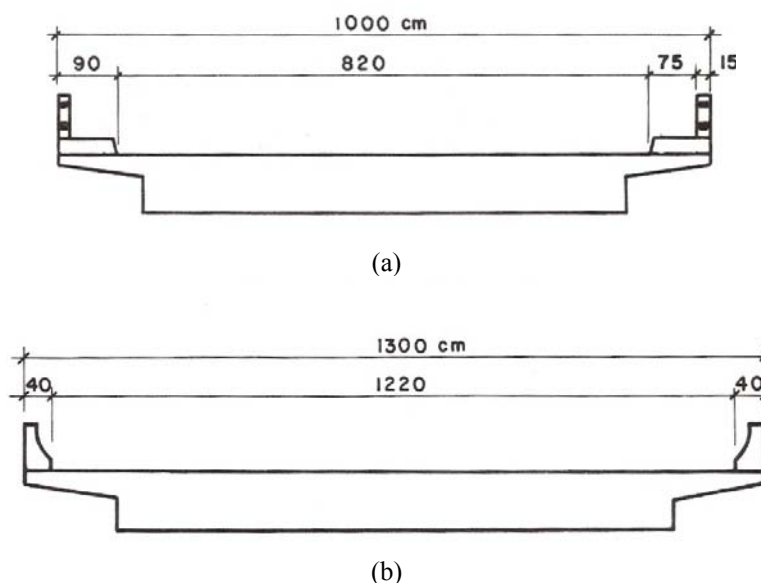


Figura IV.1 Tabuleiros de modelo antigo do DNER (a) e o atual (b) (PFEIL, 1985)

Este estudo restringiu-se aos vãos de $10m$, $20m$, $30m$ e $40m$ e balanços de $2,5m$, $5m$, $7,5m$ e $10m$, para os quais a ação determinante é a da passagem do tráfego normal e não a situação de engarrafamento ou acúmulo de veículos sobre as pontes.

Quanto ao esquema estrutural longitudinal, foram considerados os casos de viga biapoiada, viga contínua de dois vãos iguais e viga em balanço, esta última representando os balanços existentes nas vigas biapoiadas ou contínuas. Esse pequeno conjunto de esquemas é bastante representativo do padrão geral das pontes de pequenos vãos. Para os sistemas em balanço foram considerados vãos de $2,5m$, $5m$, $7,5m$ e $10m$.

As pontes analisadas são de concreto armado, com as seções transversais ilustradas nas Figuras IV.2, e que constam de laje associada a duas longarinas de seção retangular constante. Este sistema representa grande parte das obras de arte em concreto armado nas rodovias federais na faixa de vãos estabelecida.

A Tabela IV.1 apresenta as dimensões adotadas para os elementos estruturais ilustrados nas Figuras IV.2. Estas dimensões seguem de forma coerente o padrão usual de dimensionamento das obras de arte em concreto armado. Consideraram-se duas transversinas intermediárias para os vãos de $10m$ e $20m$ e três para os vãos de $30m$ e $40m$. Para os sistemas engastados e livres foram consideradas transversinas na extremidade dos balanços, e ainda uma transversina intermediária para os vãos de $7,5m$

e 10m. As dimensões dos elementos nos balanços de 2,5m, 5m, 7,5m e 10m correspondem, respectivamente, aos das vigas contínuas de dois vãos, de comprimentos 10m, 20m, 30m e 40m.

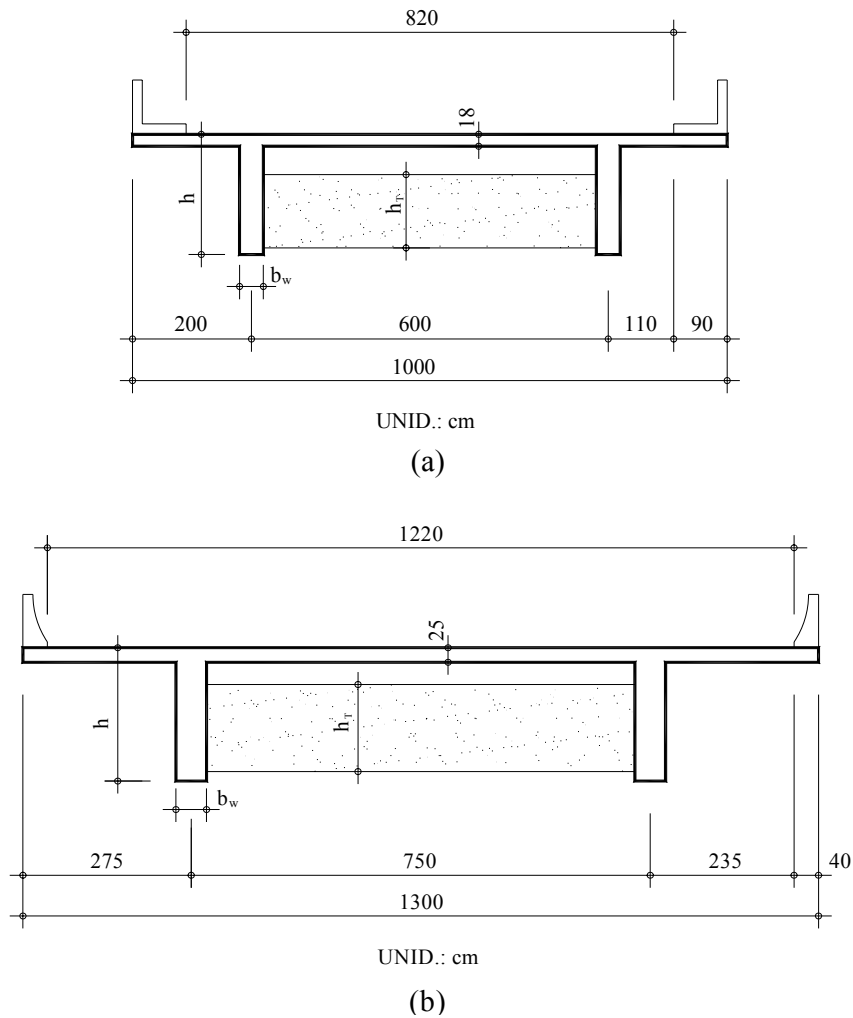


Figura IV.2 Seções transversais das pontes com tabuleiro de modelo antigo do DNER (a) e de modelo atual (b), ambas com duas longarinas

Tabela IV.1 Dimensões dos elementos estruturais (m)

Elemento estrutural	Dimensão	Viga biapoiada				Viga contínua de dois vãos			
		10m	20m	30m	40m	10m	20m	30m	40m
Longarina	h	1,00	2,00	3,00	3,50	0,90	1,80	2,50	3,00
	b_w	0,35	0,40	0,45	0,50	0,35	0,40	0,45	0,50
Transversina	h_t	0,80	1,60	2,40	2,80	0,70	1,40	2,00	2,40
	b_t	0,30	0,35	0,40	0,45	0,30	0,35	0,40	0,45

IV.3 Esforços solicitantes considerados

Neste trabalho foi considerada apenas a análise do esforço cortante e do momento fletor, pois são os esforços mais destacados nas longarinas das pontes em grelha usuais e devidos às cargas móveis predominantemente verticais como o tráfego de veículos. A torção e o esforço normal, nesse caso, são secundários.

Para a viga biapoiada consideraram-se o esforço cortante no apoio e o momento fletor no meio do vão, enquanto que para a viga contínua foram analisados três esforços solicitantes: esforço cortante no apoio central, momento fletor positivo no vão e momento fletor negativo no apoio central.

O momento fletor negativo no apoio extremo de estruturas com balanço foi considerado através do sistema de viga engastada e livre, que gera a mesma linha de influência para este esforço na seção do engaste.

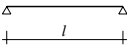
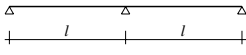
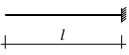
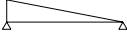
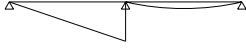
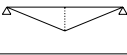
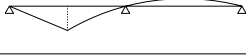
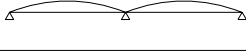
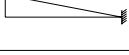
A Tabela IV.2 ilustra os esquemas longitudinais usados neste trabalho, bem como as suas linhas de influência e as seções de referência.

As linhas de influência são diagramas que descrevem a variação de uma determinada solicitação numa seção quando uma carga unitária percorre a estrutura. Procuram-se as posições de atuação do conjunto de cargas que extremizem o esforço na seção considerada; são utilizadas para estruturas de barras.

Para cada seção, posiciona-se o conjunto de cargas nas posições mais desfavoráveis, obtendo-se os valores dos esforços através do carregamento das linhas de influência. Com os valores máximos das solicitações, calculados nas diversas seções, são traçadas as envoltórias dos esforços.

A envoltória de um esforço interno solicitante é o gráfico que mostra, em cada seção, os valores máximo e mínimo de determinada solicitação que se verifica na estrutura em questão. Desta maneira, quaisquer outras posições da carga móvel produzirão solicitações intermediárias; se o elemento estrutural for dimensionado para os valores de esforços obtidos nas envoltórias, sua estabilidade fica assegurada para qualquer posição da carga móvel (PFEIL, 1985).

Tabela IV.2 Esquemas estruturais e linhas de influência consideradas

ESQUEMA ESTRUTURAL		VIGA BIAPOIADA	VIGA CONTÍNUA DE DOIS VÃOS	VIGA EM BALANÇO
REPRESENTAÇÃO				
L.I. FORÇA CORTANTE	DIAGRAMA			
	LOCAL	APOIO	APOIO CENTRAL	
L.I. MOMENTO FLETOR POSITIVO	DIAGRAMA			
	LOCAL	MEIO DO VÃO	MEIO DO VÃO	
L.I. MOMENTO FLETOR NEGATIVO	DIAGRAMA			
	LOCAL		APOIO CENTRAL	ENGASTE

IV.4 Carregamento

O carregamento consta dos veículos da base de dados utilizada neste trabalho, aqui denominados veículos reais, e dos veículos-tipo das normas de projeto. A análise para passagem dos veículos reais foi feita admitindo veículos de peso unitário ($1kN$) para posterior multiplicação dos efeitos pelos pesos existentes e coeficientes de impacto.

Distribuição da carga por eixo

Os pesos percentuais por eixo de qualquer veículo variam com o seu peso total. Quando vazios, os caminhões têm maior carga no eixo dianteiro, devido à presença do motor na sua porção anterior. À medida que eles vão sendo carregados, há a tendência de o peso da carga transportada ser suportado quase totalmente pelos eixos traseiros; a carga no eixo dianteiro pouco varia.

Os modelos experimentais considerados pela SIURB-SP (2006) mostram variações lineares da carga em cada eixo em função do peso do veículo. Alternativamente, pode-se relacionar o peso percentual de cada eixo contra o peso total, notando-se, neste caso, sua variação hiperbólica. O modelo de carga simplificado usado neste trabalho considera os pesos percentuais constantes para qualquer valor de peso total. A Figura IV.3 ilustra estes percentuais do peso em cada eixo para os veículos das seis classes consideradas neste trabalho, bem como as suas distâncias entre eixos.

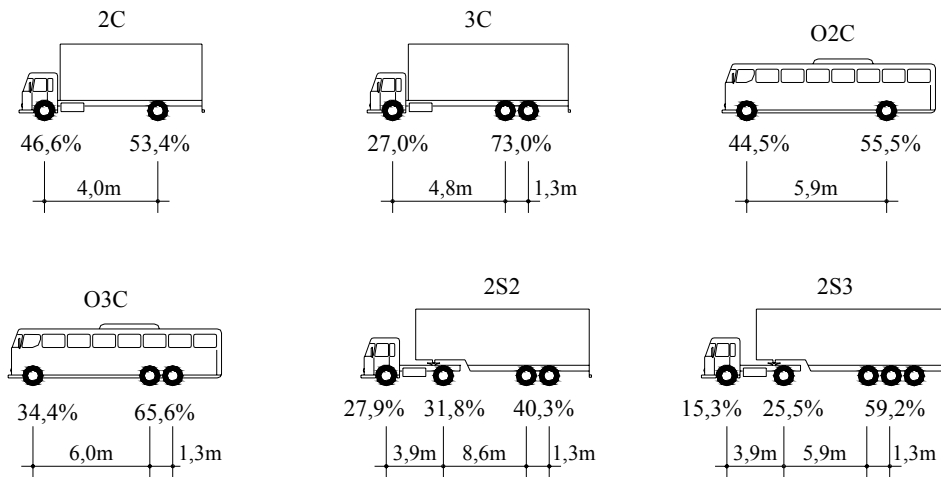


Figura IV.3 Distâncias entre eixos e percentuais do peso total em cada eixo dos veículos utilizados neste trabalho

A título de comparação, as Figuras IV.4a,b,c ilustram em linha cheia as variações de percentual de peso por eixo (SIURB-SP, 2006) nos veículos 2C, 3C e 2S3, respectivamente. São mostradas ainda, nas Figuras IV.4, os seguintes pontos:

- em círculos, as proporções axiais da Lei da Balança, que correspondem à divisão da carga máxima permitida por eixo (ver a Tabela II.2) pelo PBT ou PBTC de cada classe de veículo;
- em triângulos, os valores médios de carga por eixo dos veículos vazios, obtidos das especificações técnicas dos fabricantes dos veículos catalogados (Seção II.3.2);
- em quadrados, os valores médios de carga por eixo obtidos da base de dados do DNIT (Figura IV.3), associados ao peso médio do veículo.

Na Figura IV.4c também foi acrescentada a variação de peso percentual do eixo *tandem* triplo nos veículos 2S3 da base de dados, a partir da Figura II.19.

Com exceção do veículo 2C (Figura IV.4a), observa-se que os valores médios de percentual de carga por eixo obtidos da base de dados do DNIT (quadrados cheios) representam com boa aproximação os percentuais de peso em uma ampla faixa de peso total dos veículos carregados. Por isso adotou-se como simplificação, neste trabalho, percentuais de carga por eixo constantes (linhas retas nas Figuras IV.4) e iguais aos valores médios obtidos dos registros do DNIT.

A presença de veículos muito pequenos na classe 2C fez o peso médio medido nas rodovias se assemelhar muito à média desses veículos quando vazios, como se observa na Figura IV.4a.

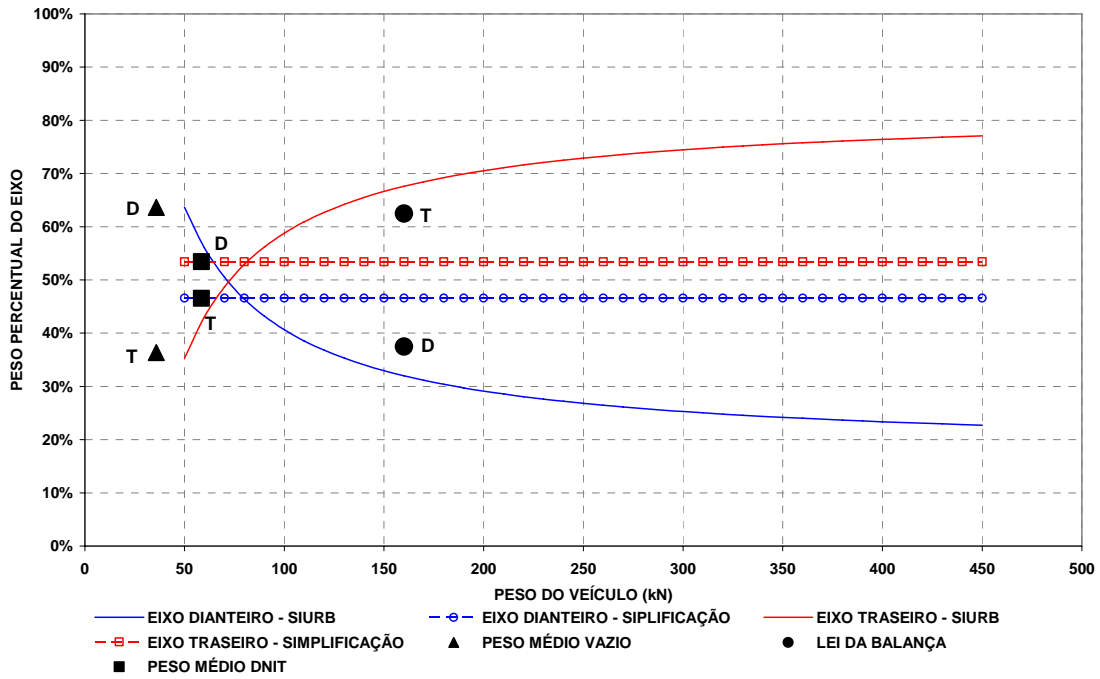


Figura IV.4a Variação do peso percentual por eixo nos veículos de classe 2C

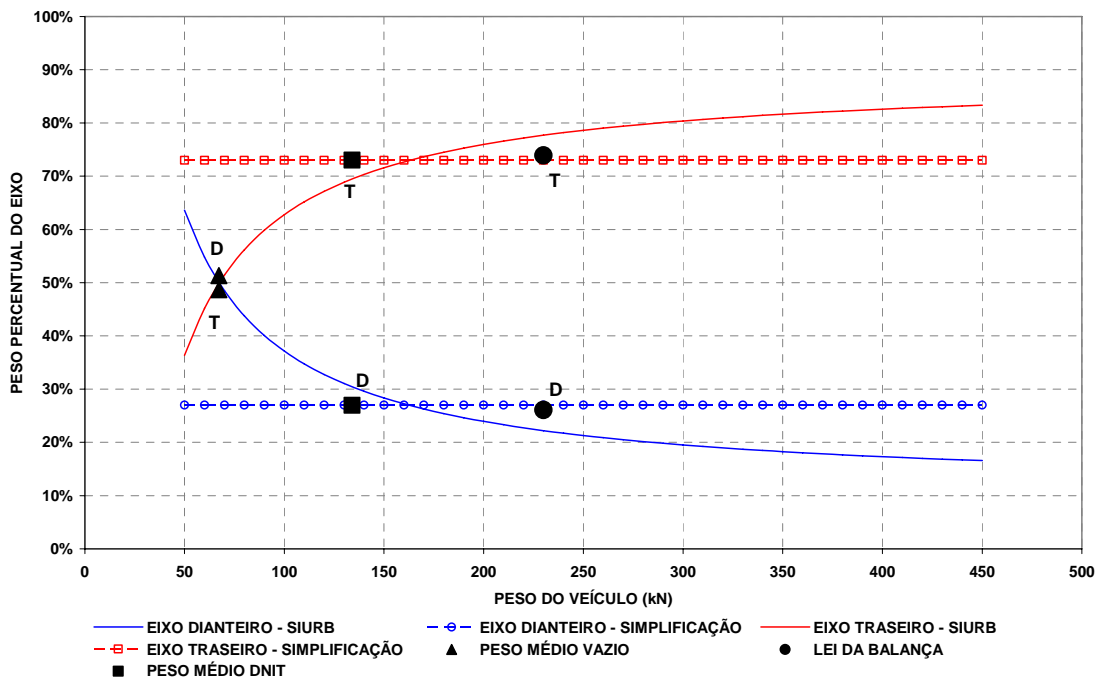


Figura IV.4b Variação do peso percentual por eixo nos veículos de classe 3C

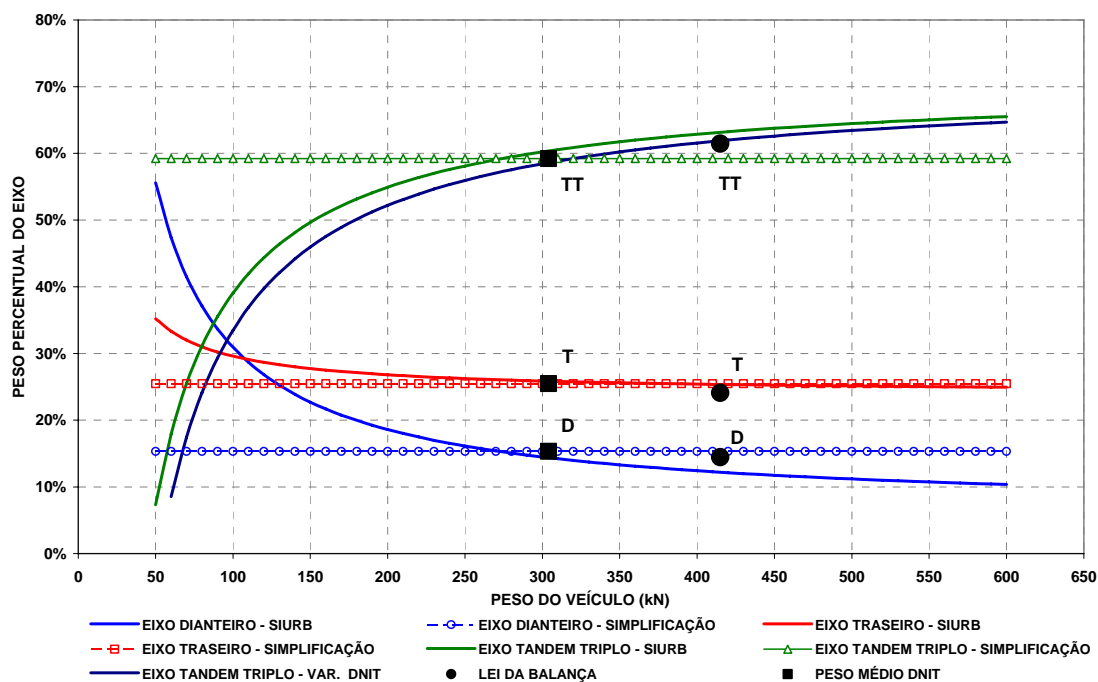


Figura IV.4c Variação do peso percentual por eixo nos veículos de classe 2S3

Não foi possível elaborar estes gráficos para os veículos O2C, O3C e 2S2. Nos ônibus esses gráficos dependem da posição do motor (central, dianteiro ou traseiro); quanto ao caminhão 2S2, não foi possível reunir informações suficientes para a sua análise de comportamento axial.

Como as informações sobre cavalos mecânicos e carretas foram adquiridas separadamente, não haveria precisão no eventual cálculo dos pesos percentuais dos veículos 2S2 e 2S3 quando vazios, razão pela qual estes valores foram omitidos.

Posição transversal dos veículos sobre a pista

Os veículos passam sobre as pontes ao longo das faixas de tráfego, um atrás do outro. Há também a possibilidade de tráfego ao longo do acostamento. Para se determinar os efeitos atuantes na estrutura devidos aos veículos reais, é necessário conhecer as distribuições de frequência dos veículos por faixa, incluindo o acostamento, e também a distribuição de frequência dos desvios do eixo dos veículos em relação ao centro das faixas, como ilustra a Figura IV.5. Entretanto, os efeitos dos veículos reais em tráfego corrente ao longo das faixas marcadas no pavimento não é o enfoque principal de projeto.

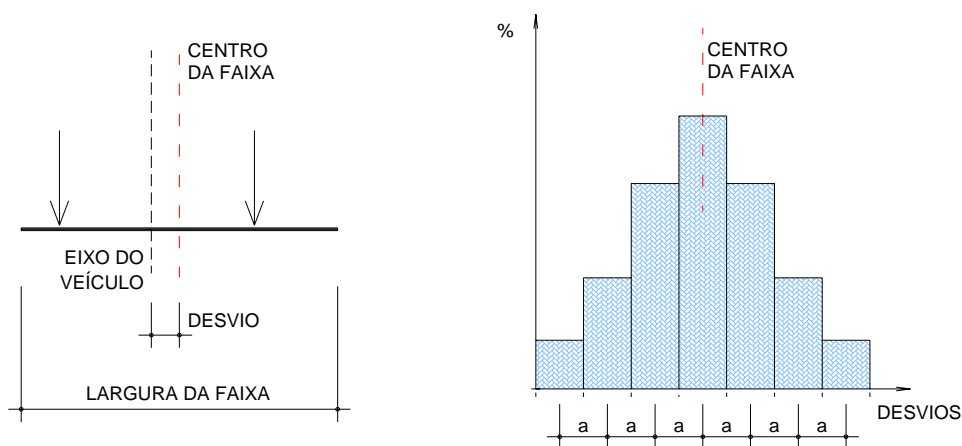


Figura IV.5 Desvio do eixo do veículo em relação ao centro da faixa

Em termos de projeto, deve-se prever a possibilidade de os veículos trafegarem fora das faixas originais, seja por alteração das larguras das faixas, por problemas de acidentes ou por desvios do tráfego na pista (em função de obras, por exemplo). Chega-se, desta forma, ao conceito das faixas hipotéticas (*notional lanes*), adotadas em algumas normas de projeto e definidas na largura útil da pista de forma a produzir os efeitos mais adversos no elemento estrutural considerado. No Eurocódigo 1 estas faixas hipotéticas são adotadas com $3m$ de largura, admitindo-se a passagem centrada do veículo (sem desvios do eixo do veículo em relação ao eixo da faixa).

Na prática usual de projeto de pontes no Brasil, utilizando o veículo-tipo da NBR 7188, considera-se o veículo-tipo (cargas concentradas e distribuídas) na posição mais desfavorável para a determinação da solicitação num certo elemento estrutural. Por exemplo, para o momento fletor máximo na viga extrema de uma ponte em grelha, posiciona-se o veículo com as rodas encostadas no guarda-rodas, ou com a carroceria faceando a barreira lateral (Figura IV.6). Observa-se que esta posição pouco difere daquela obtida considerando-se as faixas nominais do Eurocódigo.

Para manter a coerência com a prática atual no Brasil, os cálculos de esforços solicitantes nas vigas foram feitos, neste trabalho, adotando-se as posições laterais de todos os veículos conforme ilustrado na Figura IV.6.

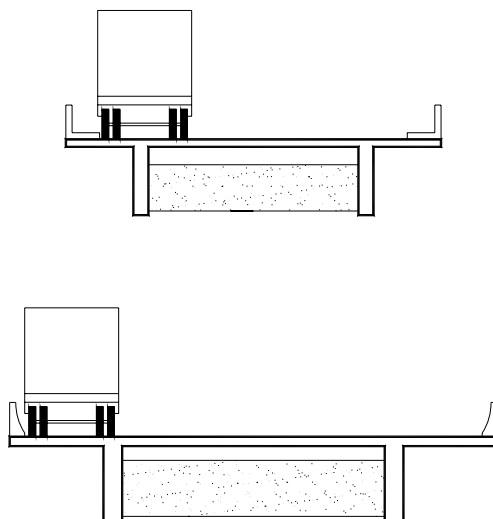


Figura IV.6 Posições mais desfavoráveis para a passagem dos veículos

IV.5 Modelo estrutural e análise

Utilizou-se o modelo numérico ilustrado na Figura IV.7 para análise via método dos elementos finitos, no qual as duas longarinas e as transversinas foram modeladas por elementos de pórtico. Considerou-se a laje do tabuleiro com parte integrante das mesas das longarinas, modeladas com seção transversal em T. Para as transversinas, tanto as intermediárias como as de apoio, foram consideradas seções retangulares. As larguras efetivas de mesa das longarinas foram calculadas considerando as larguras colaborantes, de acordo com a NBR 6118 (2003). A Figura IV.8 mostra a nomenclatura utilizada para as dimensões das seções transversais; as Tabelas IV.1 e IV.3a,b mostram os valores adotados para estas dimensões.

A análise dos modelos estruturais sob a ação da passagem dos veículos, para obtenção dos valores dos esforços cortantes e momentos fletores nas seções de interesse, foi feita pelo programa computacional SAP 2000®. Registraram-se os valores obtidos para cada seção crítica das estruturas modeladas, tanto para a passagem dos veículos reais (da base de dados utilizada) quanto para os das Classes 36 e 45.

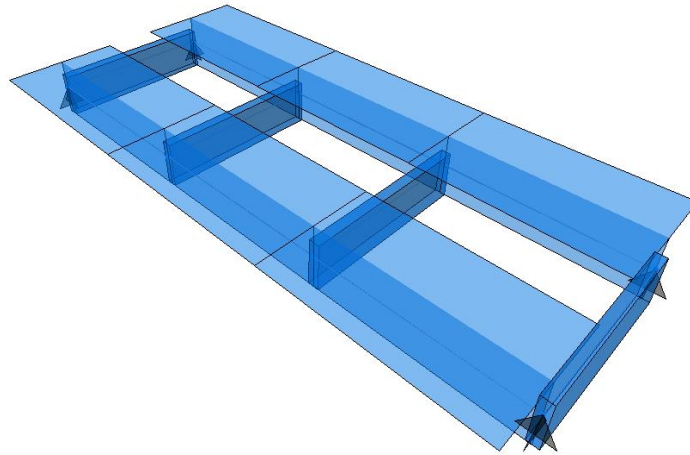


Figura IV.7 Modelo estrutural para a ponte considerada em viga biapoiada

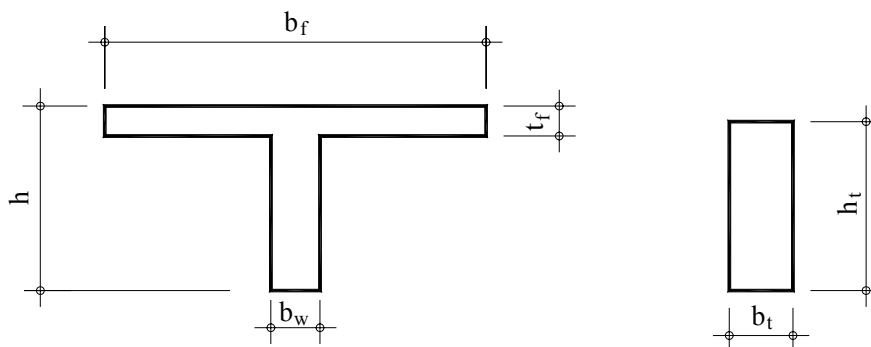


Figura IV.8 Nomenclatura utilizada para as dimensões das transversinas e das longarinas

Tabela IV.3a Larguras efetivas de mesa nos modelos estruturais com tabuleiro de modelo antigo

Comprimento do vão (m)	Largura da mesa (m)		
	Viga biapoiada	Viga contínua de dois vãos	Viga em balanço
10	2,35	1,85	1,35
20	4,20	3,40	2,40
30	5,00	4,45	3,45
40	5,00	5,00	4,25

Tabela IV.3b Larguras efetivas de mesa nos modelos estruturais com tabuleiros de modelo atual

Comprimento do vão (m)	Largura da mesa (m)		
	Viga biapoiada	Viga contínua de dois vãos	Viga em balanço
10	2,35	1,85	1,35
20	4,40	3,40	2,40
30	5,95	4,95	3,45
40	6,50	6,00	4,50

Nos modelos, as cargas por eixo dos veículos foram aplicadas diretamente nas posições transversais críticas, ilustradas na Figura IV.6, nas quais os veículos são considerados encostados no guarda-rodas ou na barreira lateral. O programa fornece diretamente as envoltórias de esforços.

O cálculo manual seria feito com base no conceito de trem-tipo, calculado a partir da distribuição transversal das cargas. Denomina-se *trem-tipo* de uma longarina a porção de carga nela produzida pelas cargas móveis do veículo-tipo, colocadas na posição mais desfavorável da largura do tabuleiro (PFEIL, 1985). Como o trem-tipo depende da geometria, qualquer variação das dimensões transversais gera um conjunto de cargas diferente. Os esforços solicitantes máximos nas vigas são determinados “carregando-se” as respectivas linhas de influência com o trem-tipo.

Os esforços solicitantes devidos aos veículos reais foram obtidos admitindo-se veículos ideais de peso unitário ($1kN$), com a distribuição percentual média do peso nos seus eixos mostrada na Figura IV.3. Para cada veículo de peso unitário se deslocando sobre a estrutura em estudo, registram-se os valores das solicitações (esforços cortantes e momentos fletores) nas seções indicadas na Tabela IV.2. As Figuras IV.9 mostram os esforços solicitantes máximos nas pontes biapoiadas com tabuleiros de modelo antigo do DNER, devidos aos veículos de peso unitário de cada classe.

Verifica-se que, com a ausência das cargas de multidão, o esforço cortante tende para $1kN$ com o aumento do comprimento do vão, enquanto o momento fletor tem variação aproximadamente linear. Nota-se também a semelhança, em termos de solicitações, entre as classes 2C e 3C e entre as classes O2C e O3C, o que indica que eixos próximos têm comportamento preponderantemente conjunto; as pequenas distâncias se tornam irrelevantes. Os conjuntos de eixos poderiam ser modelados simplificadamente como um único eixo. As Tabelas IV.4 apresentam os resultados de

esforços para vão de 10m, respectivamente para pontes com tabuleiro de modelo antigo do DNER e modelo atual.

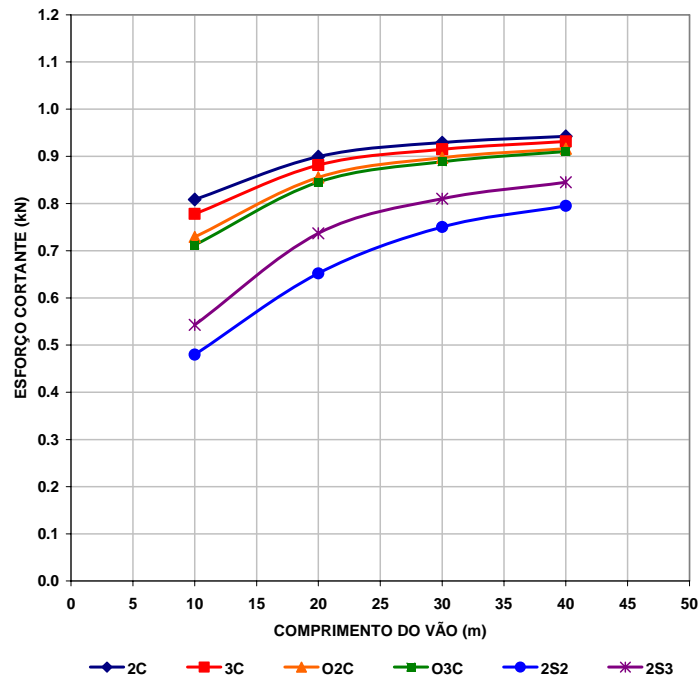


Figura IV.9a Esforço cortante no apoio, devida ao veículo de peso unitário de cada classe, em função do comprimento do vão, no modelo biapoiado com tabuleiro de modelo antigo

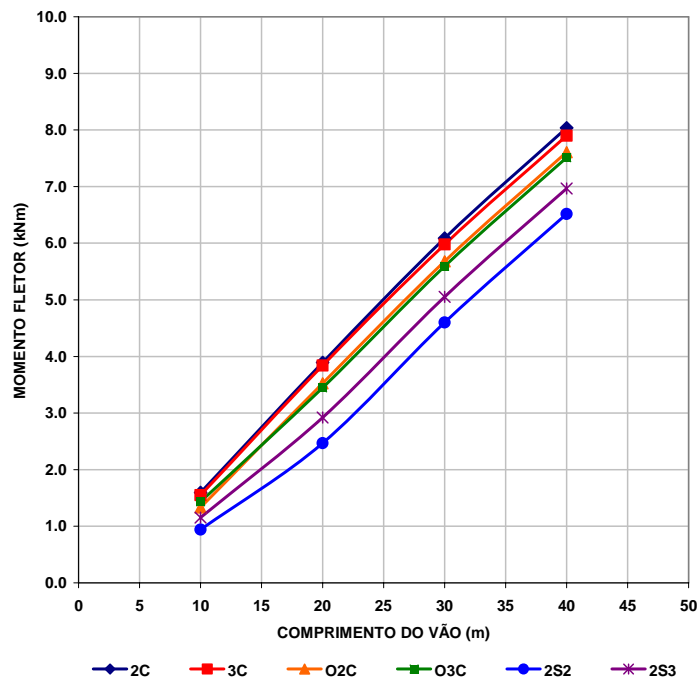


Figura IV.9b Momento fletor no meio do vão, devida ao veículo de peso unitário de cada classe, em função do comprimento do vão, no modelo biapoiado com tabuleiro de modelo antigo

Tabela IV.4a Valores dos esforços devidos aos veículos de peso unitário no modelo biapoiado em tabuleiro de modelo antigo, com vão de 10m

Veículo	Esforço cortante no apoio (kN)	Momento fletor no meio do vão (kNm)
O2C	0,73	1,33
O3C	0,78	1,55
2C	0,81	1,60
3C	0,78	1,55
2S2	0,48	0,94
2S3	0,54	1,15

Tabela IV.4b Valores dos esforços devidos aos veículos de peso unitário no modelo biapoiado em tabuleiro de modelo atual, com vão de 10m

Veículo	Esforço cortante no apoio (kN)	Momento fletor no meio do vão (kNm)
O2C	0,77	1,47
O3C	0,75	1,58
2C	0,85	1,78
3C	0,82	1,74
2S2	0,51	1,06
2S3	0,58	1,29

A distribuição mais equilibrada do peso entre os eixos do veículo 2S2 (ver Figura IV.3) torna os efeitos deste veículo de peso unitário menores que os das outras classes, como se verifica nas Figuras IV.9.

Observa-se também, comparando os valores dos esforços das Tabelas IV.4a e IV.4b, que a maior excentricidade dos veículos passando pelo tabuleiro de modelo atual (ver Figura IV.6) acaba por elevar os valores dos esforços solicitantes, em comparação ao modelo antigo.

IV.6 Distribuições de frequência dos esforços solicitantes devidos aos veículos reais

Os histogramas de esforços solicitantes devidos aos veículos de cada classe são obtidos pela multiplicação destes efeitos devidos aos veículos de peso unitário pelos valores de peso total e suas respectivas frequências de ocorrência. Isto feito para cada uma das seis classes, de acordo com os histogramas mostrados nas Figuras II.20a-f, resultariam seis histogramas para representar cada esforço solicitante considerado.

Entretanto, é preferível dispor de um histograma condensado para cada esforço, de forma a representar univocamente a solicitação devida ao tráfego real em cada estrutura. Para tal, deve-se considerar a probabilidade de ocorrência de cada faixa de peso de veículo, de cada uma das 6 classes, *em relação ao número total de veículos considerado*, como mostrado na Tabela II.6. Desta forma, a soma de todas as frequências de ocorrência de esforço solicitante devido às seis classes de veículos, é unitária.

Os histogramas dos seis esforços solicitantes destacados na Tabela IV.2, para os modelos estruturais com tabuleiro de modelo antigo do DNER e 10m de vão (e balanço de 2,5m), são mostrados nas Figuras IV.10.

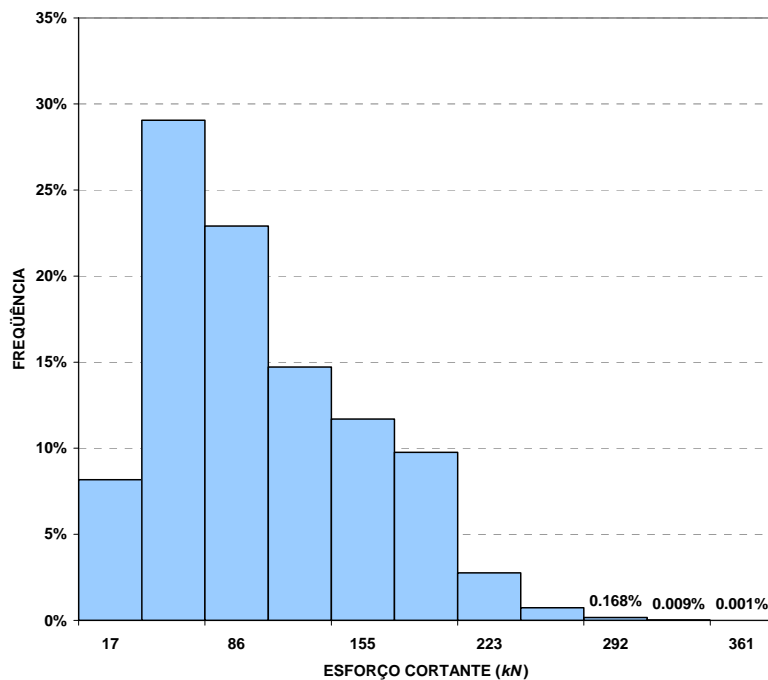


Figura IV.10a Distribuição de frequências do esforço cortante devido ao tráfego real no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 98,8kN$; $s = 56,0kN$)

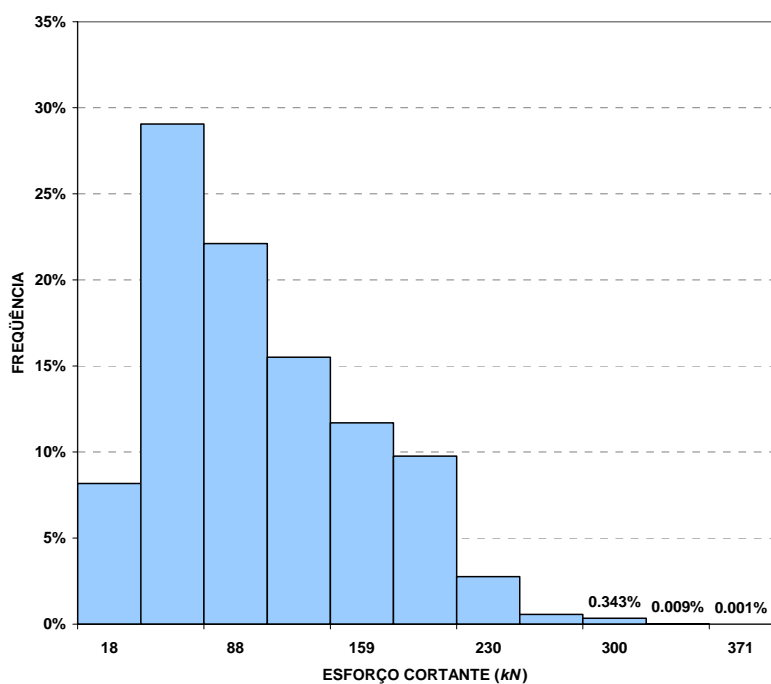


Figura IV.10b Distribuição de freqüências do esforço cortante devido ao tráfego real, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 102kNm$; $s = 57,8kNm$)

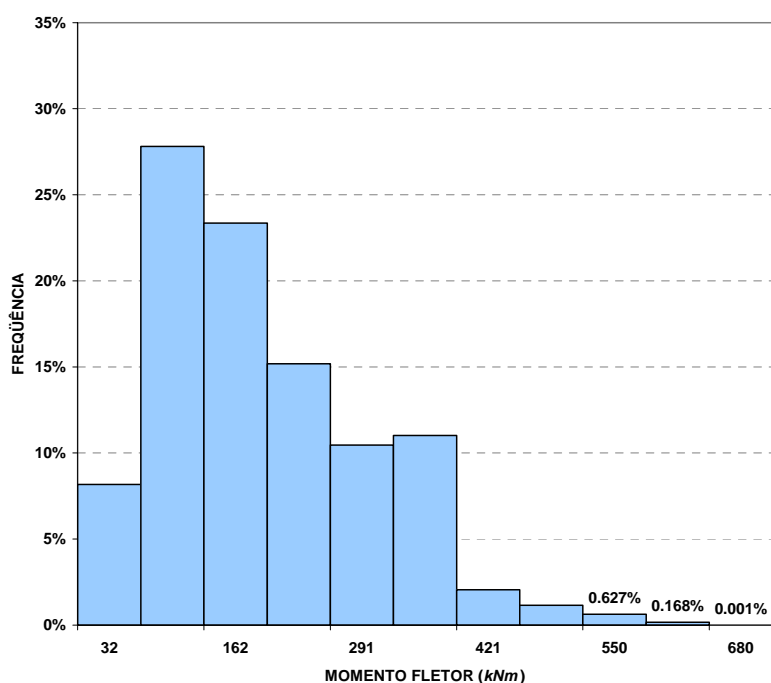


Figura IV.10c Distribuição de freqüências do momento fletor positivo devido ao tráfego real, no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 190kNm$; $s = 110kNm$)

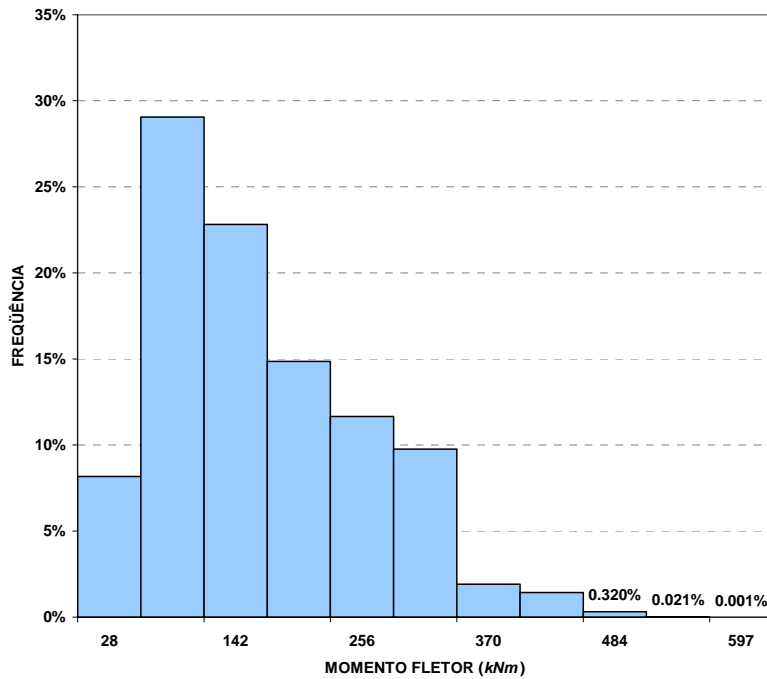


Figura IV.10d Distribuição de freqüências do momento fletor positivo devido ao tráfego real, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 164kNm$; $s = 94,3kNm$)

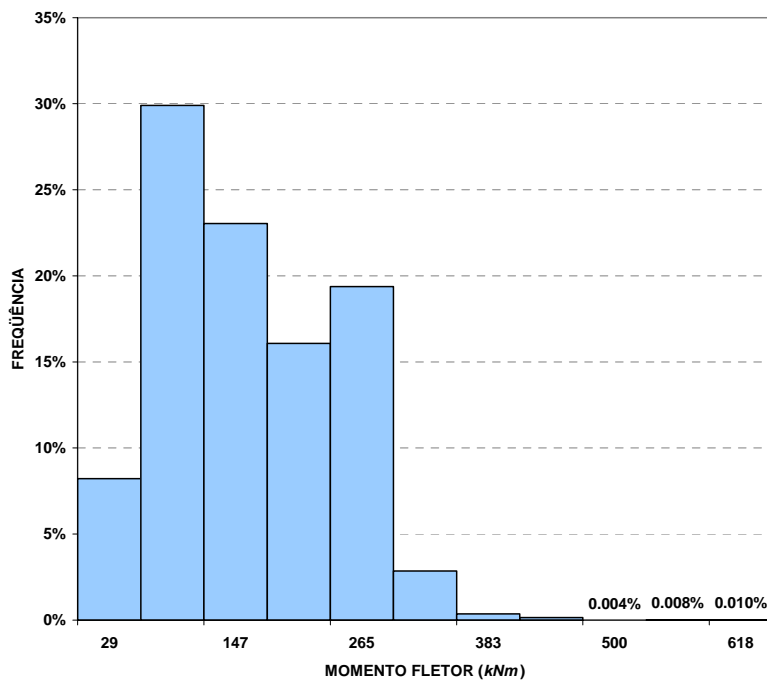


Figura IV.10e Distribuição de freqüências do momento fletor negativo devido ao tráfego real, no sistema em balanço com 2,5m de vão e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 159kNm$; $s = 80,9kNm$)

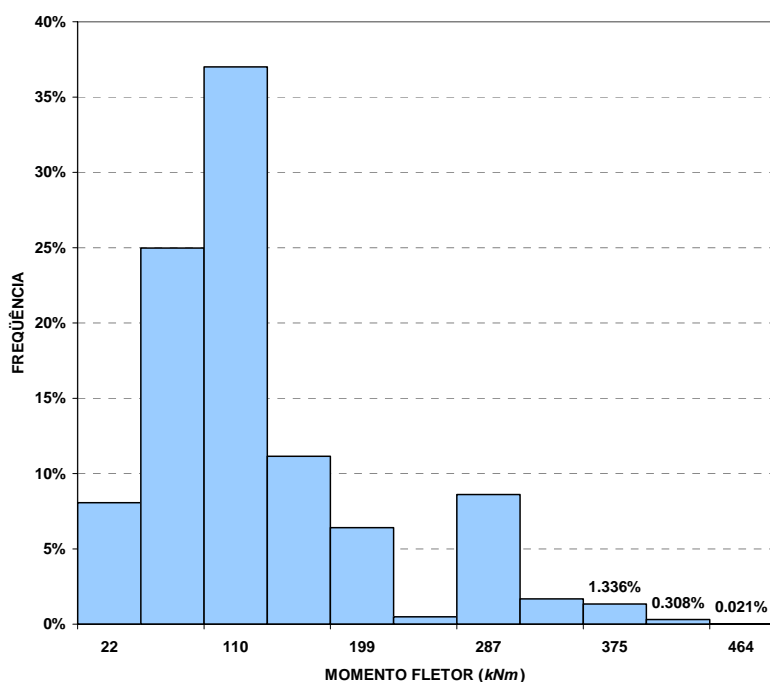


Figura IV.10f Distribuição de freqüências do momento fletor negativo devido ao tráfego real, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 127kNm$; $s = 80,0kNm$)

IV.7 Comparação dos efeitos dos veículos reais isolados com os efeitos dos veículos normativos

Nesta Seção apresentam-se as comparações entre os efeitos do tráfego real e o do carregamento do projeto. Os veículos normativos são acompanhados pela carga de multidão distribuída, o que implica em variação linear do esforço cortante e variação parabólica do momento fletor em função do comprimento do vão, como mostram as Figuras IV.11, que ilustram a variação dos esforços devidos aos veículos-tipo no sistema biapoiado com tabuleiro de modelo antigo. Para o mesmo sistema, a Tabela IV.5 apresenta os valores dos esforços devidos aos veículos de projeto para vão de 10m.

Os histogramas apresentados nas Figuras IV.12 mostram a distribuição de freqüências das razões de esforços, Q/Q_{36} e M/M_{36} , entre os esforços solicitantes devidos ao tráfego real e aqueles gerados pelo carregamento Classe 36. Estas razões foram obtidas dividindo-se os valores dos esforços devidos ao tráfego real (Figuras IV.10) pelos respectivos esforços devidos ao veículo-tipo. Como está sendo considerado o tabuleiro de modelo antigo, a comparação foi feita apenas com o carregamento Classe 36.

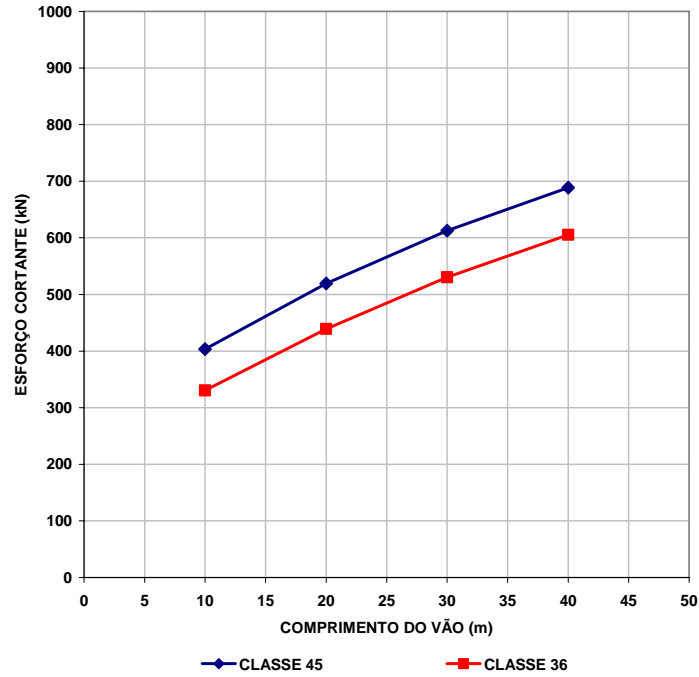


Figura IV.11a Esforço cortante no apoio, devido a cada veículo-tipo, em função do comprimento do vão, no sistema biapoiado em tabuleiro de modelo antigo

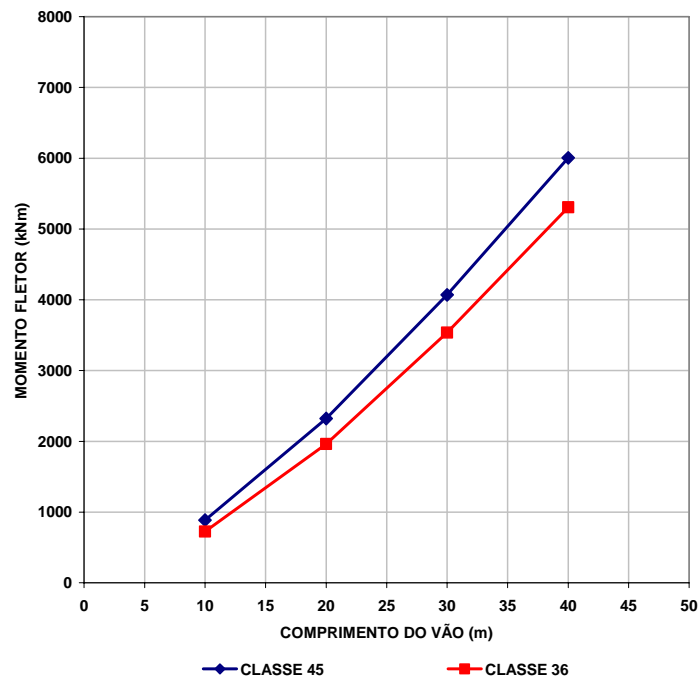


Figura IV.11b Momento fletor no meio do vão, devido a cada veículo-tipo, em função do comprimento do vão, no sistema biapoiado de tabuleiro antigo

Tabela IV.5 Valores dos esforços devidos aos veículos normativos no modelo biapoiado com tabuleiro de modelo antigo, com vão de 10m

Veículo	Esforço cortante no apoio (kN)	Momento fletor no meio do vão (kNm)
Classe 36	331	724
Classe 45	404	886

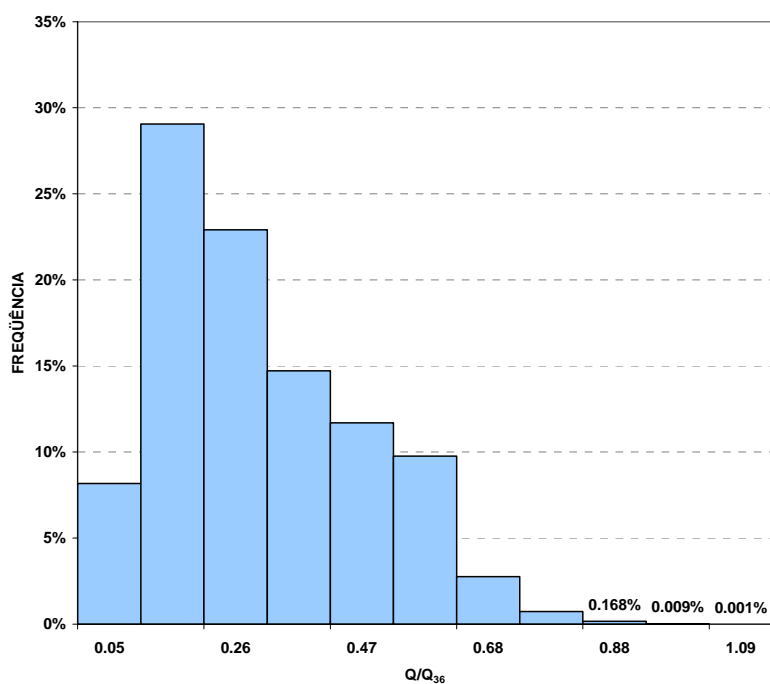


Figura IV.12a Distribuição de freqüências da razão entre os esforços cortantes devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,299$; $s = 0,169$)

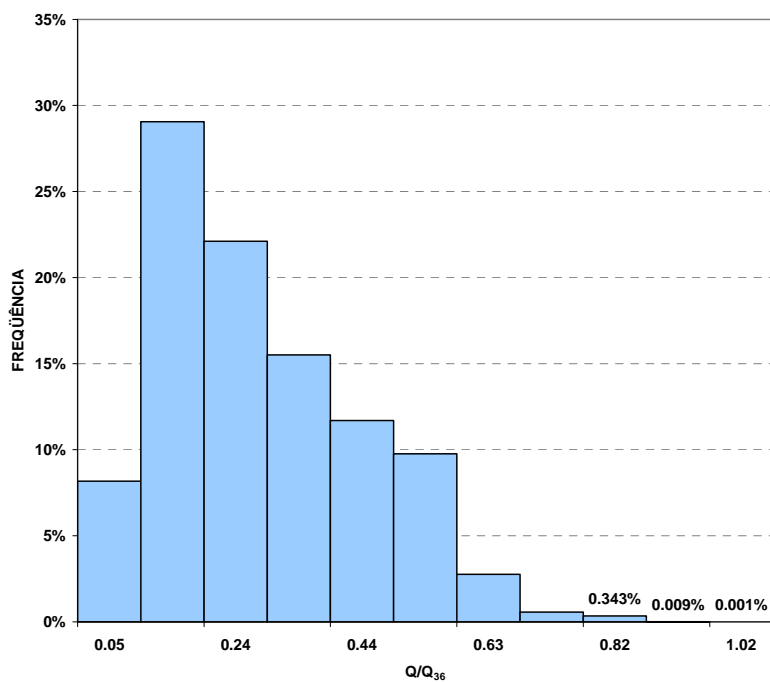


Figura IV.12b Distribuição de freqüências da razão entre os esforços cortantes devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,280$; $s = 0,159$)

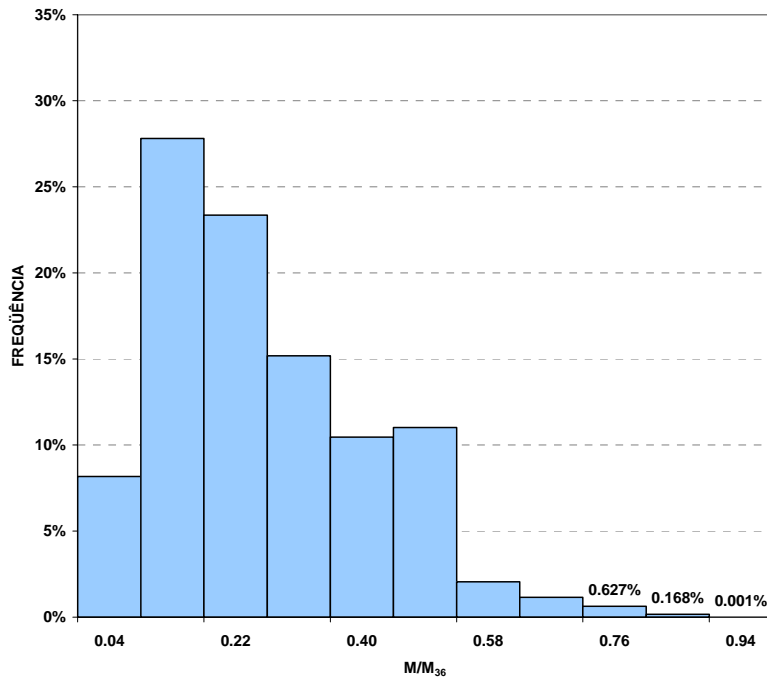


Figura IV.12c Distribuição de freqüências da razão entre os momentos fletores positivos devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,263$; $s = 0,152$)

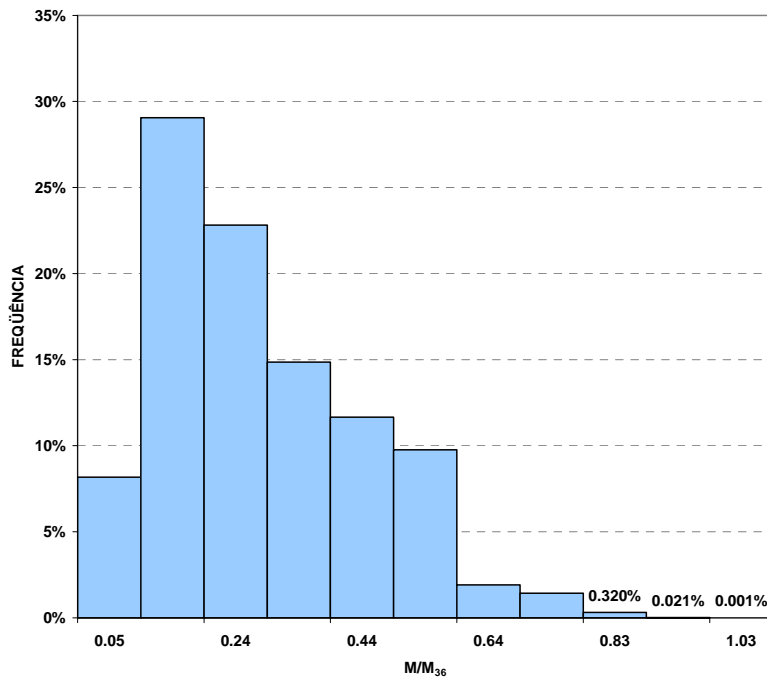


Figura IV.12d Distribuição de freqüências da razão entre os momentos fletores positivos devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,283$; $s = 0,162$)

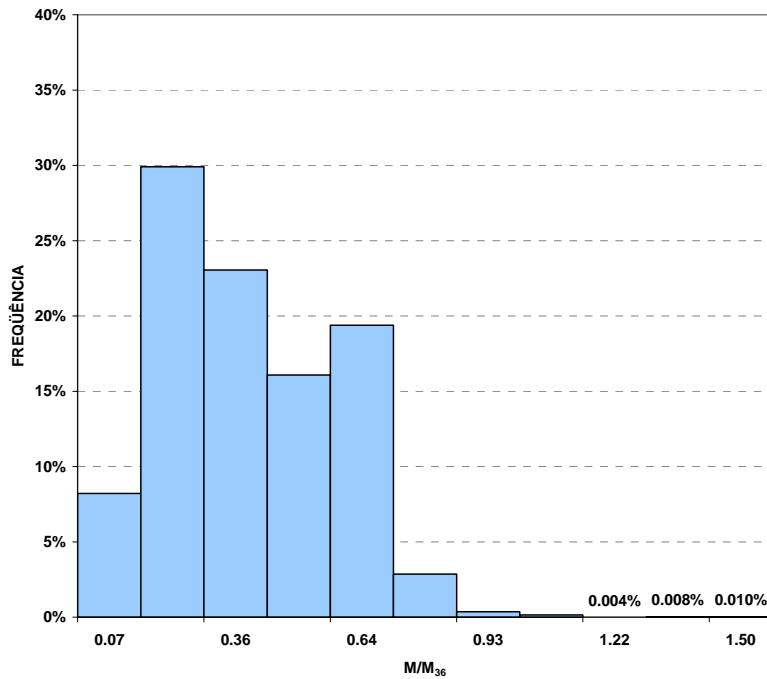


Figura IV.12e Distribuição de freqüências da razão entre os momentos fletores negativos devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema com balanço de 2,5m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,385$; $s = 0,197$)

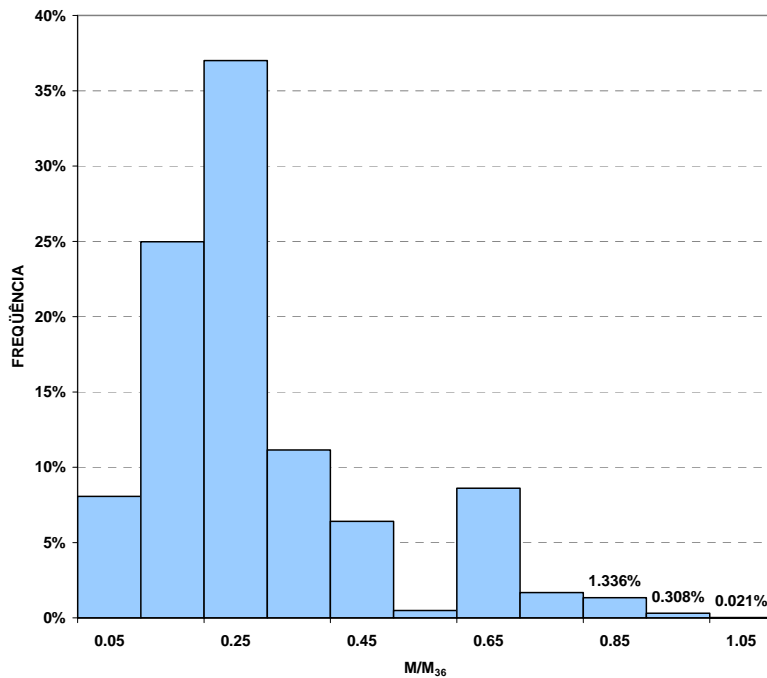


Figura IV.12f Distribuição de freqüências da razão entre os momentos fletores negativos devidos ao tráfego real e o gerado pelo carregamento Classe 36, no sistema contínuo de dois vãos de 10m e tabuleiro de modelo antigo ($\bar{X} = 0,286$; $s = 0,181$)

Verifica-se, pelas Figuras IV.12, que para os sistemas considerados (tramos de 10m e balanço de 2,5m) os esforços solicitantes devidos ao tráfego real podem superar aqueles devidos ao carregamento Classe 36 (quando as razões de esforços superam a unidade).

Em geral, as razões máximas de esforços não ultrapassam 1,09, com exceção do sistema em balanço (com vão de 2,5m), para o qual a razão M/M_{36} pode alcançar 1,50. Este resultado expressivo se deve à ação dos 2 eixos traseiros (com total de 326kN e espaçamento de 1,3m) do veículo 3C de 446kN. Devido à pequena extensão do vão em balanço, do carregamento Classe 36 somente podem atuar 2 eixos (com total de 240kN e espaçamento de 1,5m) do veículo-tipo de 360kN.

Para os comprimentos de vãos em balanço maiores que 2,5m, as razões máximas de esforços M/M_{36} serão menores que 1,50, já que passará a contribuir para M_{36} uma parcela de carga distribuída do carregamento Classe 36.

As razões máximas de esforços cortantes, Q/Q_{36} , são também originadas da ação do veículo 3C com 446kN, neste caso de vãos de 10m (Figuras IV.12a,b). Já a razão máxima M/M_{36} para o momento negativo do apoio central da viga de dois vãos de 10m (Figura IV.12f) se deve à ação dos veículos 2S3 mais pesados (entre 508kN e 549kN).

Deve-se ressaltar que as distribuições de relação de esforços das Figuras IV.12 referem-se ao caso de os veículos cruzarem as pontes separadamente; se fosse considerada a hipótese de haver cruzamento entre veículos, estas solicitações poderiam ultrapassar com maior intensidade os valores de projeto, porém com uma probabilidade de ocorrência muito pequena, pois estão sendo analisadas somente pontes de pequenos vãos.

A comparação dos efeitos da passagem dos veículos reais com os efeitos dos veículos normativos será retomada no Capítulo V, onde serão apresentados os valores representativos das distribuições de esforços solicitantes extrapoladas a um determinado período de retorno.

IV.8 Uma nova base de dados considerando somente os veículos mais pesados

Alternativamente, considerou-se, a partir da mesma base de dados, o caso usual de medições que só utilizam veículos pesados. Este procedimento foi usado na coleta dos dados utilizados para calibrar os modelos de carga de pontes atuais dos códigos

americano (LRFD AASHTO) e canadense (OHBD) (NOWAK, 1993, DAS, 1997), que extrapolaram os resultados das medições usando 9250 medições de veículos considerados pesados, num período de 2 semanas.

O Capítulo V apresenta uma comparação entre as Estatísticas de Extremos feitas com a base de dados original e com esta nova base de dados, que considera somente os veículos mais pesados.

Para se selecionar, na base de dados, apenas os veículos mais danosos às pontes, adotou-se o procedimento de considerar somente aqueles que produzem solicitações maiores ou iguais a uma certa fração dos efeitos devidos aos veículos de projeto.

Na estrutura tomada como exemplo (o sistema biapoiado com vão de 10m em tabuleiro de modelo antigo), adotou-se como referência o valor de 75% das solicitações do veículo normativo Classe 36. Como os esforços devidos a cada veículo de mesmo peso são diferentes, os pesos críticos de cada classe, em termos de esforços, também são diferentes. Porém, com a simplificação adotada de percentual constante de carga por eixo, torna-se simples determinar, em cada classe, o peso necessário para gerar tais valores de efeitos e filtrar na base de dados somente os veículos com peso maior ou igual ao peso crítico de cada classe. Verifica-se, pela Tabela IV.5, que o valor de 75% corresponde aos valores de 248kN para o esforço cortante e 543kNm para o momento fletor; basta, portanto, determinar o peso de cada classe correspondente a estas solicitações e eliminar da base de dados todos os veículos com peso inferior a estes valores. A Tabela IV.6 sintetiza os valores de peso de cada classe necessários para gerar essa fração dos veículos Classe 36, tanto por meio de momentos fletores quanto por esforços cortantes.

Tabela IV.6 Valores de peso para gerar 75% do esforço do veículo-tipo Classe 36 no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo

Veículo	Peso mínimo (kN) para gerar esforço cortante de 248kN	Peso mínimo (kN) para gerar momento fletor de 543kNm
O2C	340	408
O3C	348	379
2C	307	340
3C	319	350
2S2	517	577
2S3	457	471

Mantiveram-se, nos histogramas de peso de cada classe (Figuras II.20), apenas os intervalos que contêm pesos maiores ou iguais ao maior peso crítico de cada classe de veículo; no exemplo mostrado (ver Figuras IV.12a e IV.12c), as menores solicitações relativas de momento fletor resultam em pesos críticos maiores que os encontrados no cálculo pelo esforço cortante, como se verifica na Tabela IV.6. Resulta, assim, uma nova distribuição de freqüências das seis classes de veículos, como mostra a Figura IV.13, com um total de $1,0 \times 10^4$ registros.

Nota-se a acentuada importância da classe 2S3 para as maiores solicitações, em detrimento das demais. Os baixos valores de esforços obtidos nos veículos unitários da classe 2S2 acabaram por retirar todos esses veículos do conjunto dos mais agressivos às obras de arte: seriam necessários veículos com peso maior que $577kN$ para gerar tais esforços; esses valores de peso inexistem no histograma de peso desta classe (ver Tabela II.6) . Os histogramas de esforços relativos para este caso são apresentados nas Figuras IV.14, para o sistema biapoiado com vão de $10m$.

A consideração de apenas os veículos mais pesados usa um número muito menor de registros ($1,0 \times 10^4$); no exemplo analisado, o número de veículos pesados equivale a apenas 0,89% do total de registros das seis classes consideradas ($1,1 \times 10^6$).

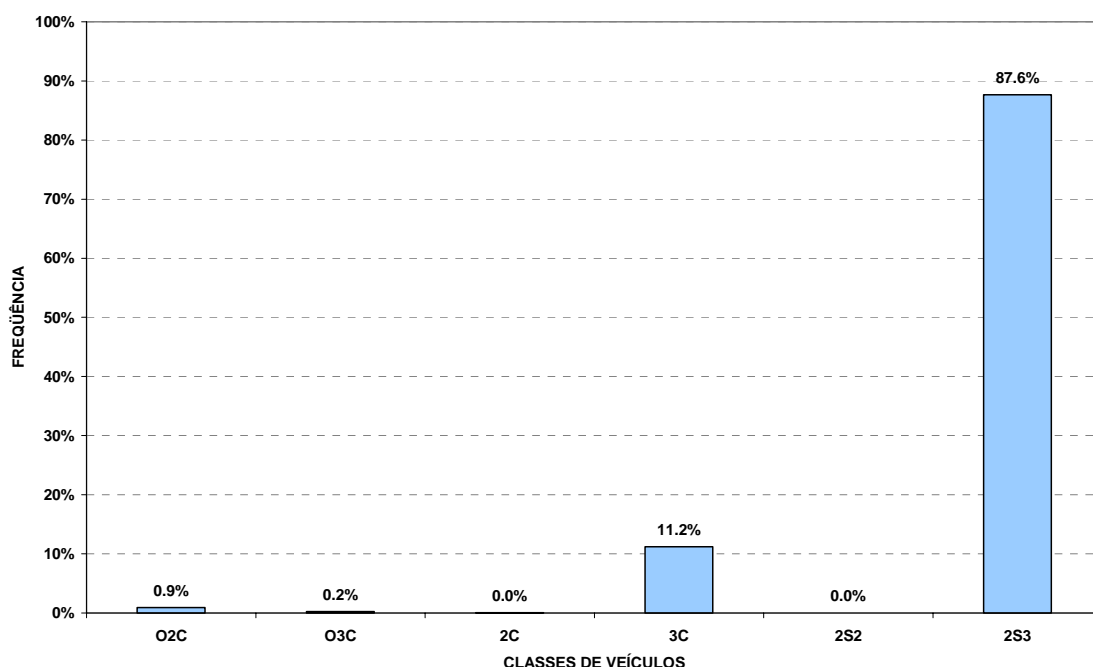


Figura IV.13 Distribuição de freqüências das classes de veículos no sistema biapoiado com $10m$ de vão e tabuleiro de modelo antigo do DNER, considerando apenas solicitações maiores ou iguais a 75% dos efeitos do carregamento Classe 36

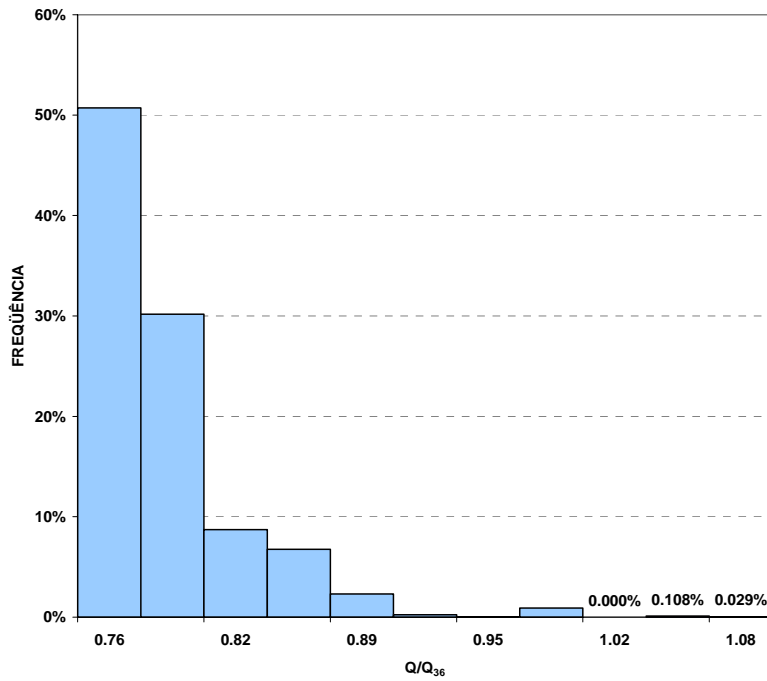


Figura IV.14a Distribuição de freqüências do esforço cortante, relativamente ao carregamento Classe 36, no sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo, considerando os veículos mais pesados ($\bar{X} = 0,786$; $s = 0,040$)

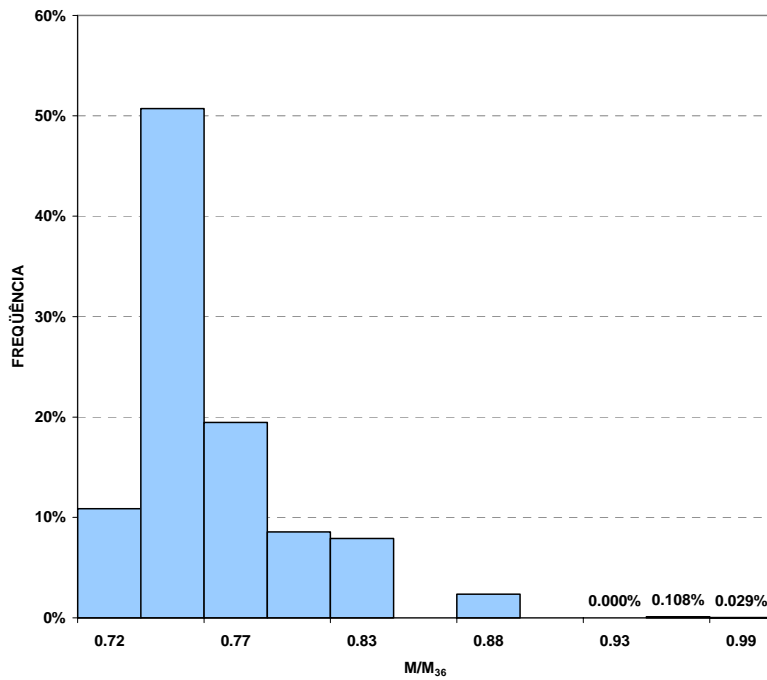


Figura IV.14b Distribuição de freqüências do momento fletor positivo, relativamente ao carregamento Classe 36, sistema biapoiado com 10m de vão e tabuleiro de modelo antigo, considerando os veículos mais pesados ($\bar{X} = 0,762$; $s = 0,035$)

V Extrapolação dos efeitos da passagem dos veículos sobre as pontes

V.1 Introdução

Definidos os histogramas de esforços solicitantes para cada modelo estrutural devidos à passagem dos veículos nas pontes, o próximo passo é utilizar os testes de aderência (Seção III.5) para determinar qual a função de distribuição que melhor se ajusta a cada distribuição de esforço. Em seguida realiza-se a extrapolação destas curvas ajustadas, a intervalos de tempo maiores ou iguais ao período de coleta de dados, a fim de se fazer generalizações; esse é o objetivo do Capítulo V.

Por mais que incorra em consideráveis incertezas, a extrapolação das curvas ajustadas é fundamental à análise de períodos de tempo longos, pois é inviável monitorar seguidamente o tráfego rodoviário. Busca-se neste Capítulo, também, uma comparação entre a extrapolação feita a partir da base de dados completa e a da base de dados que considera somente os veículos mais pesados (Seção IV.8).

Ao final deste Capítulo apresentam-se os valores-alvo dos esforços solicitantes, os quais deverão ser reproduzidos pelos futuros modelos de carga de veículos rodoviários.

V.2 Funções densidade de probabilidade dos efeitos devidos aos veículos isolados

É importante destacar, antes de qualquer análise, que as distribuições de probabilidade limitadas superiormente, como a Tipo III e a beta, não poderiam se adequar de forma satisfatória às distribuições de esforços relativos em longo prazo, mesmo que apresentassem as melhores aderências, pois essa limitação impossibilitaria a expansão dos gráficos de distribuição de probabilidade além de seu valor máximo, quando da extrapolação.

Além disso, o método dos momentos, usado para estimar de forma simples os parâmetros de locação, escala e forma através da média e do desvio padrão amostrais, mostrou-se pouco sofisticado para as distribuições de Frèchet (Tipo II) e de Weibull (Tipo III), porque algumas das equações que definem os parâmetros destas distribuições envolvem a solução implícita da função Gama (ver a Tabela III.1). Já a distribuição de

Student revela-se praticamente igual à de Gauss, devido ao grande número de graus de liberdade do modelo estatístico, o que torna a sua consideração desnecessária; é preferível lidar apenas com a distribuição normal, cujo cômputo de probabilidades se dá de forma muito mais simples. Portanto, das equações catalogadas na Seção III.3.2, foram efetivamente usadas nos testes de aderência somente as distribuições normal, lognormal, gama, exponencial dupla, logística e de Gumbel.

As Figuras V.1 mostram as distribuições de probabilidade ajustadas aos histogramas de esforço cortante e momento fletor para o sistema biapoado com vão de 10m, mostrados nas Figuras IV.10a e IV.10c (usando-se todos os registros de veículos), resultantes da aplicação do método dos momentos, de acordo com a Seção III.4. Este sistema estrutural servirá nas análises subseqüentes como base de todas as análises, sendo agora referida como *estrutura-exemplo*. É nítida a dificuldade na escolha de uma distribuição apenas por comparações de ordenada, o que ajuda a comprovar a utilidade e importância dos testes de aderência. As distribuições de esforços têm média e desvio padrão iguais aos dos correspondentes histogramas.

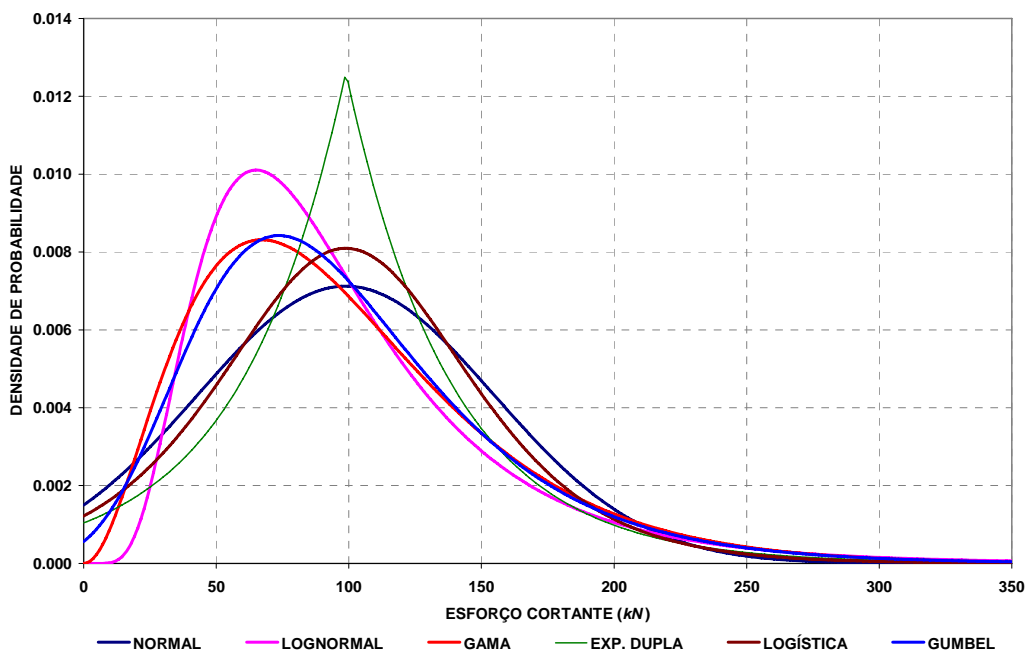


Figura V.1a Distribuições de probabilidade ajustadas ao histograma de esforços cortantes na estrutura-exemplo, considerando todos os registros ($\bar{X} = 98,8kN$; $s = 56,0kN$)

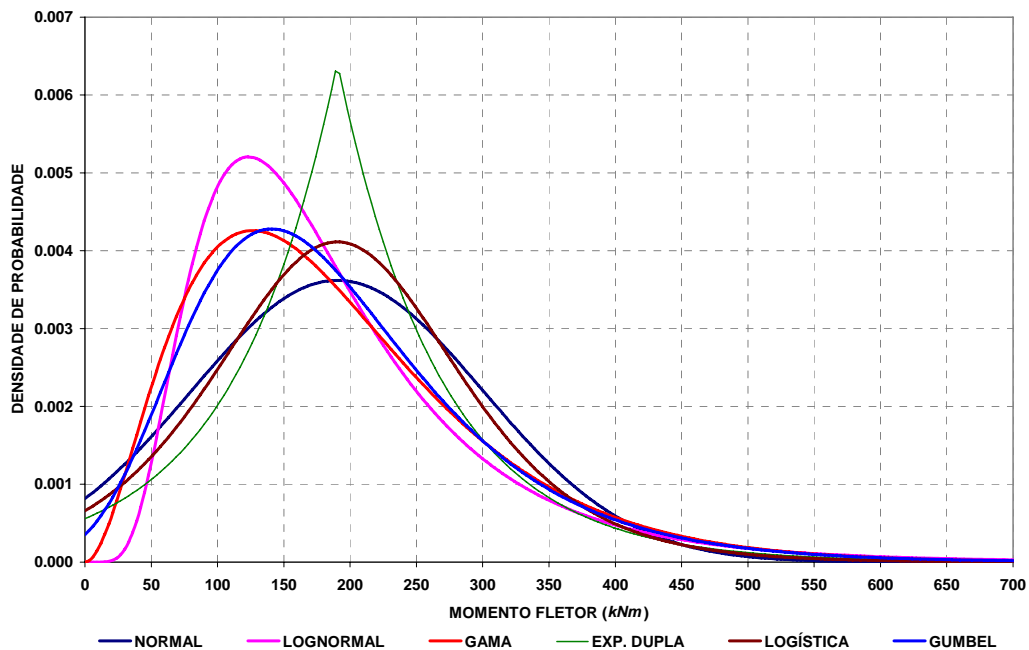


Figura V.1b Distribuições de probabilidade ajustadas ao histograma de momentos fletores positivos na estrutura-exemplo, considerando todos os registros ($\bar{X} = 190kNm$; $s = 110kNm$)

Dentre os modelos de verificação de ajuste apresentados na Seção III.5, o teste de qui-quadrado tem uso mais difundido e foi usado como a principal referência na escolha da melhor distribuição de probabilidade, cabendo ao teste de Kolmogorov-Smirnov um aspecto complementar, de forma a definir a melhor distribuição quando aquele não elege claramente apenas uma curva de representação.

A soma de qui-quadrado (Eq. III.73) depende do tamanho da amostra (n). Como todos dados colhidos pelos Postos de Monitoramento foram adquiridos em rodovias de pista simples e mão dupla, o tamanho da amostra foi calculado de forma aproximada usando-se o tráfego por faixa como a metade do total de registros: considerando todos os veículos das seis classes analisadas, tem-se $n = 5,7 \times 10^5$ (ver Seção II.3.1). Não se levou em conta a diferença de tráfego entre uma faixa e outra. Essa diferença poderia ser obtida por meio das planilhas de *Peso total na Rodovia*, na base de dados do DNIT; porém, não foi considerada porque a distribuição do tráfego por faixas no posto P51 não representa o padrão geral.

Quando se consideram apenas os veículos mais pesados, de acordo com a sistemática apresentada na Seção IV.8, o tamanho da amostra evidentemente se altera em cada caso. No caso tomado como exemplo, como o número de veículos ficou reduzido a $1,0 \times 10^4$, o tamanho da amostra fica sendo $n = 5,1 \times 10^3$.

Todos os histogramas mostrados neste trabalho foram apresentados com o mesmo número de intervalos ($k = 11$); assim, não há dificuldades em padronizar os testes de aderência para as diversas distribuições de esforços, considerando ou não todos os registros de veículos.

Como as distribuições de máximos não dependem igualmente de todos os pontos da distribuição parente, mas sim de sua extremidade final, as freqüências dos últimos intervalos devem ter peso maior na análise do que as primeiras; em outras palavras, não faria sentido aplicar os testes de aderência *somente uma vez*, a todos os intervalos de cada histograma de esforço relativo. Foram então aplicados k vezes em cada distribuição, sucessivamente às k seqüências possíveis (S_i) de últimos intervalos consecutivos, a partir do primeiro: $S_i = \{x_i; x_{i+1}; \dots; x_k\}$; cada conjunto tem $(k - i + 1)$ intervalos. Deu-se preferência às distribuições que alcancem as menores discrepâncias ao longo dos conjuntos finais. As abscissas dos diagramas mostrados nas Figuras V.2 a V.4 são os números (i) correspondentes às seqüências S_i .

Para a estrutura-exemplo, quando se consideram todos os registros de veículos, o teste de qui-quadrado fornece para os esforços cortantes os resultados mostrados na Figura V.2a.

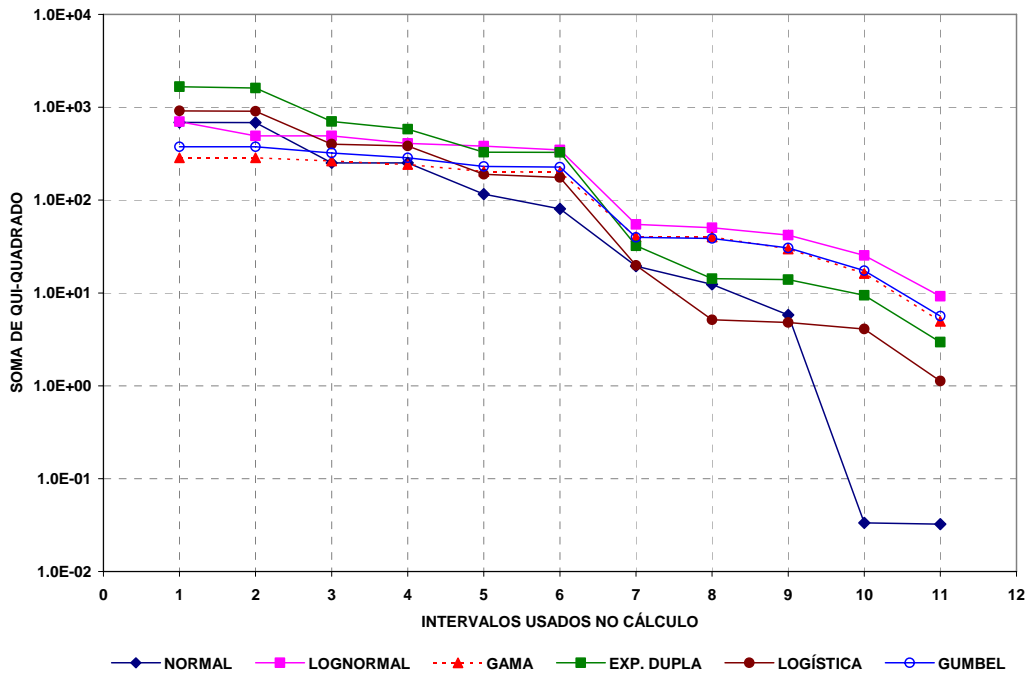


Figura V.2a Teste de qui-quadrado aplicado ao histograma de esforços cortantes da estrutura-exemplo, considerando todos os veículos

Percebe-se, nos intervalos intermediários, uma equivalência entre as distribuições normal, logística e exponencial dupla; entretanto, nos dois intervalos finais, a distribuição normal se sobressai em relação às demais, respondendo pelo melhor ajuste; como não restam dúvidas, não é necessária a verificação adicional com o teste de Kolmogorov-Smirnov.

Quanto ao momento fletor, mostra-se na Figura V.2b o resultado da aplicação do teste de qui-quadrado.

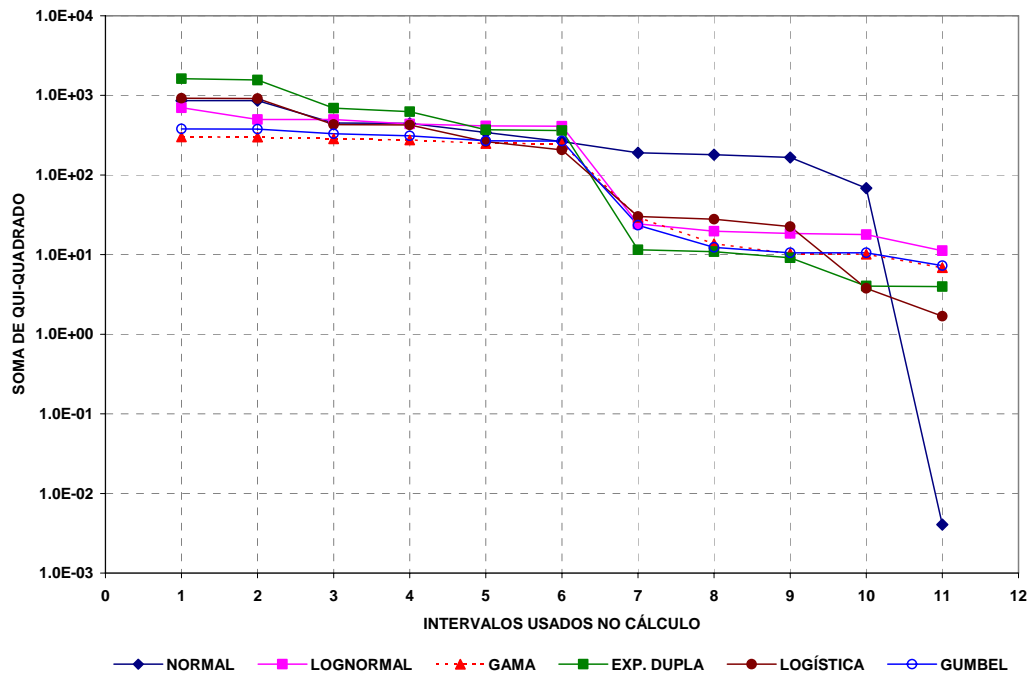


Figura V.2b Teste de qui-quadrado aplicado ao histograma de momentos fletores da estrutura-exemplo, considerando todos os veículos

Nota-se que, neste caso, não há um predomínio nítido de uma única distribuição de probabilidades: nas somas S_7 , S_8 , S_9 e S_{10} as distribuições exponencial dupla e logística respondem pelos melhores ajustes, enquanto na última soma (S_{11}) a distribuição normal tem aderência muito melhor. Faz-se necessária a aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov para a escolha da curva mais adequada, como mostra a Figura V.3; com a aplicação desse teste, nota-se a melhor adaptação da distribuição normal ao histograma de momentos fletores relativos ao veículo-tipo Classe 36.

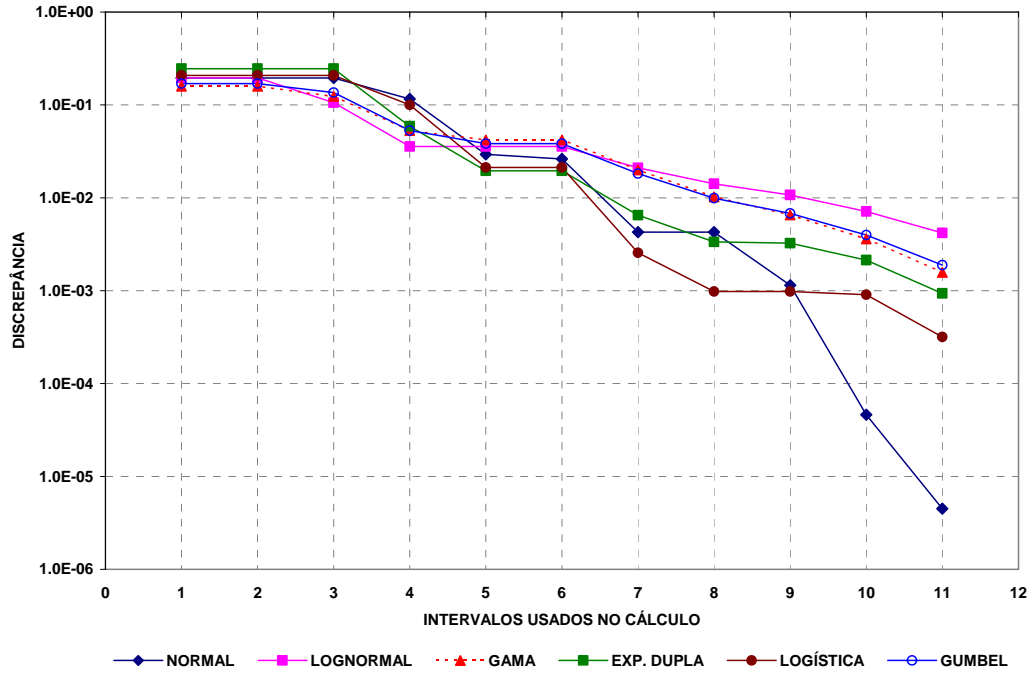


Figura V.3 Teste de Kolmogorov-Smirnov aplicado ao histograma de momentos fletores da estrutura-exemplo, considerando todos os veículos

As verificações de ajuste também foram realizadas no caso de análise que considera somente os veículos mais pesados (Figuras IV.14). Para os esforços cortantes, a aplicação do teste de qui-quadrado fornece os resultados sintetizados na Figura V.4a. Não há dúvida em apontar diretamente a distribuição de Gumbel (Tipo I) como a mais adequada aos esforços cortantes, pois ela apresenta menor discrepância em todos os intervalos de cálculo.

Quanto aos momentos fletores, a aplicação do teste de qui-quadrado fornece os resultados mostrados na Figura V.4b. Novamente, a distribuição de Gumbel é a mais adequada ao histograma; não é necessário aplicar o teste de Kolmogorov-Smirnov.

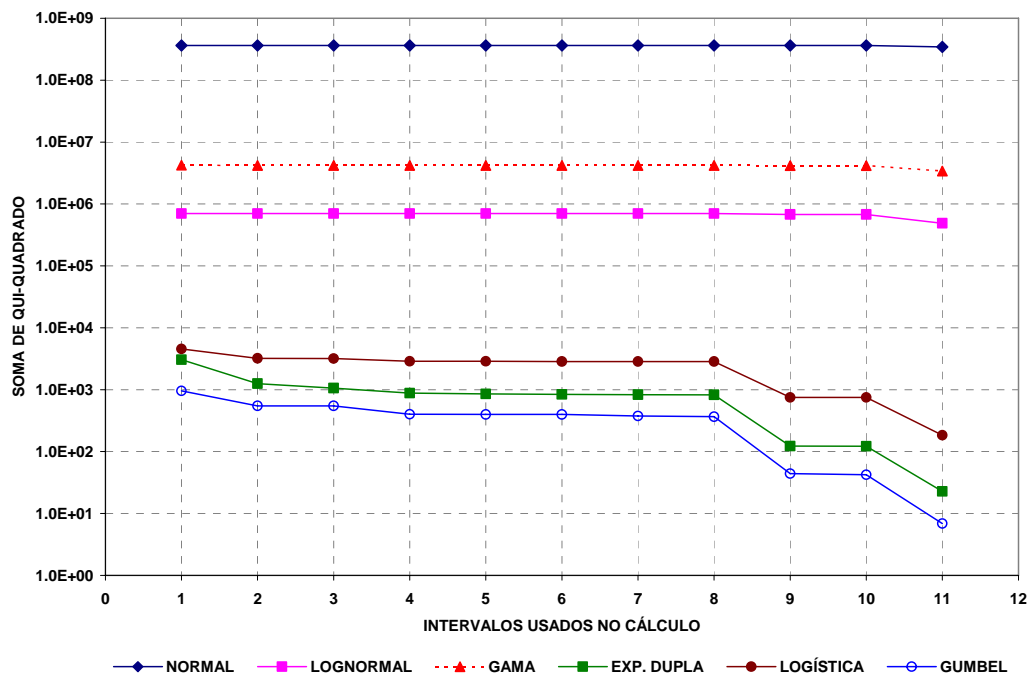


Figura V.4a Teste de qui-quadrado aplicado ao histograma de esforços cortantes da estrutura-exemplo, considerando os veículos mais pesados

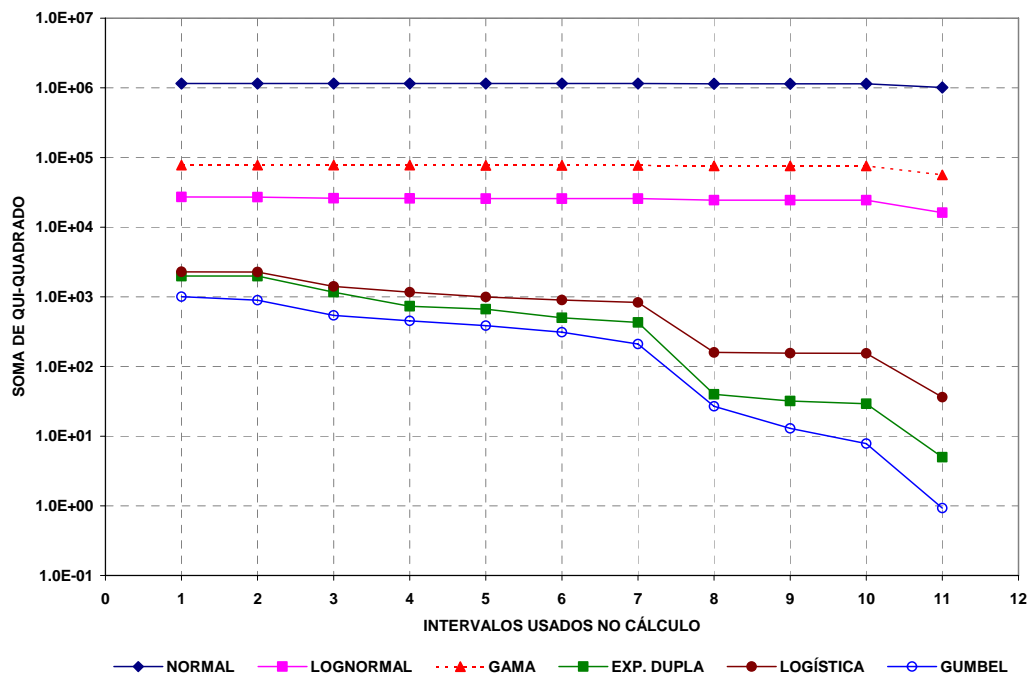


Figura V.4b Teste de qui-quadrado aplicado ao histograma de momentos fletores da estrutura-exemplo, considerando os veículos mais pesados

Para concordar com cada histograma de esforço solicitante, as frequências relativas correspondentes aos intervalos finais, geradas pelas distribuições de probabilidade testadas, são muito pequenas. Como estas frequências relativas são os denominadores da Eq. III.73, as somas de qui-quadrado se tornam muito altas. Além disso, para se adequar aos intervalos finais, as distribuições geram ordenadas (frequências relativas) muito distantes das amostrais nos intervalos iniciais, originando grandes discrepâncias no teste de Kolmogorov-Smirnov (Eq. III.74). Como resultado disso, em ambos os testes, nenhuma distribuição de probabilidade atende os critérios absolutos de qualidade para a concordância: as discrepâncias são maiores do que as correspondentes tolerâncias. Contudo, isto não causa dano algum aos ajustes, pois o intuito dos testes de aderência é justamente apontar a qualidade relativa.

De maneira geral, quando se usam todos os registros das seis classes de veículos, a *distribuição normal* apresenta os melhores resultados nos testes de aderência, sendo, portanto, o modelo estatístico assumido para ambos os esforços solicitantes. Quando se consideram apenas os veículos mais pesados, a curva que melhor se adequa aos padrões dos esforços é a *distribuição de Gumbel* (Tipo I). Essas verificações são também confirmadas pelos estudos levados a cabo por NOWAK (1993) e DAS (1997), nos quais houve ajuste de distribuição normal para as solicitações. Além disso, é importante destacar que a distribuição de Gumbel é usada com frequência para ajustar fenômenos extremos como a velocidade do vento e o nível de cheias (RODRIGUES, RODRIGUES, 2001, HOLMES, 2001, BAUTISTA, 2002).

As Figuras V.5 e V.6 mostram os ajustes das distribuições normal e de Gumbel aos diagramas de esforços solicitantes da estrutura-exemplo, mostrados nas Figuras IV.10a, IV.10c (considerando todos os veículos) e IV.14 (considerando somente os veículos mais pesados). As estatísticas são agora denominadas pela simbologia populacional.

Por fim, mostram-se, na Tabela V.1, os valores dos parâmetros de locação e escala das distribuições de probabilidade dos esforços solicitantes na estrutura-exemplo mostradas nas Figuras V.5 e V.6.

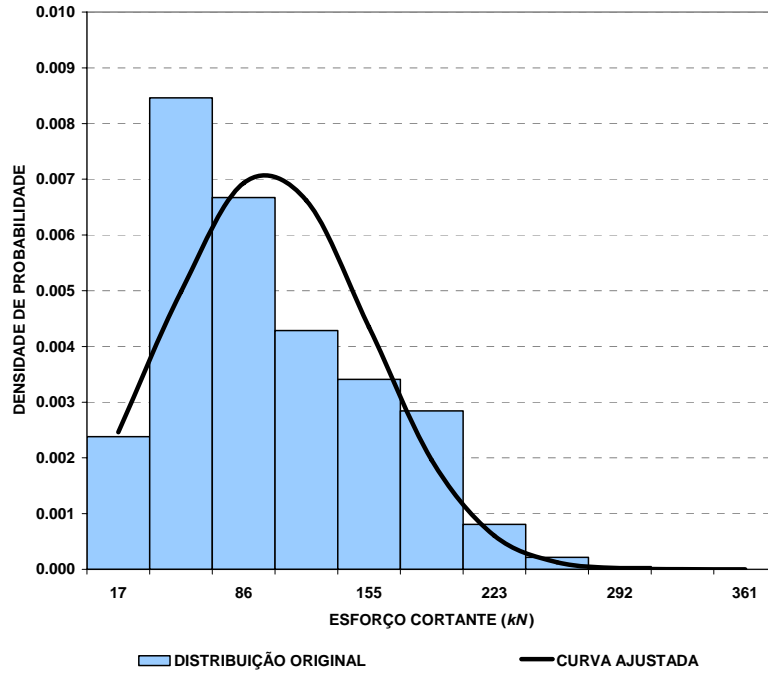


Figura V.5a Distribuição normal ajustada ao histograma de esforços cortantes na estrutura-exemplo, considerando todos os veículos ($\mu = 98,8kN$; $\sigma = 56,0kN$)

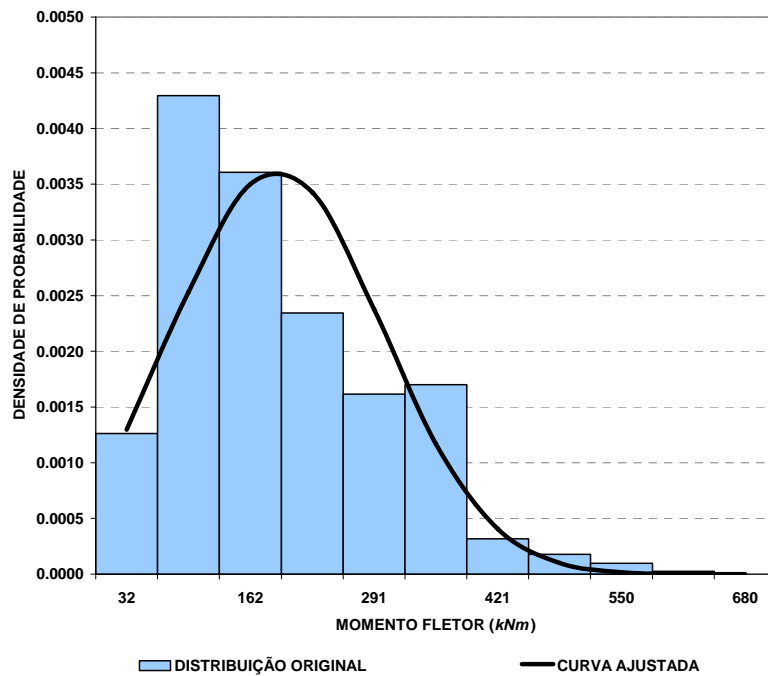


Figura V.5b Distribuição normal ajustada ao histograma de momentos fletores positivos na estrutura-exemplo, considerando todos os veículos ($\mu = 190kNm$; $\sigma = 110kNm$)

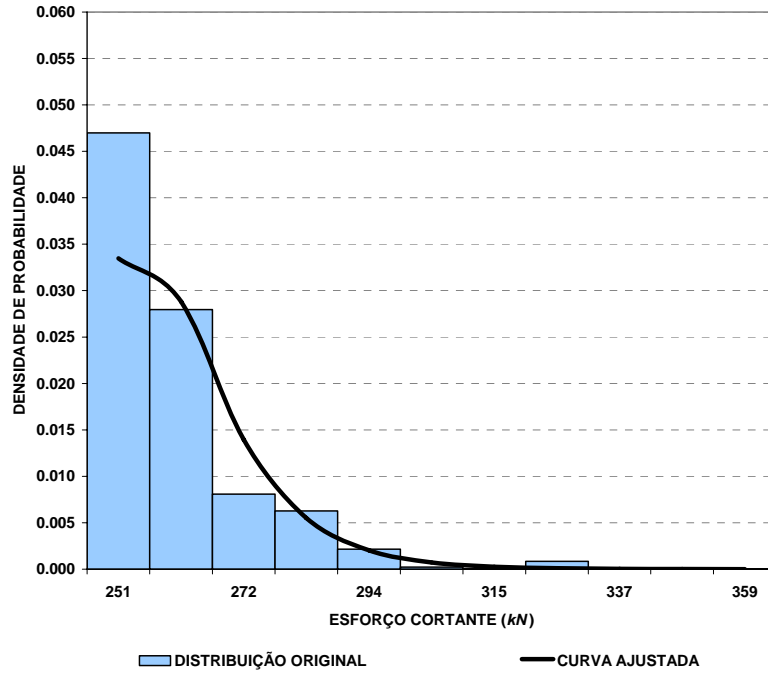


Figura V.6a Distribuição de Gumbel ajustada ao histograma de esforços cortantes na estrutura-exemplo, considerando os veículos mais pesados ($\mu = 260kN$; $\sigma = 13,3kN$)

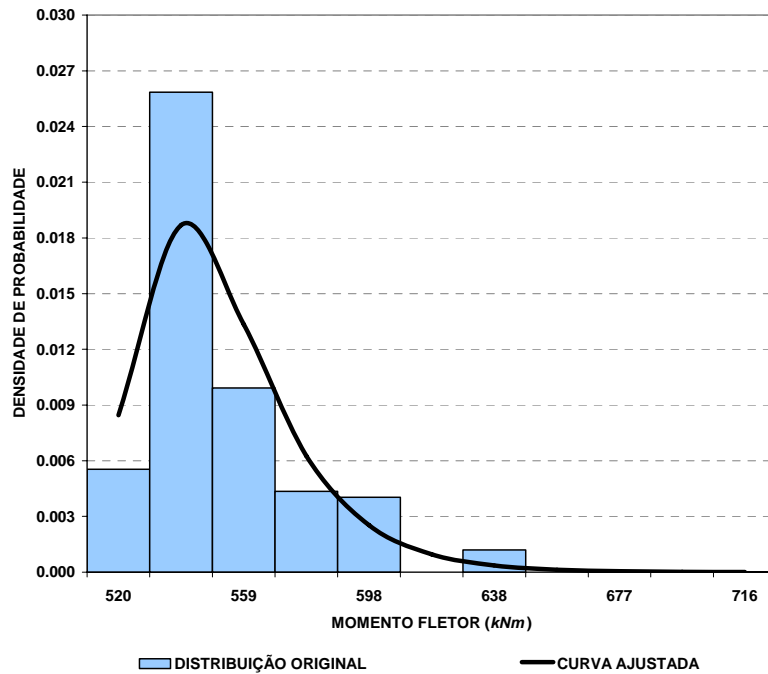


Figura V.6b Distribuição de Gumbel ajustada ao histograma de momentos fletores positivos na estrutura-exemplo, considerando os veículos mais pesados ($\mu = 552kNm$; $\sigma = 25,2kNm$)

Tabela V.1 Valores dos parâmetros de locação e escala das curvas ajustadas

Esforço relativo ao veículo-tipo Classe 36	Cosiderando todos os registros (distribuição normal)		Considerando somente os veículos mais pesados (distribuição de Gumbel)	
	a	b	a	b
Esforço cortante	98,8	56,0	254	10,4
Momento fletor	190	110	540	19,7

V.3 Comparação entre as Estatísticas de Extremos usando todos os registros e usando os veículos mais pesados

Quando se usam todos os veículos registrados nas seis classes representativas, o tamanho da amostra é $n = 5,7 \cdot 10^5$. No caso de se considerar apenas os veículos mais pesados, o tamanho da amostra é $n = 5,1 \cdot 10^3$. O tempo de observação considerado (Δt) foi de 30 meses (ou 2,5 anos). As Figuras V.7 ilustram, para a estrutura-exemplo, as distribuições de máximos dos esforços solicitantes extrapoladas aos períodos de 2,5, 10, 100 e 1000 anos, pelo processo da Estatística de Extremos (Seção III.7.2); as distribuições parentes de cada caso são mostradas nas Figuras V.5 (quando são considerados todos os registros, com distribuição normal) e V.6 (quando são considerados apenas os veículos mais pesados, com distribuição de Gumbel).

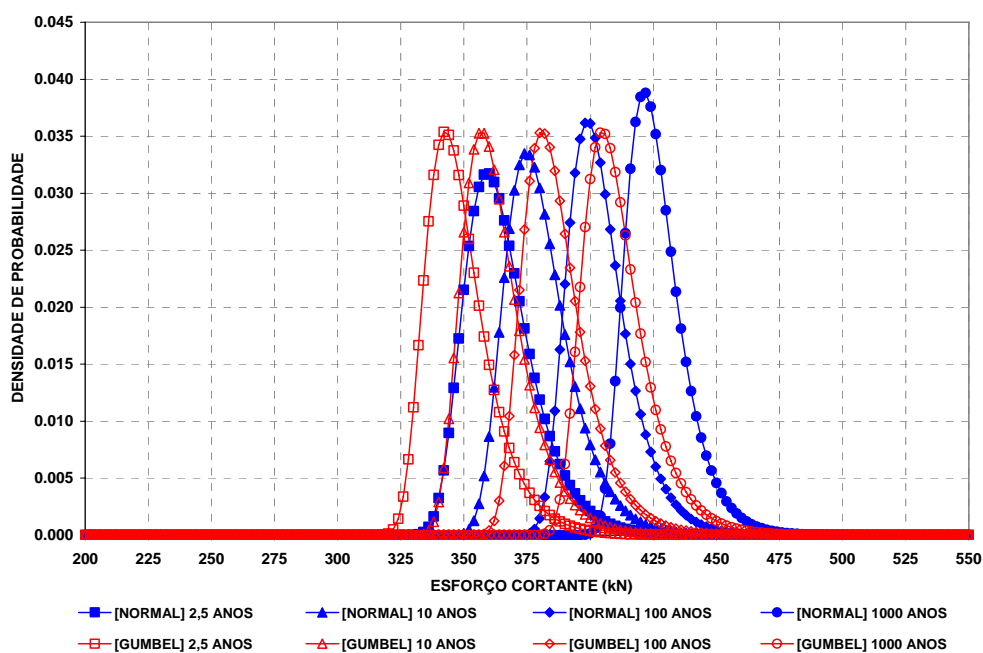


Figura V.7a Distribuições de máximos dos esforços cortantes na estrutura-exemplo

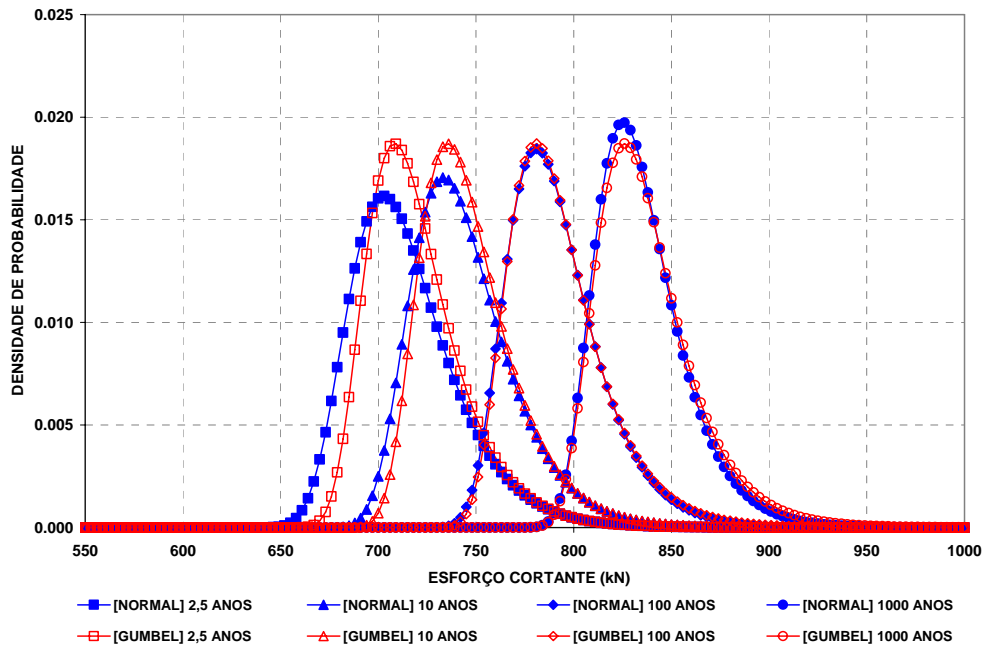


Figura V.7b Distribuições de máximos dos momentos fletores positivos na estrutura-exemplo

Verifica-se, na Figura V.7b, uma considerável equivalência entre as curvas de momento fletor. No caso do esforço cortante (Figura V.7a), há uma pequena defasagem entre as curvas correspondentes, sendo que aquela gerada a partir da base completa de dados (com distribuição parente normal) fornece valores representativos maiores.

A extrapolação considerada neste trabalho, por meio do número equivalente de dados observados no período de tempo extrapolado, dado pela Eq. III.81, não leva em conta o crescimento do tráfego.

V.4 Valores representativos das extrapolações

Os valores representativos das extrapolações são definidos pelas Eqs. III.88, III.89, III.90 (valor médio, mediana e moda da distribuição de máximos) e III.97 (valor máximo característico da distribuição parente). As Tabelas V.2 mostram estes valores representativos das extrapolações para a estrutura-exemplo.

Mesmo no caso do esforço cortante (Tabela V.2a), em que há defasagem entre as curvas de distribuição de máximos das duas bases de dados, são pequenas as diferenças entre cada valor representativo (valor médio, mediana ou moda) na base de dados que considera todos os veículos e seu correspondente valor na base de dados apenas com os veículos mais pesados. Nos momentos fletores (Tabela V.2b) estes valores

representativos são muito próximos, devido à boa concordância entre as curvas de extrapolação na Figura V.7b.

Tabela V.2a Valores representativos das extrapolações de esforço cortante (kN) na estrutura-exemplo

Período de retorno, \bar{T} (anos)	Estatística de extremos (Figura V.7a)						Extrap. por $1/\bar{T}$ - valor máx. caract., $z_{\bar{T}}$ (kN) - Eq. III.97	
	Valor médio, $\mu_{Y_{n\bar{T}}}$ (kN) - Eq. III.88		Mediana, y_{med} (kN) - Eq. III.89		Moda, y_{mod} (kN) - Eq. III.90		Todos	Mais pesados
	Todos	Mais pesados	Todos	Mais pesados	Todos	Mais pesados		
2,5	365	349	363	346	359	343	359	343
10	380	363	378	361	375	357	374	357
100	404	387	402	385	399	381	399	381
1000	426	411	425	409	422	405	421	405

Tabela V.2b Valores representativos das extrapolações de momento fletor (kNm) na estrutura-exemplo

Período de retorno, \bar{T} (anos)	Estatística de extremos (Figura V.7b)						Extrap. por $1/\bar{T}$ - valor máx. caract., $z_{\bar{T}}$ (kNm) - Eq. III.97	
	Valor médio, $\mu_{Y_{n\bar{T}}}$ (kNm) - Eq. III.88		Mediana, y_{med} (kNm) - Eq. III.89		Moda, y_{mod} (kNm) - Eq. III.90		Todos	Mais pesados
	Todos	Mais pesados	Todos	Mais pesados	Todos	Mais pesados		
2,5	714	720	710	715	703	708	702	708
10	744	747	740	743	734	736	733	736
100	791	792	788	788	781	781	780	781
1000	835	837	831	833	825	826	825	826

Esta proximidade entre os valores característicos das duas bases de dados se deu de forma sistemática aos outros vãos, sistemas longitudinais e aos casos correspondentes de tabuleiros de modelo atual; conclui-se que as medições dos veículos pesados são as mais importantes para a extrapolação dos valores máximos dos esforços solicitantes. As extrapolações das duas bases de dados conduzem a resultados muito próximos.

Nota-se também, nas Tabelas V.2, que dentre os valores centrais representativos das distribuições de extremos, o valor médio é o maior deles; a mediana é sempre um pouco menor que o valor médio, porém maior que a moda. Essa característica é verificada nas distribuições com assimetria positiva.

A extrapolação pelo inverso do período de retorno conduz a valores representativos ($z_{\bar{T}}$) praticamente iguais à moda (y_{mod}) da distribuição de máximos correspondente, na base de dados com todos os veículos; na base com apenas os

veículos mais pesados, pode-se notar nas Tabelas V.2 que estes valores são *exatamente* iguais, pois a distribuição ajustada a este caso é uma forma assintótica (ver Seção III.7.5).

Mostram-se nas Figuras V.8 as variações no tempo (período de retorno) dos valores representativos das distribuições mostradas nas Tabelas V.2. As medianas foram omitidas por estarem sempre localizadas entre a moda e o valor médio; os valores máximos característicos das distribuições parentes foram omitidos porque são iguais (ou muito próximos) aos correspondentes valores modais das distribuições de máximos.

Nota-se a variação logarítmica dos valores representativos das extrapolações com o período de retorno, em concordância com o modelo de extrapolação usado na calibração do Eurocódigo 1 (CALGARO, 1998).

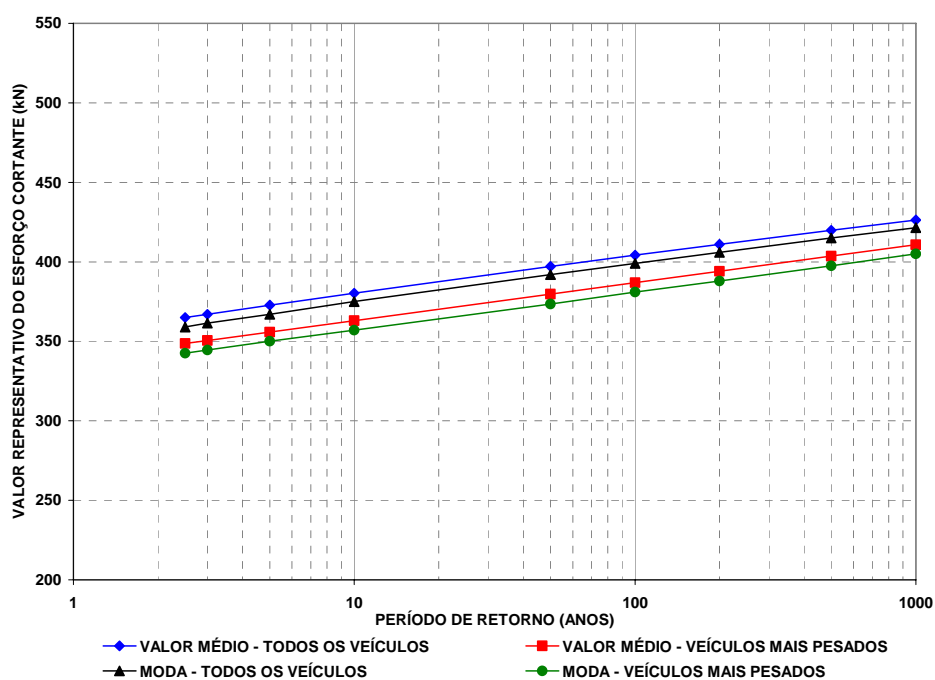


Figura V.8a Variação dos valores representativos das extrapolações dos esforços cortantes, na estrutura-exemplo

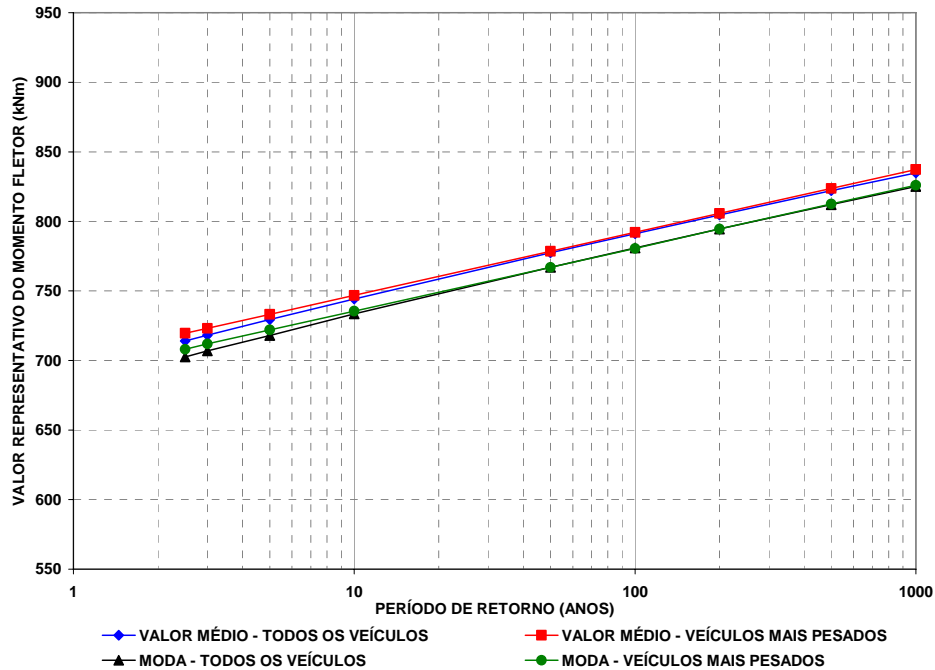


Figura V.8b Variação dos valores representativos das extrapolações dos momentos fletores, na estrutura-exemplo

Optou-se neste trabalho pela extrapolação utilizando todos os registros (com distribuição parente normal), pois o tamanho da amostra se mantém constante em todos os casos (não há, dessa forma, necessidade de se usar um número diferente de registros para cada modelo, para garantir a presença apenas dos veículos mais pesados ou, caso contrário, não deixar de considerar alguns veículos pesados). Quanto ao valor representativo, optou-se pelo uso do valor médio da distribuição de máximos ($\mu_{Y_{nT}}$).

Resta ainda definir qual intervalo de tempo será usado.

V.5 Períodos de retorno considerados

A NBR 8681 (2003) define a vida útil de projeto como o intervalo de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas sem se exigirem, em relação às prescrições de uso e manutenção previstas, medidas extraordinárias de manutenção e reparo. É somente após esse período que deve começar a efetiva deterioração da estrutura. Estas devem ser projetadas de forma que, se usadas conforme previsto, conservem sua segurança e estabilidade durante todo o período correspondente à sua vida útil.

Por razão de segurança estrutural, deve-se considerar, para cada ação analisada, o período de retorno maior que a vida útil de projeto. Pressupõe-se para as estruturas uma vida útil de pelo menos 50 anos.

No Brasil admite-se um período convencional de referência, ajustando-se o valor característico das ações em função do seu período de retorno médio, de acordo com a NBR 8681. Os valores característicos das ações, F_k , são estabelecidos em função da variabilidade de suas intensidades. No caso das ações permanentes, estes valores correspondem à variabilidade existente num conjunto de estruturas análogas, correspondendo à mediana da distribuição, seja quando os efeitos forem favoráveis, seja quando forem desfavoráveis. Nas ações variáveis, os valores característicos correspondem à probabilidade de eles serem iguais ou superados (somente no sentido desfavorável) compreendida entre 25% e 35%, em relação à distribuição correspondente a um período convencional de referência de 50 anos, o que equivale a um período de retorno de 140 a 200 anos.

Para a calibração dos modelos de cargas LM-1 a LM-4 do Eurocódigo 1 (CALGARO, 1998), os valores-alvo foram tomados com período de retorno de 1000 anos, para se garantir uma pequena probabilidade anual de excedência (0,1%). Essa escolha foi feita de forma a limitar a probabilidade de ocorrerem várias excedências do estado limite de serviço durante o período-base de 50 anos. Isso é justificado porque os esforços devidos ao tráfego foram obtidos indiretamente, a partir de cálculos; não foram diretamente medidos. Já o modelo de carga AASHTO LRFD foi calibrado com período de retorno de 75 anos (NOWAK, 1993).

Entretanto, quando se tem em mente uma comparação de esforços, deve-se levar em conta que a representação dos carregamentos aleatórios em termos do período de retorno é apenas uma forma conveniente de se denotar os níveis de solicitações extremas. O nível de carregamento do tráfego num período de retorno muito grande não é representativo (DAS, 1997), pois ele provavelmente não vai permanecer por muito tempo com a configuração em que foi medido: a tecnologia que muda rapidamente provoca a descaracterização do padrão de solicitação em longo prazo, o que invalida os grandes períodos de retorno, ao contrário dos fenômenos modelados essencialmente pela natureza, como os ventos e as cheias dos rios. A introdução das grandes CVC no mercado brasileiro (ver o Anexo B) é um exemplo da rápida mudança de perfil das cargas móveis.

Levando-se em conta todas as considerações mencionadas, as comparações dos esforços devidos ao tráfego real com os gerados pelos veículos-tipo normativos foram levadas a cabo com um período de retorno de 2,5 anos (o próprio período de observação), respeitando-se assim a limitação das configurações medidas; considerou-se razoável para este trabalho o tempo de retorno de 100 anos para o cálculo dos valores-alvo dos esforços solicitantes, que deverão ser reproduzidos pelos modelos de carga.

V.6 Comparação dos efeitos do tráfego real com o dos veículos de projeto

As comparações de esforços nas pontes com tabuleiro de modelo atual foram feitas para as duas classes de veículos normativos, Classe 36 e Classe 45. Nas pontes com tabuleiro de modelo antigo verificaram-se apenas os efeitos em comparação ao veículo-tipo Classe 36. As Figuras V.9 mostram as variações das razões entre os valores representativos das extrapolações dos esforços nas estruturas e os correspondentes esforços devidos aos veículos normativos, em função do comprimento do vão ou balanço, para cada sistema estrutural e cada modelo de tabuleiro, considerando período de retorno de 2,5 anos. Para os vãos de 10m e balanço de 2,5m, as distribuições amostrais de referência dos esforços solicitantes são mostradas nas Figuras IV.10.

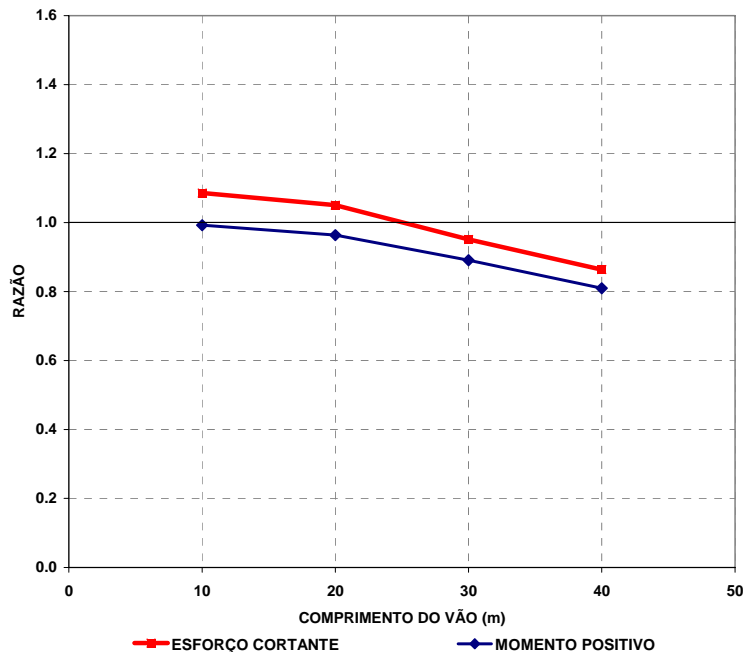


Figura V.9a Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema biapoiado, com tabuleiro de modelo antigo, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36

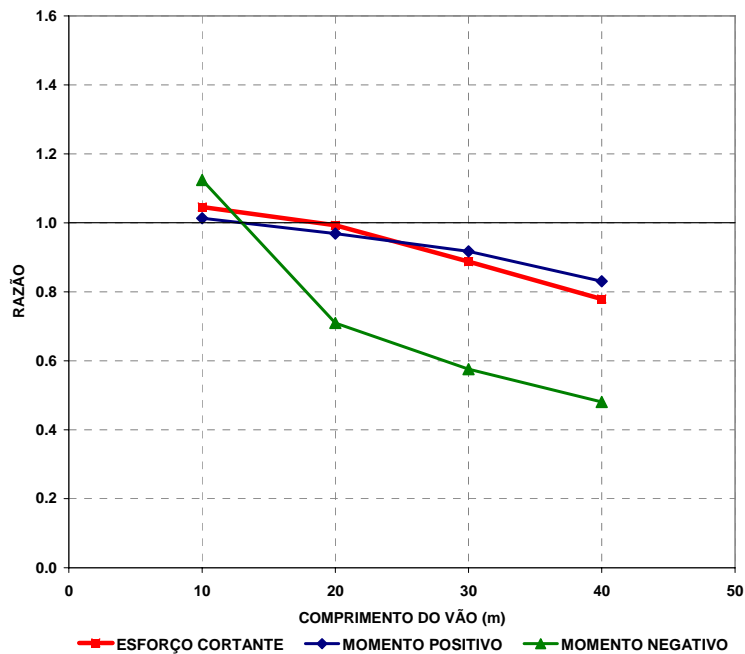


Figura V.9b Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema contínuo de dois vãos, com tabuleiro de modelo antigo, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36

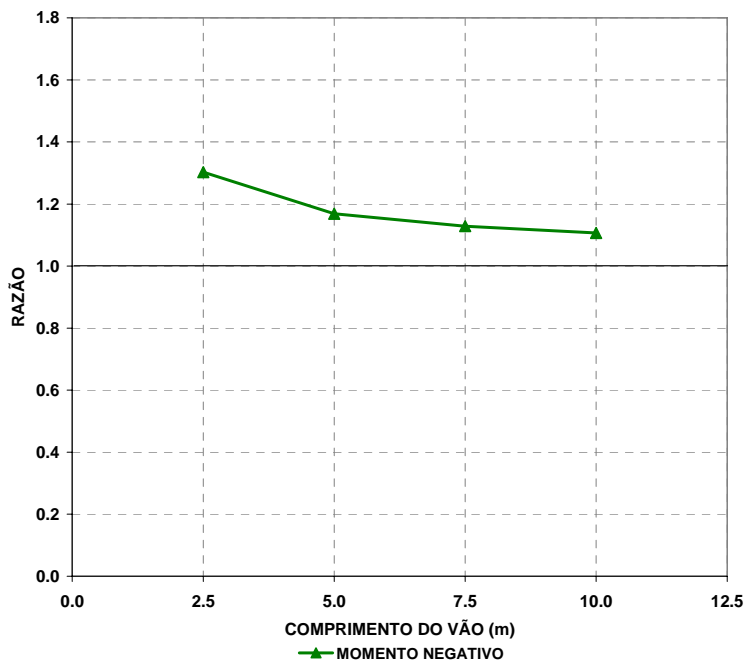


Figura V.9c Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema em balanço, com tabuleiro de modelo antigo, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36

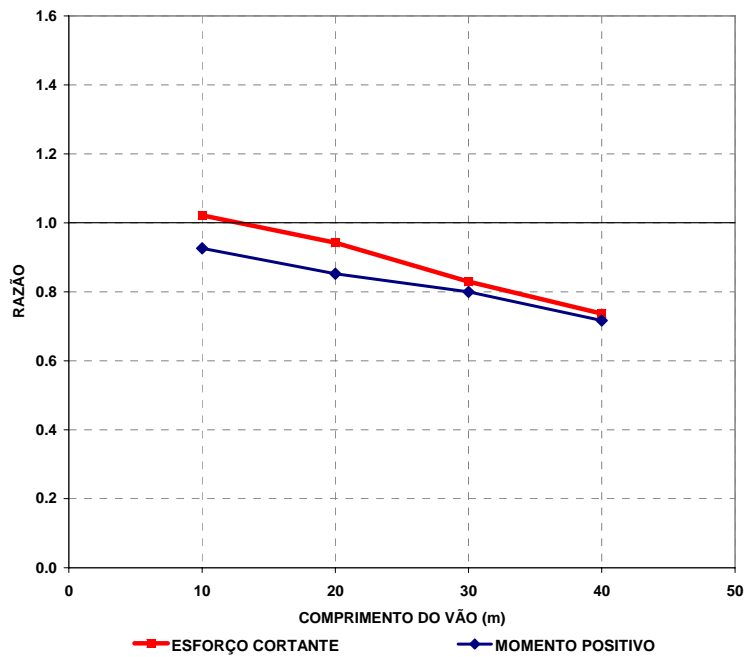


Figura V.9d Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema biapoiado, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36

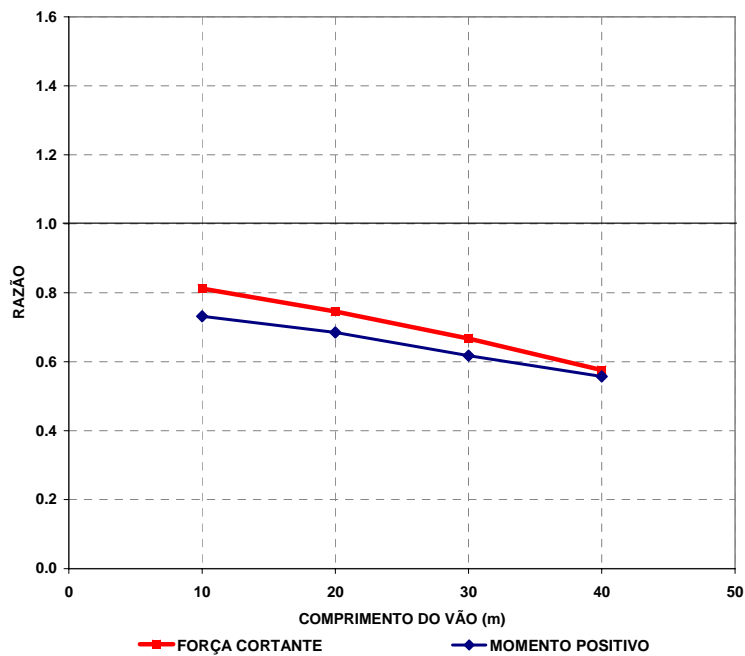


Figura V.9e Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema biapoiado, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 45

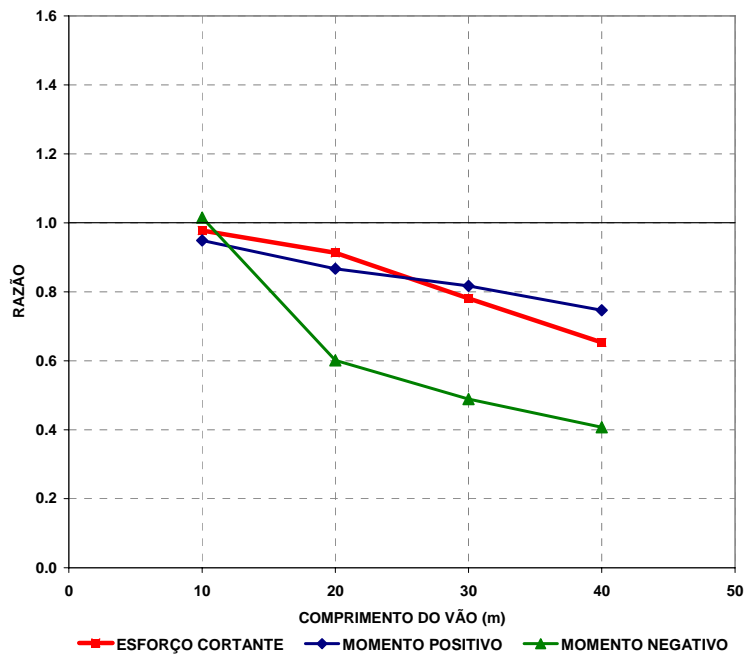


Figura V.9f Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema contínuo de dois vãos, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36

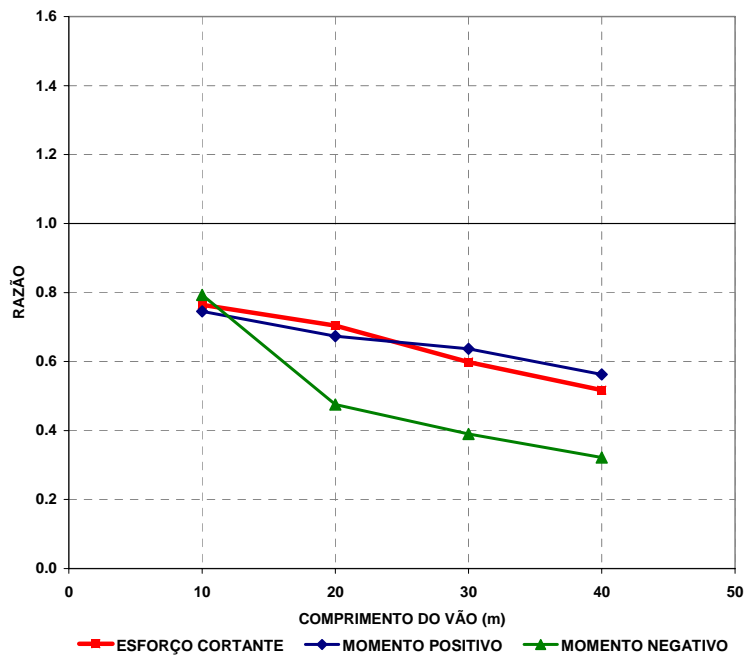


Figura V.9g Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema contínuo de dois vãos, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 45

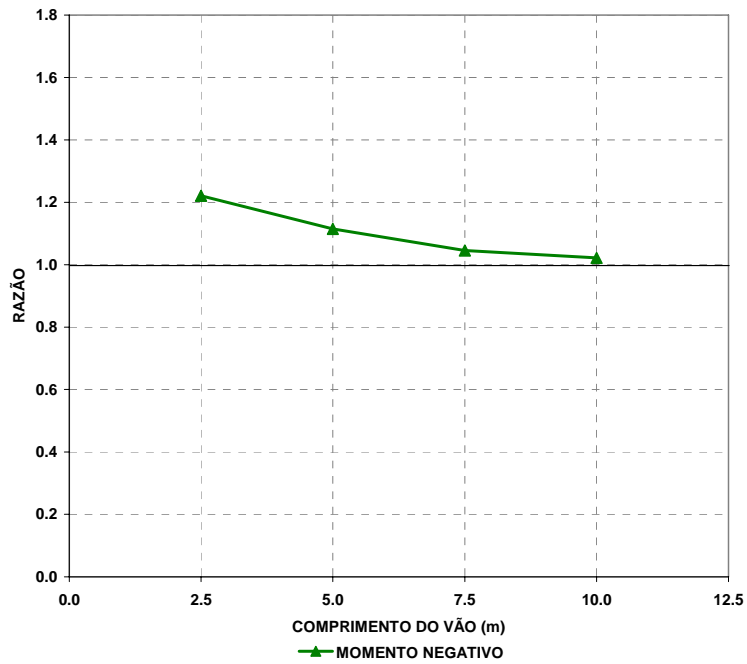


Figura V.9h Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema em balanço, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 36

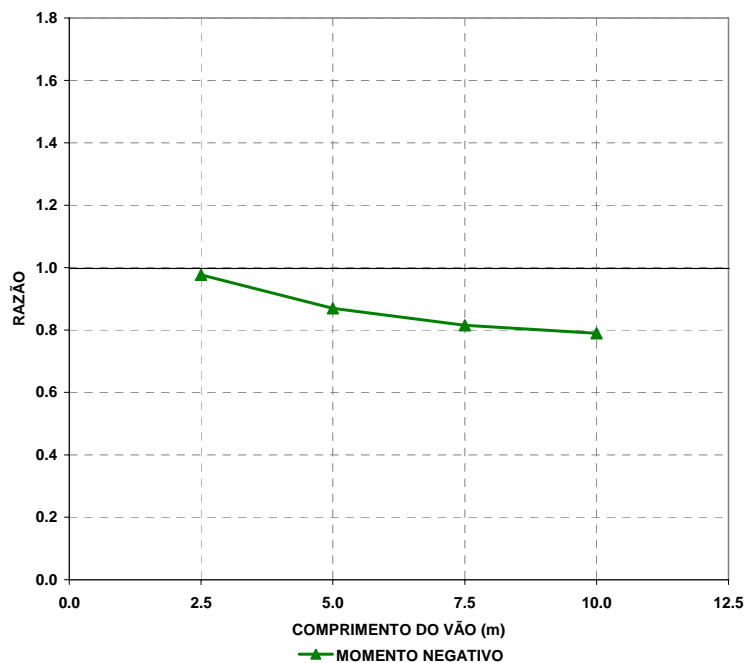


Figura V.9i Razão entre os valores representativos das distribuições extrapoladas de esforços no sistema em balanço, com tabuleiro de modelo atual, e os esforços produzidos pelo carregamento Classe 45

Observa-se nas Figuras V.9 que em diversos casos os esforços solicitantes devidos ao tráfego real são maiores que aqueles devidos ao carregamento de projeto. Isto indica que a margem de segurança requerida pelo projeto está comprometida pela passagem do tráfego real. Observa-se também que as razões de esforços decrescem com o aumento do comprimento do vão, já que se amplia a contribuição da parcela de carga distribuída do carregamento normativo.

As Figuras V.9a-c referem-se ao tabuleiro de modelo antigo. Para este caso, todas as estruturas com 10m de vão têm seus esforços críticos devidos ao carregamento Classe 36 superados pelos esforços devidos aos veículos reais. Nos sistemas biapoiados isto também ocorre para o esforço cortante no vão de 20m. Destaca-se o momento negativo no sistema com balanço, que é superado em todos os vãos entre 2,5m (onde a ação do tráfego real resultou em esforços 30% maiores que os do carregamento Classe 36) e 10m (onde a superação alcançou 11%).

As Figuras V.9d a V.9i referem-se ao tabuleiro de modelo atual (mais largo que o antigo). Nestes tabuleiros os efeitos da carga distribuída de multidão de projeto são maiores que no tabuleiro antigo e por isso as solicitações decorrentes são também maiores. Verifica-se que, nas pontes com tabuleiros de modelo atual, somente o momento negativo no balanço supera de forma significativa a ação do carregamento Classe 36, nos vãos entre 2,5m (onde a ação do tráfego real superou em 22% os esforços deste carregamento) e 10m (onde a superação alcançou 2%).

Como citado na Seção V.7, os maiores momentos fletores negativos no balanço devem-se à passagem do veículo 3C de 446kN. No balanço de 2,5m, as grandes razões entre os esforços devem-se à ausência da carga de multidão. Com o aumento do comprimento do balanço, é possível aplicar integralmente os carregamentos normativos (o veículo-tipo e as cargas de multidão); por isso, nos balanços de 5m, 7,5m e 10m as razões entre os esforços são menores.

Os sistemas estruturais com mais de 10m podem receber integralmente as cargas dos veículos mais longos considerados neste trabalho (os veículos 2S2 e 2S3); nestes casos, em geral, as maiores solicitações são causadas pelos semi-reboques 2S3 mais pesados (com peso total de 508kN, 526kN e 549kN).

Em nenhum sistema com tabuleiro de modelo atual a ação do tráfego real superou a do carregamento Classe 45. Entretanto, os valores indicados nas Figuras V.9 refletem os efeitos dos veículos passando *separadamente* (um por vez) nas obras de arte; se fosse considerada a hipótese de os veículos cruzarem a obra de arte

simultaneamente, estas solicitações poderiam ultrapassar os valores de projeto, embora com uma probabilidade de ocorrência pequena, pois foram analisados apenas pequenos vãos.

V.7 Valores-alvo dos efeitos para os modelos de carga

As cargas móveis, ao se deslocarem sobre uma ponte, produzem efeitos dinâmicos diversos. A mudança de posição das cargas, na supraestrutura, obriga-a a realizar movimentos a fim de adaptar-se às deformações resultantes; estes movimentos despertam forças de inércia devidas à massa, que passam a atuar em conjunto com as cargas externas, provocando vibrações que podem majorar os esforços estáticos (MASON, 1977). Alguns fatores que influenciam a vibração são as configurações dos eixos (carga, distância, número total), a suspensão, a frequência natural, a geometria, as condições de apoio, a rigidez, a distribuição das massas, a velocidade e, principalmente, o nível de rugosidade do pavimento (FERREIRA, 1999, PERLINGEIRO *et al.*, 2002).

Para se avaliar o efeito dinâmico das cargas móveis, os códigos de cálculo e projeto de pontes assimilam-nas diretamente às cargas estáticas, através da sua multiplicação pelos *coeficientes de impacto*, geralmente dado em função do comprimento do vão.

As respostas dinâmicas das pontes de grandes vãos praticamente se igualam às estáticas; os efeitos dinâmicos da passagem dos veículos são rapidamente atenuados (PERLINGEIRO *et al.*, 2002). Os modelos de impacto devem prever decréscimo do efeito dinâmico com o comprimento do vão.

A NBR 7187 (2003) formula para as pontes rodoviárias o coeficiente de impacto $\varphi \geq 1$, aplicado ao valor das cargas dos veículos-tipo, exclusivamente em função do vão:

$$\varphi = 1,4 - 0,007 \cdot L \quad (\text{V.1})$$

Na Eq. (V.1), L é o comprimento, em metros, de cada vão teórico do elemento carregado, qualquer que seja o sistema estrutural. Portanto, o coeficiente de impacto decresce linearmente de 1,4 até a unidade num vão de aproximadamente 57m; em vãos maiores não há majoração das cargas estáticas.

A extrapolação dos valores-alvo foi feita considerando o impacto vertical de acordo com a NBR 7187, para um período de retorno de 100 anos, conforme descrito na Seção V.5. As Figuras V.10a a V.10d mostram os valores-alvo obtidos para os sistemas

estruturais com tabuleiro de modelo antigo e as Figuras V.10e a V.10h mostram os valores-alvo para os tabuleiros de modelo atual. Estes valores deverão ser reproduzidos futuros pelos modelos de carga, de forma a representar corretamente os efeitos do tráfego real.

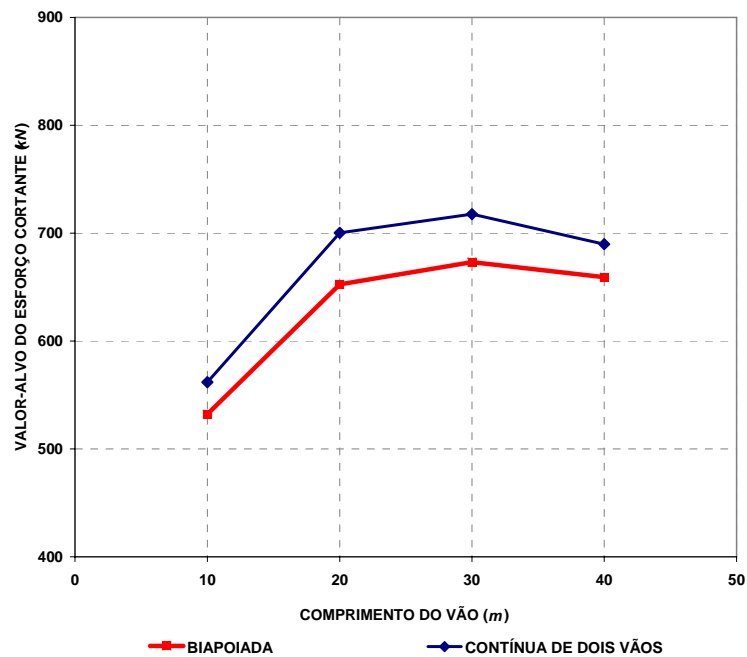


Figura V.10a Valores-alvo dos esforços cortantes nos sistemas com tabuleiro de modelo antigo

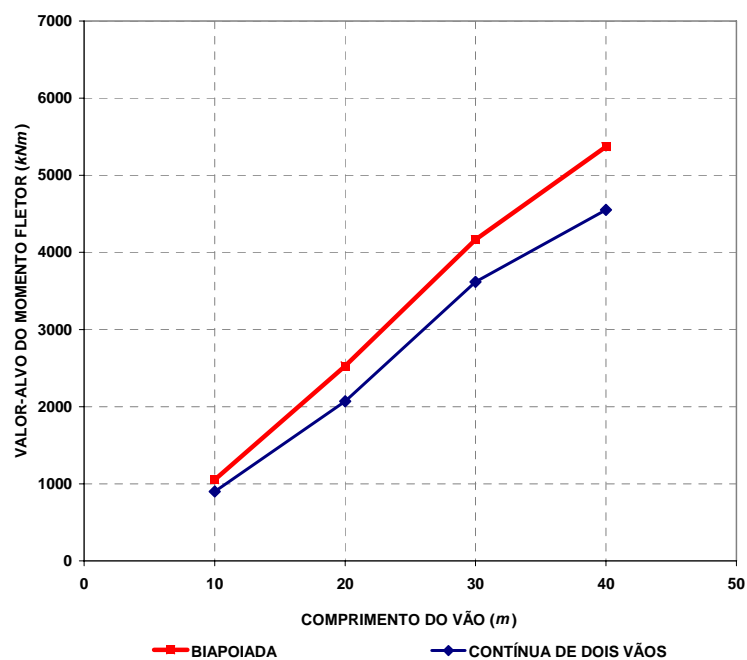


Figura V.10b Valores-alvo dos momentos fletores positivos nos sistemas com tabuleiro de modelo antigo

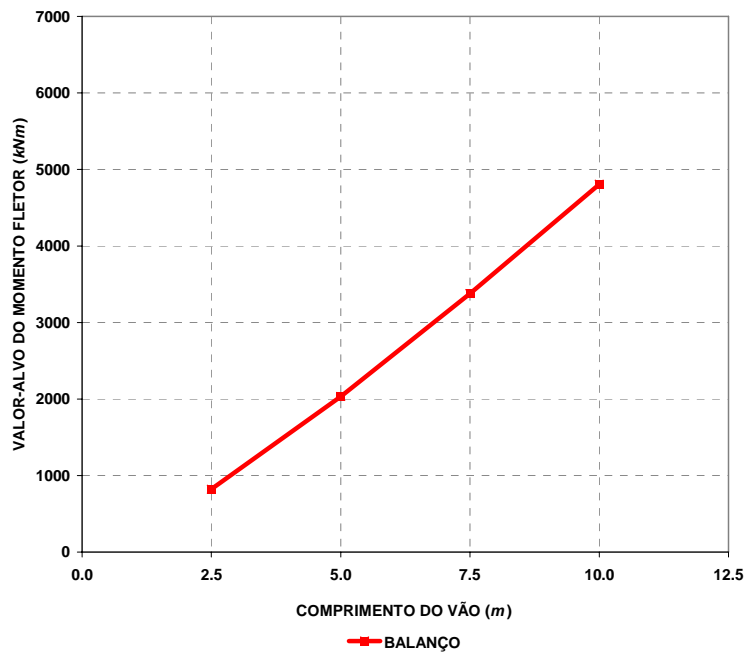


Figura V.10c Valores-alvo dos momentos fletores negativos nos sistemas em balanço, com tabuleiro de modelo antigo

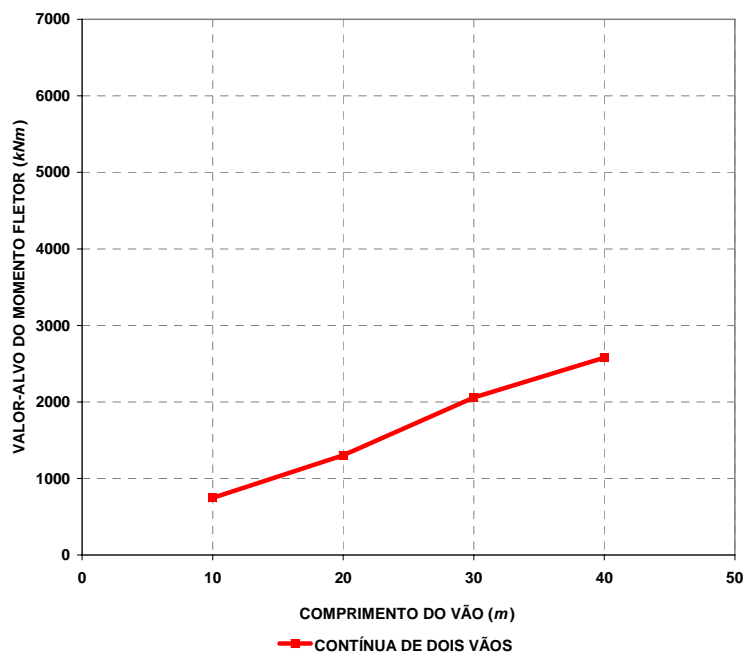


Figura V.10d Valores-alvo dos momentos fletores negativos nos sistemas contínuos de dois vãos, com tabuleiro de modelo antigo

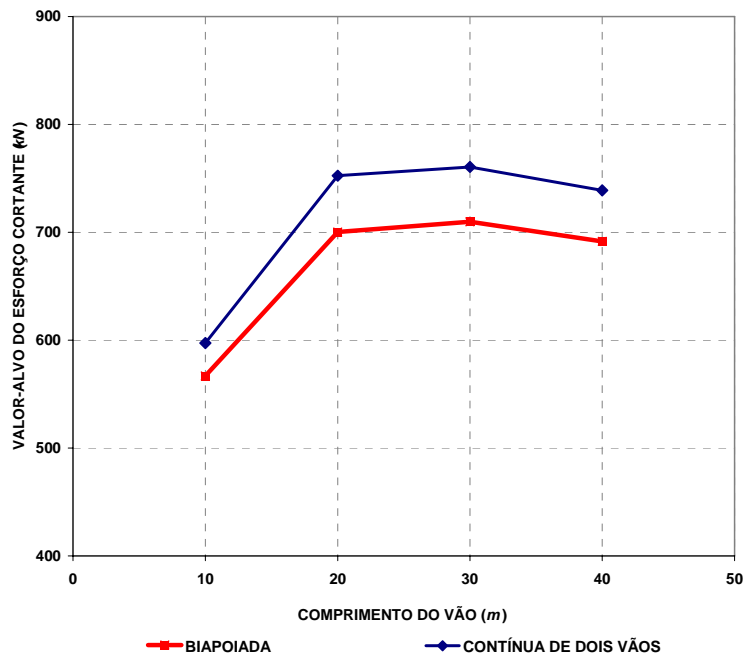


Figura V.10e Valores-alvo dos esforços cortantes nos sistemas com tabuleiro de modelo antigo

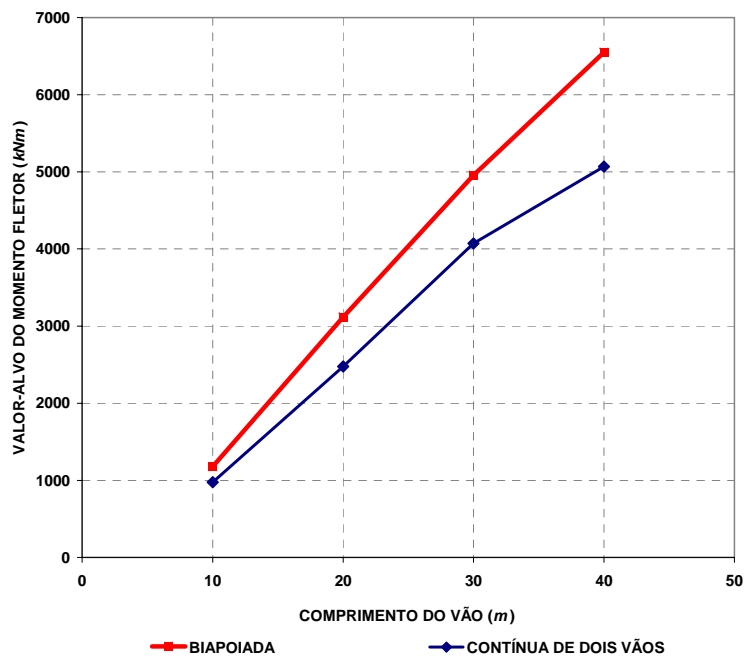


Figura V.10f Valores-alvo dos momentos fletores positivos nos sistemas com tabuleiro de modelo atual

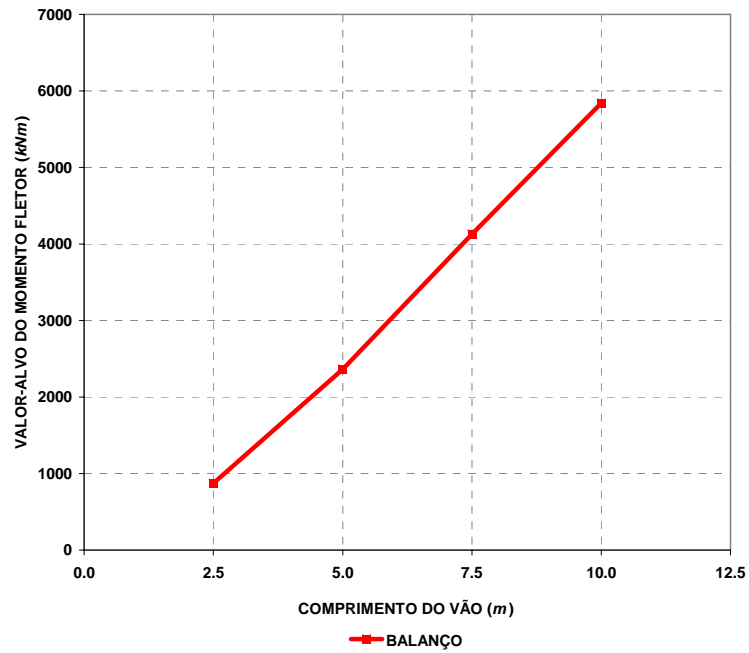


Figura V.10g Valores-alvo dos momentos fletores negativos nos sistemas em balanço, com tabuleiro de modelo atual

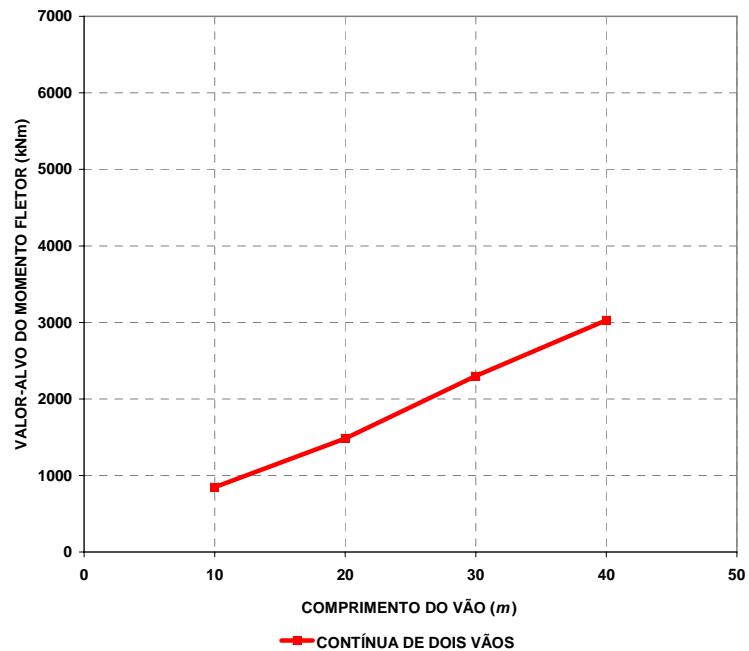


Figura V.10h Valores-alvo dos momentos fletores negativos nos sistemas contínuos de dois vãos, com tabuleiro de modelo atual

VI Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

VI.1 Conclusões

A partir dos dados de tráfego rodoviário obtidos entre 1999 e 2002 nos Postos de Monitoramento do DNIT, estabeleceu-se criteriosamente uma base reduzida de dados de veículos para a qual se efetuou o estudo estatístico detalhado. Os efeitos da passagem desses veículos reais foram calculados em pontes representativas da malha rodoviária brasileira e comparados aos correspondentes efeitos dos veículos-tipo das normas brasileiras NB 6 (1960) e NBR 7188 (1982). Com a extrapolação dos efeitos dos veículos reais para um período de retorno adotado de 100 anos, chegou-se aos correspondentes valores-alvo, que deverão ser reproduzidos por modelos de cargas móveis a serem desenvolvidos no futuro. Desta forma, estes modelos de carga representariam os efeitos do tráfego real e poderiam substituir o carregamento da NBR 7188, cujo veículo-tipo evoluiu a partir da configuração de um veículo militar, acrescido de carga uniformemente distribuída.

Dos estudos de tráfego rodoviário concluiu-se que o posto P51 (BR-101, Pedro Canário, ES) apresentou os dados mais coerentes de monitoração, sendo usado como referência para a base de dados adotada neste trabalho.

O conjunto dos veículos 2C, 3C, O2C, O3C, 2S2 e 2S3 pode ser adotado como representativo dos veículos em circulação. As CVC foram excluídas do estudo pela reduzida frequência de ocorrência e pela ausência de dados detalhados, mas com o aumento progressivo destas composições trafegando nas rodovias, este quadro deverá ser revisto. Verificou-se também uma grande incidência de veículos com excesso de peso em relação ao limite legal.

Os esforços solicitantes devidos ao tráfego real foram obtidos por análise estática de pontes em grelha de duas longarinas, com vãos entre 10m e 40m (e balanços entre 2,5m e 10m) admitindo a passagem de veículos isolados. Os efeitos dinâmicos foram considerados através do coeficiente de impacto da NBR 7187.

As extrapolações foram efetuadas por dois métodos, que conduziram a resultados muito próximos: pela Estatística de Extremos e pelo inverso do período de retorno. Além disso, foram utilizadas duas bases de dados: considerando todos os registros de veículos e considerando somente os veículos mais pesados. As curvas ajustadas aos histogramas de esforços solicitantes devidos aos veículos em cada base de

dados foram as seguintes: distribuição normal para a base completa e distribuição de Gumbel para o conjunto de veículos mais pesados. As distribuições de máximos forneceram valores representativos muito próximos para as duas bases de dados, indicando que são os veículos mais pesados os que realmente importam à extrapolação. Foram adotados, neste trabalho, os resultados da Estatística de Extremos aplicada à base de dados que considera todos os veículos. Adotou-se como representativo o valor médio da distribuição de máximos.

Limitando-se a 2,5 anos o período de retorno dos efeitos aleatórios da passagem dos veículos reais e comparando-os aos efeitos dos carregamentos das normas NB 6 e NBR 7188, chegou-se às seguintes conclusões, distintas para pontes com tabuleiros de modelo antigo do DNER e de modelo atual:

- em todos os sistemas com tabuleiro de modelo antigo e vão de 10m, as estruturas têm seus esforços críticos devidos ao carregamento Classe 36 superados pelos esforços devidos aos veículos reais;

- nos sistemas biapoiados com tabuleiro de modelo antigo, a superação dos efeitos devidos ao carregamento Classe 36 ocorre também para o vão de 20m;

- o momento negativo no sistema com balanço e tabuleiro de modelo antigo é o caso mais crítico: em todos os vãos em balanço entre 2,5m e 10m, o momento negativo devido aos veículos reais foi maior que aqueles devidos ao carregamento Classe 36;

- nos sistemas com tabuleiro de modelo atual, somente o momento negativo no balanço devido à ação dos veículos reais resultou contra a segurança. Em comparação ao tabuleiro de modelo antigo (mais estreito), as solicitações devidas aos carregamentos normativos são maiores no tabuleiro de modelo atual, devido à ação da carga de multidão em uma largura maior. Por isso, as estruturas com tabuleiro modelo atual são mais seguras que as do modelo antigo, para a passagem de veículos isolados;

- em nenhum vão ou sistema estrutural, com tabuleiro de modelo atual, os esforços devidos ao tráfego real superaram aqueles gerados pelo carregamento Classe 45.

As comparações entre os esforços refletem os efeitos dos veículos passando separadamente nas pontes; se fosse considerada a hipótese de mais de um veículo cruzar a obra de arte por vez, estas solicitações poderiam igualar ou ultrapassar em maior magnitude os valores de projeto, porém com pequena probabilidade de ocorrência.

De forma geral, nos sistemas em balanço analisados, de 2,5m a 10m, as maiores solicitações são devidas aos veículos 3C de 450kN, devido ao grande percentual de

carga nos seus eixos traseiros; nos outros sistemas com vãos maiores que $10m$, os veículos 2S3 mais pesados (com até $550kN$ de peso total) são responsáveis pelos maiores esforços.

A simplificação adotada neste trabalho, de tomar como constantes os percentuais de carga dos veículos em cada eixo, não resulta grandes imprecisões, pois verificou-se que estas proporções são muito próximas dos modelos experimentais nos veículos 3C e 2S3 quando bastante carregados, os quais geram os maiores esforços solicitantes.

Extrapolando-se as distribuições de máximos dos esforços solicitantes e considerando o seu valor representativo num período de retorno de 100 anos, obtiveram-se os valores-alvo destes esforços em cada situação, que deverão ser alcançados pelos futuros modelos de cargas móveis nas pontes analisadas. Entretanto, esses modelos de carga deverão estar sujeitos a recalibrações periódicas, de forma a se garantir a sua representatividade em reproduzir os efeitos do tráfego real nas pontes.

VI.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para complementar este trabalho, são necessárias análises de outras obras na malha rodoviária brasileira, como por exemplo:

- outras classes de pontes, com 4 faixas de tráfego;
- outros sistemas estruturais e outras faixas de comprimentos de vão:
 - em laje, para vãos curtos, com comprimento entre $5m$ e $10m$;
 - com mais de duas longarinas de seção aberta, (3, 4, 5, 6...);
 - com longarinas de seção celular, para meios urbanos (onde há redução da altura da seção);
- vãos maiores, de $50m$ a $200m$.

Outras sugestões para trabalhos futuros baseiam-se na seqüência de trabalho exposta na Seção I.1, que mostra a continuidade desta linha de pesquisa:

- obtenção e uso de dados mais completos de monitoração junto aos órgãos responsáveis, como o DNIT, principalmente quanto às dimensões e pesos de todas as classes de veículos catalogadas e espaçamento entre veículos;
- simulação de tráfego com vários veículos sobre a ponte, em fluxo livre e em engarrafamentos, na mesma faixa e em faixas distintas;
- análise estrutural dinâmica;

- refino no cálculo dos histogramas de esforços solicitantes para considerar a variação do percentual de carga por eixo em função do peso total do veículo;
- busca, por otimização, dos modelos de carga móvel;
- modelos de carga de veículos para estado limite de fadiga;
- consideração da área de contato dos pneus com o pavimento nos modelos futuros a serem desenvolvidos, para representar a transmissão de esforços de forma mais realista em verificações locais;
- aplicação de métodos de Confiabilidade Estrutural, com vistas à obtenção dos coeficientes de segurança para os futuros modelos de carga.

Referências Bibliográficas

- ABNT, 1960, NB 6 – *Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT, 1982, NBR 7188 – *Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT, 2003, NBR 6118 – *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT, 2003, NBR 7187 – *Projeto e Execução de Pontes em Concreto Armado e Protendido - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT, 2003, NBR 8681 – *Ações e segurança nas estruturas – Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AKISHINO, P., 2004, *Apostila de Estudos de Tráfego*. Curitiba, PR, UFPR, www.tecnologia.ufpr.br/publicacoes/engcivil/dtt/transportes, 12/07/2006.
- ANG, A. H.-S., TANG, W. H., 1975, *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. Volume I: Basic Principles. New York, John Wiley & Sons.
- ANG, A. H.-S., TANG, W. H., 1984, *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. Volume II: Decision, Risk and Reliability. New York, John Wiley & Sons.
- Associação Nacional das Empresas Importadoras de Veículos Automotores, www.abeiva.com.br, 02/08/2006.
- Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários, www.anfir.org.br, 02/08/2006.
- Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, www.anfavea.com.br, 02/08/2006.
- Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística, www.ntcelogistica.org.br, 02/08/2006.
- BAUTISTA, E. A. L., 2002, *A distribuição generalizada de valores extremos no estudo da velocidade máxima do vento em Piracicaba, SP*. Dissertação de M.Sc., Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, Piracicaba, SP, Brasil.
- CALGARO, J.-A., 1998, “Loads on Bridges”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 1 (4), pp. 452-461.

CATÁLOGOS TÉCNICOS DE FABRICANTES:

- A. Guerra S. A. Implementos Rodoviários, www.aguerra.com.br, 12/08/2005.
- Agrale S. A., www.agrale.com.br, 02/08/2006.
- América Implementos Rodoviários LTDA., www.americair.com.br, 02/08/2006.
- Automobiles Citroën, www.citroen.fr, 02/08/2006.
- DaimlerChrysler AG., www.mercedes-benz.com, 02/08/2006.
- DaimlerChrysler do Brasil LTDA., www.mercedes-benz.com.br, 02/08/2006.
- Dambroz S. A. Indústria Mecânica e Metalúrgica, www.dambroz.com.br,
02/08/2006.
- Facchini S. A., www.facchini.com.br, 02/08/2006.
- Ford Motor Company Brasil S. A., www.ford.com.br, 02/08/2006.
- General Motors do Brasil LTDA., www.chevrolet.com.br, 02/08/2006.
- Goydo Implementos Rodoviários LTDA., www.goydo.com.br, 02/08/2006.
- Grupo Hübner, www.rodolinea.com.br, 02/08/2006.
- Indústria Metalúrgica Pastre LTDA., www.pastre.com.br, 02/08/2006.
- Irmãos Librelato LTDA., www.librelato.com.br, 02/08/2006.
- Iveco Latin America, www.iveco.com.br, 02/08/2006.
- Kronorte S. A. Implementos para o Transporte, www.kronorte.com.br,
02/08/2006.
- Metalúrgica Schiffer S. A., www.schiffer.com.br, 02/08/2006.
- Noma do Brasil S. A., www.noma.com.br, 02/08/2006.
- Peugeot Citroën do Brasil Automóveis LTDA., www.citroen.com.br, 02/08/2006.
- Pierino Gotti Indústria de Implementos Rodoviários e Mecânicos LTDA.,
www.gotti.ind.br, 02/08/2006.
- Randon S. A. Implementos e Participações, www.randon.com.br, 12/08/2005.
- Rodosinos Carrocerias e Refrigeração LTDA., www.rodosinos.com.br,
02/08/2006.
- Rossetti Equipamentos Rodoviários LTDA., www.rossetti.com.br, 02/08/2006.
- Scania Group, www.scania.com, 02/08/2006.
- Scania Latin America LTDA., www.scania.com.br, 02/08/2006.
- Volkswagen do Brasil LTDA., www.vw.com.br, 02/08/2006.
- Volkswagen of America, Inc., www.vw.com, 02/08/2006.
- Volvo do Brasil, www.volvo.com.br, 02/08/2006.
- Volvo Group, www.volvo.com, 02/08/2006.

- CHEN, W.-F., DUAN, L., 2000, *Bridge Engineering Handbook*. London, CRC Press.
- Confederação Nacional da Indústria, www.cni.org.br, 02/08/2006.
- CONTRAN, 06/02/1998, Resolução nº 12, Brasília, DF.
- CONTRAN, 23/09/1998, Resolução nº 68, Brasília, DF.
- CONTRAN, 19/11/1998, Resolução nº 76, Brasília, DF.
- CONTRAN, 31/08/1999, Resolução nº 102, Brasília, DF.
- CONTRAN, 21/12/1999, Resolução nº 104, Brasília, DF.
- CONTRAN, 10/09/2004, Resolução nº 164, Brasília, DF.
- CONTRAN, 21/10/2005, Resolução nº 184, Brasília, DF.
- CONTRAN, 25/01/2006, Resolução nº 189, Brasília, DF.
- DAS, P. C., 1997, *Safety of Bridges*. London, Thomas Telford.
- DE LAS CASAS, E. B., PEREIRA, S. S. R., OLIVEIRA, C. Q., 2002, “Estudo de envoltórias de esforços solicitantes em pontes”. In: *Anais das XXX Jornadas Sul-americanas de Engenharia Estrutural*, Brasília, DF, maio.
- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, www.der.sp.gov.br, 02/08/2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 2001, *Quadro de fabricantes de veículos*. Brasília, Diretoria de Operações Rodoviárias do DNER.
- Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, www.dnit.gov.br, 02/08/2006.
- EHLERS, R., JUSTINIANO, P., *Notas de aula de Inferência Estatística II*, www.est.ufpr.br/~paulojus/CE210/ce210/node4.html, 09/05/2006.
- EL DEBS, M. K., MALITE, M., TAKEYA, T. *et al.*, 2002, “Um Estudo das Conseqüências do Tráfego de Combinações de Veículos de Carga sobre as Pontes da Rede Viária do DER-SP”. In: *Anais das XXX Jornadas Sul-americanas de Engenharia Estrutural*, Brasília, DF, maio.
- FERREIRA, V. T., 1999, *Modelo simplificado para a Análise Dinâmica de Estruturas Mistas de Pontes*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Guia do transportador Rodoviário de Cargas, www.guiadotrc.com.br, 09/05/2006.
- HOLMES, J. D., 2001, *Wind Loading of Structures*. London, Spon Press.
- KREISZIG, E. K., 1993, *Advanced Engineering Mathematics*. 7th edition. New York, John Wiley & Sons.
- MASON, J., 1977, *Pontes em Concreto Armado e Protendido: Princípios de Projeto e Cálculo*. São Paulo, Livros Técnicos e Científicos.

- Ministério dos Transportes, www.transportes.gov.br, 02/08/2006.
- NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, www.itl.nist.gov/div898/handbook, 09/05/2006.
- NOWAK, A. S., 1993, “Live load model for highway bridges”, *Structural Safety*, v. 13, pp. 53-66.
- O’CONNOR, C., SHAW, P. A., 2000, *Bridge Loads: An international perspective*. London, Spon Press.
- PEREIRA, D. R. A. M., 1992, *Contribuição ao Estudo dos Fatores de Equivalência de Carga*. Dissertação de M.Sc., EPUSP, São Paulo, SP, Brasil.
- PERLINGEIRO, M. S. P. L., FERREIRA, V. T., CARVALHO, E. M. L. *et al.*, 2002, “Influência da interação pavimento-veículo-estrutura na resposta dinâmica de pontes”. In: *Anais das XXX Jornadas Sul-americanas de Engenharia Estrutural*, Brasília, DF, maio.
- PFEIL, W., 1985, *Pontes em Concreto Armado*. Volume 1. 3ª edição. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos.
- PRAT, M., 2001, “Traffic load models for bridge design: recent developments and research”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 3, pp. 326-334.
- PRAVIA, Z. M. C., ORLANDO, D., DREHMER, G. A., 2004, “Análise da Distribuição de Carregamento Transversal Móvel em Pontes Mistas Aço-concreto”. In: *Anales de las XXXI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Mendoza, Argentina, mayo.
- RODRIGUES, R. S., 2001, *Aquisição e tratamento de dados de velocidade de vento*. Seminário de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SAGRILO, L. V. S., LIMA, E. C. P., 2004, *Notas de Aula de Confiabilidade Estrutural: Variáveis Aleatórias, Distribuições de Probabilidades, Estatística de Extremos e Inferência Estatística*. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.
- SILVEIRA, G. L., MACHADO, C. C., SOUZA, A. P. *et al.*, 2004, “Avaliação de Parâmetros de Combustível do Tritrem no Transporte de Madeira”, *Revista Árvore*, v. 28 (1), pp. 99-106.
- SIURB-SP, *Normas Técnicas de Pavimentação: Classificação das Vias*. Secretaria Municipal de Infra-estrutura Urbana e Obras da Prefeitura da Cidade de São Paulo, 2006.
- SPIEGEL, M. R., 1994, *Estatística*. 3ª edição. São Paulo, Makron Books do Brasil.

- WALCK, C., 2001, *Hand-book on Statistical Distributions for experimentalists*. Stockholm, Universitet Stockholms.
- WIDMER, J. A., 2002, “Compatibilidade de Tráfego de Bitrens de 25m com a Infra-estrutura Viária Brasileira”. In: *Anais do 2º Colloquium Internacional de Suspensões e do 1º Colloquium de Implementos Rodoviários da SAE-Brasil*, Caxias do Sul, RS, maio.
- WIDMER, J. A., 2004, “Proposta de Nomenclatura para Caminhões, Ônibus, CVCs – Combinações de Veículos de Carga e CVPs – Combinações de Veículos de Passageiros”. In: *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*, Florianópolis, SC, novembro.

Anexo A Classificação dos veículos rodoviários

A.1 Tipos de veículos e ligações

Existem veículos com inúmeras configurações diferentes trafegando nas estradas. Para se referenciar um determinado tipo de veículo, usam-se nomenclaturas especiais que o identificam univocamente no universo de configurações.

Um veículo é denominado *simples* ou *monolítico* quando formado por somente uma parte. Quando formado por duas ou mais partes (uma unidade tratora transportando uma ou mais unidades de carga), ligadas entre si por algum dispositivo de conexão, é denominado *composto*.

Existem basicamente dois tipos de conexão: tipo semi-reboque e tipo reboque. A conexão tipo semi-reboque, chamada tecnicamente de *engate tipo B*, é uma articulação em que a unidade traseira (carreta) se apóia, pelo pino-rei, diretamente na quinta roda montada na unidade dianteira (uma unidade tratora ou mesmo outra carreta). A unidade tratora que disponibiliza a quinta roda chama-se *cavalo mecânico*. Os veículos compostos cuja unidade tratora é o cavalo mecânico são conhecidos como *semi-reboques*.

A conexão tipo reboque é uma barra de tração que conecta o eixo, ou conjunto de eixos, da unidade anterior na unidade posterior (que tem pelo menos um eixo dianteiro), sendo fixa nesta. Os veículos compostos que utilizam esse princípio de tração são conhecidos como *reboques*, sendo a unidade tratora um caminhão rígido convencional. A unidade posterior não se apóia diretamente na anterior, como nos semi-reboques.

Atualmente tem uso difundido nas ligações tipo reboque o equipamento conhecido como *dolly*. Esse mecanismo é essencialmente uma plataforma independente, geralmente sobre um ou dois eixos, que converte uma ligação do tipo semi-reboque numa do tipo reboque (Figura A.1) através da combinação de uma quinta roda (usada para tornar a unidade traseira apoiável) com uma ou duas barras rígidas horizontais que fixam a parte traseira na dianteira. O *dolly* geralmente é engatado atrás de uma carreta semi-reboque.

As conexões reboque, tanto a tradicional como o *dolly*, podem ser de dois tipos, tecnicamente chamados de *engate tipo A* e *engate tipo C*. O engate tipo A tem um único ponto de conexão, sendo formado por uma só barra ou por duas barras convergentes; já

o tipo C tem duas barras paralelas, fornecendo dois pontos de conexão. No Brasil ainda usa-se o *dolly* com engate tipo A (Figura A.2), enquanto países como Estados Unidos e Canadá usam nos reboques a conexão do tipo C (Figura A.3).



Figura A.1 Encaixe da carreta num *dolly* de um eixo, para torná-la rebocável, alterando o tipo de engate (www.pastre.com.br)

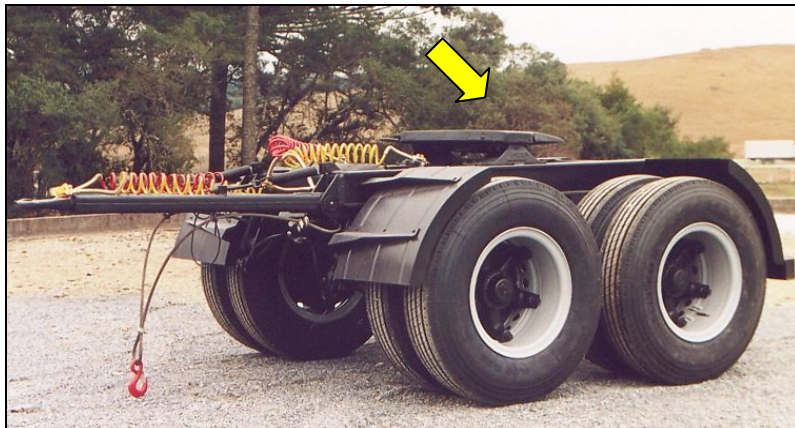


Figura A.2 *Dolly* com engate tipo A, de dois eixos, com as ligações vertical (quinta roda indicada pela seta) e horizontal (barra) (www.pastre.com.br)



Figura A.3 Conexão reboque: engate tipo C (www.hunkstruckpictures.com)

É grande a influência do tipo de engate sobre a estabilidade dos veículos. A ligação tipo semi-reboque apresenta menos problemas de estabilidade do que qualquer ligação tipo reboque. Um engate tipo C, por ter dois pontos de contato, assegura maior resistência ao tombamento em relação ao engate tipo A, com somente um.

Tanto o engate B como o C fazem transferência lateral de cargas, o que garante maior estabilidade e redução na amplificação de oscilações traseiras das unidades rebocadas, além de proporcionar maior força de combate ao tombamento para ambas as carretas, quando elas giram em sentidos opostos durante uma manobra rápida como uma mudança de faixa. Portanto, há maior estabilidade do engate B em relação ao C, e do engate C em relação ao A (www.ntcelogistica.org.br). A Figura A.4 esquematiza os três tipos de engate.

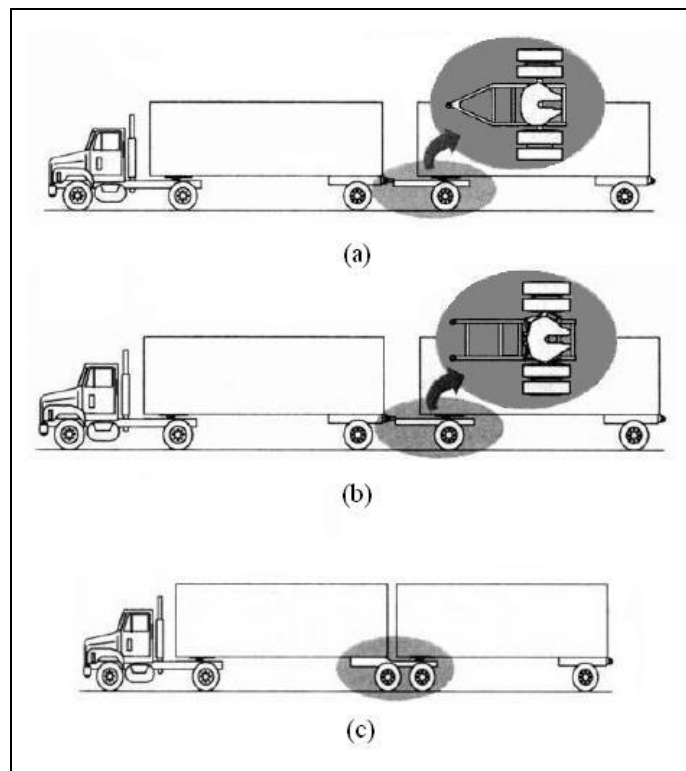


Figura A.4 (a) engate tipo A (barras convergentes); (b) engate tipo C (barras paralelas); (c) engate tipo B (pino-rei e quinta roda) (www.guiadotrc.com.br)

A.2 Sistemas de identificação dos veículos

Um bom sistema de identificação deve contemplar algumas informações sobre o veículo, seja ele simples ou composto:

- o número de partes que o constituem;
- a configuração dos eixos em cada uma de suas partes;

- o tipo de conexão entre as partes do veículo.

Esta última informação depende do tipo de engate entre as partes dos veículos.

O padrão geral da literatura (www.dnit.gov.br, www.der.sp.gov.br, DNIT, 2001) consiste em usar os *números* para informar a quantidade de eixos de cada espécie: do veículo (se simples) ou de cada uma de suas partes componentes (se composto); já as *letras* contemplam o tipo de engate entre as partes do veículo, quando houver; podem informar também as configurações dos eixos, em auxílio aos números, se necessário. Em linhas gerais, a nomenclatura é uma seqüência de números e letras, geralmente intercalados, indicando as configurações da dianteira para a traseira do veículo: os primeiros números representam os eixos de cada espécie na unidade tratora; depois deles vem uma letra que qualifica o encaixe com a segunda unidade; seguem-na os números que representam os eixos de cada espécie na segunda unidade, e assim por diante.

Entretanto, conhecendo alguns aspectos qualitativos da configuração dos eixos nos veículos, podem-se conseguir algumas simplificações no código da nomenclatura. Por exemplo, os eixos dianteiros, em número menor ou igual aos traseiros, são via de regra isolados e de rodagem simples, tanto em caminhões rígidos como em cavalos mecânicos. Quando os eixos de tipos diferentes, isolados ou em conjuntos, estão separados por distâncias razoavelmente grandes, sintetiza-se o total de eixos de cada tipo através de um único número: o total de eixos da unidade ou veículo monolítico.

Neste caso o número total de eixos é um parâmetro suficiente, pois não há dúvidas sobre a posição de cada um deles. Assim, pode-se reduzir razoavelmente a quantidade de números que caracterizam cada parte do veículo; isso se torna uma vantagem em veículos compostos, evitando confusões.

Porém, quando há eixos diferentes muito próximos entre si, podem surgir algumas dúvidas sobre o posicionamento correto de cada um; nesse caso não há como usar o recurso da simplificação. Para representar toda a seqüência corretamente, é necessário informar o total de eixos de cada espécie, usando-se tantos números quantos forem necessários (um número para cada seqüência), fazendo-se o uso das letras sempre que necessário.

Citam-se duas formas principais de classificar os veículos: a usada pelos órgãos rodoviários, como os DERs e o antigo DNER, e a de caráter técnico.

A nomenclatura dos órgãos rodoviários é expedita: os veículos monolíticos e as ligações tipo reboque (A ou C) são representados pela letra C, enquanto as ligações

semi-reboque são representadas pela letra S. Em ambos os casos, busca-se apenas informar o total de eixos de cada unidade; não há, nesse padrão, preferência em diferenciar seqüências de eixos isolados ou em conjunto.

Não há códigos específicos para ônibus; estes, tanto simples como compostos (articulados e biarticulados), são representados por caminhões de configuração de eixos semelhante. Os cavalos mecânicos sem carretas também têm representação dúbia.

Esta taxonomia não contempla também as diferenças de configuração entre os caminhões ou ônibus monolíticos de quatro eixos. O código 4C pode representar tanto os veículos com um eixo dianteiro simples e três traseiros quanto aqueles com dois eixos dianteiros direcionais e dois traseiros; exemplos desta última configuração são os caminhões-betoneira e os ônibus de dois andares.

Quando se tratar de um veículo monolítico (ônibus ou caminhão), a nomenclatura rodoviária é codificada pelo número de eixos do veículo, seguido da letra C. No caso dos caminhões, não há confusão com os reboques, porque estes necessitam mais números, posteriores à letra, para caracterizar os eixos da carreta.

Para determinar o total de eixos de uma unidade de um veículo composto, somam-se todos os números compreendidos entre duas letras, ou seja, entre duas conexões – exceção se faz à primeira e à última unidade da combinação.

A nomenclatura utilizada atualmente pelo DNIT já contém algumas informações adicionais em relação ao padrão rodoviário geral. As ligações tipo semi-reboque podem ser representadas tanto pela letra I quanto pela letra S. A diferença está na configuração dos eixos da unidade posterior: a letra I representa eixos isolados ou conjuntos isolados de eixos da mesma espécie, e a letra S representa eixos não isolados (em conjunto), em *tandem* ou não.

As mesmas regras valem, em geral, para caminhões e ônibus; entretanto, para garantir unicidade, seus códigos são diferenciados com a incorporação da letra O inicial ao código destes.

Os caminhões e ônibus monolíticos de quatro eixos, com eixo dianteiro duplo e direcional, são caracterizados apropriadamente na base de dados com os códigos 4CD e O4CD, respectivamente; geralmente o eixo traseiro desses caminhões é *tandem* duplo e o dos ônibus, duplo especial.

Avanços à parte, esse padrão ainda não contempla adequadamente várias configurações de eixos e veículos. É necessária, portanto, uma nomenclatura de cunho técnico, que represente de forma coerente praticamente todo o universo de veículos,

evitando ao máximo os nomes imprecisos. Dentre vários sistemas existentes na literatura, apresenta-se neste trabalho uma nomenclatura técnica bastante utilizada no país, vinda de uma tendência que se iniciou em países onde transitam, há décadas, veículos compostos com várias configurações diferentes (WIDMER, 2004). Há várias diferenças em relação ao padrão rodoviário.

Evita-se a necessidade de duas letras para cada padrão de engate em função da configuração dos eixos da unidade posterior: as seqüências de eixos espaçados são representadas pela letra e em auxílio aos números. As ligações do tipo semi-reboque são representadas pela letra S, quando a quinta-roda estiver na unidade tratora, ou pela letra B, quando estiver no prolongamento de uma carreta. As ligações diretas do tipo reboque são representadas pela letra R; o *dolly* é adequadamente representado por duas ligações, uma do tipo reboque (pela letra A, devido ao tipo de engate ainda comum no Brasil) e outra do tipo semi-reboque (pela letra S) (WIDMER, 2004).

Os caminhões rígidos são representados pela letra U ao invés de C. No caso de caminhões reboque, permanece a letra U do caminhão rígido, anterior à letra A ou R.

Os ônibus monolíticos são representados apenas pelos números que definem os seus eixos e a letra O final. Quando há eixo dianteiro duplo, representa-se o caminhão ou ônibus por dois números (o total de eixos dianteiros, 2, e o total de eixos traseiros). Cria-se o conceito de Combinação de Veículos de Passageiros (CVP), de forma análoga à CVC (Combinação de Veículos de Carga; ver Anexo B), de forma a contemplar os ônibus compostos (articulados e biarticulados). As articulações das CVP são equivalentes às conexões semi-reboque (tipo B) das CVC, sendo por isso representadas pelas letras S ou B (tal qual nos caminhões), mantendo-se, entretanto, a letra O da primeira unidade, pois ela é um veículo rígido.

Percebe-se que a nomenclatura rodoviária não tem rigor técnico; destina-se a cobrir apenas os casos mais freqüentes de veículos pesados (ônibus e caminhões). Inúmeras configurações têm representação inexistente (como ônibus compostos e reboques com eixos isolados), ambígua (como cavalos mecânicos sem carreta) ou mesmo impossível. Entretanto, ela é eficiente para caracterizar a maioria dos veículos componentes do tráfego brasileiro.

Alguns exemplos de configurações de veículos e suas nomenclaturas pelos padrões do DNIT e técnico são mostrados na Figura II.5.

O padrão técnico ainda não resolve o problema da representação de seqüências de eixos em *tandem*, tanto as próximas quanto as espaçadas (como as carretas “carrega-

tudo” de quatro eixos); o DNIT, em alguns casos esporádicos da base de dados utilizada neste trabalho, representou os semi-reboques com essas configurações pelos códigos 3S22 (carreta com duas seqüências não-espaçadas de eixos *tandem* duplo, formando um conjunto com quatro eixos) e 3I22 (carreta com duas seqüências espaçadas de eixos *tandem* duplo, formando dois conjuntos separados). Nesse caso a letra I representa os conjuntos isolados de eixos da mesma espécie.

Mesmo com as vantagens oferecidas pelo sistema técnico, preferiu-se manter, ao longo deste trabalho, a nomenclatura adotada na base de dados do DNIT, que discrimina as classes de veículos como indicado na Tabela II.1.

Comparando este padrão de nomenclatura com outros como, por exemplo, aquele utilizado pelo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), verifica-se que a classe de veículos *Outros* engloba motocicletas, quadriciclos, *side-cars*, tratores de esteiras, tratores de rodas, ônibus com eixo traseiro triplo, veículos que transportam unidades rebocadas com mais de três eixos e até mesmo veículos para transporte de cargas indivisíveis, entre outros. Essa heterogeneidade de formas, dimensões e cargas é razão suficiente para não se poder concluir algo significativo a respeito dessa categoria.

Anexo B As CVC e a durabilidade dos pavimentos

B.1 Descrição das CVC

Iniciou-se no Brasil, na década de 1980, uma grande pressão para a liberação do tráfego dos veículos de maior porte. Ela surgiu a partir dos segmentos de transporte de cargas a granel líquido e sólido, que poderiam reduzir significativamente seus custos de transporte, que agregam uma importante parcela nos custos de produção e distribuição, devido ao baixo valor dos produtos transportados por tonelada. Gostariam de seguir os exemplos de países como Estados Unidos, Canadá e Austrália, onde ocorreu anteriormente um aumento significativo no tráfego de veículos de maior comprimento e maior PBTC; porém, nesses locais a pressão veio do segmento de transporte de cargas fracionadas; buscavam-se veículos de maior capacidade (WIDMER, 2002).

Alheia a esse fato e continuamente aos outros períodos, a situação das rodovias brasileiras continuou precária, por falta de manutenção adequada. Como uma forma de contornar essas adversidades, os órgãos competentes autorizaram o tráfego de veículos mais pesados e compridos, com maior número de eixos e maior capacidade de carga, porém sujeitos aos mesmos limites de pesos por eixo estabelecidos para os caminhões comuns (www.ntcelogistica.org.br), garantindo assim sobrevida aos pavimentos por dois motivos:

- a redução da frota circulante, que conta hoje com cerca de 2 milhões de caminhões (www.transportes.gov.br) e dos conseqüentes danos aos pavimentos, número de acidentes e emissão de poluentes;
- esses veículos são via de regra menos agressivos aos pavimentos do que os veículos mais antigos, como será visto na Seção B.2.

Os primeiros implementos rodoviários para atender a essa expectativa começaram a ser fabricados no Brasil em 1984; entretanto, a abertura efetiva do mercado ocorreu somente na década de 1990. Em pouco tempo provocou uma mudança considerável no perfil dos veículos de carga em circulação no Brasil. Os avanços da Lei da Balança resultaram na liberação das CVC e outros veículos ao tráfego; foi o primeiro passo para o uso intensivo desses veículos no transporte rodoviário, que conta hoje com caminhões modernos, cada vez mais velozes e de maior capacidade, elevado desempenho de tração, frenagem, controle e estabilidade, especialmente nas regiões

onde seu trânsito é compatível com as condições geométricas e de infra-estrutura disponíveis.

Algumas configurações comuns no Brasil recebem nomes especiais.

Um veículo com ligações somente do tipo reboque é em geral conhecido como *Romeu e Julieta* (ver exemplos na Figura II.3).

Os *treminhões* são veículos compostos com duas ligações do tipo reboque, usando o *dolly* aparafusado na unidade dianteira da segunda carreta, da qual ele passa a fazer parte. Os *treminhões* são usados de forma restrita, geralmente no transporte de cana (Figura B.1).



Figura B.1 Treminhões (www.mercedes-benz.com.br, www.dnit.gov.br)

O *tetraminhão* e o *pentaminhão* assemelham-se ao *treminhão*, tratando-se do mesmo tipo de combinação (com ligações somente do tipo reboque), porém com outros reboques agregados. São usados essencialmente para o transporte da cana-de-açúcar; como não são previstos pela Lei da Balança, trafegam apenas em estradas vicinais, entre as plantações e as usinas.

Um *bitrem* é caracterizado pela combinação de um cavalo mecânico com duas carretas. As ligações entre as unidades são feitas por pino-rei e quinta roda, sendo a segunda delas montada no prolongamento traseiro do primeiro semi-reboque. Seu nome é uma adaptação do idioma inglês, que denomina esse veículo como *B-train*, por ter dois engates tipo B. A Figura B.2 mostra um bitrem cerealeiro.

O bitrem foi desenvolvido inicialmente na versão graneleiro, passando a atuar em vários outros segmentos devido à vantagem de maior carga líquida transportada. Suas vendas se concentram principalmente nos semi-reboques graneleiros e de carga seca, devido ao perfil do transporte nacional.



Figura B.2 Bitrem (www.goydo.com.br)

Quanto à rentabilidade, em média seu custo é superior em 15%, compensado porque transporta 40% mais de carga, reduzindo o custo da tonelada transportada. Além disso, consome 34% menos combustível e 40% menos pneus, além de permitir manobras mais fáceis em trechos urbanos (www.guiadotrc.com.br).

O bitrem de 7 eixos é amplamente utilizado em nosso país, tomando longo dos últimos anos o espaço dos semi-reboques convencionais, com apenas uma carreta; já preenche mais de 70% da produção nacional de implementos rodoviários.

A introdução de tritrens e rodotrens visa atender demandas específicas de transporte rodoviário em regiões afastadas, a fim de reduzir o custo de transporte de cargas agrícolas ou minérios em locais com baixo volume de tráfego.

O *tritrem* é derivado do bitrem, sendo caracterizado pela combinação de um cavalo mecânico com três carretas (um bitrem com mais uma carreta), num total de nove eixos; há somente ligações tipo semi-reboque. Devido às suas características especiais, os tritrens são empregados de forma eficaz em situações restritas como o transporte florestal e canavieiro. A Figura B.3 mostra um tritrem em serviço.

Um *rodotrem* é a combinação de um cavalo mecânico com duas carretas, sendo a primeira ligação do tipo semi-reboque e a segunda do tipo reboque (com *dolly*), num total de nove eixos. Seu nome também é uma adaptação do idioma inglês, que denomina alguns veículos e grande porte como *roadtrains*.

Ao contrário do tritrem, o rodotrem acabou sendo largamente usado no transporte rodoviário brasileiro, mas ainda assim em menor número que os bitrens, mesmo tendo capacidade de carga igual à do tritrem e do bitrem de nove eixos. A Figura B.4 mostra um rodotrem para transporte de combustível. O rodotrem tem mais eixos que o bitrem devido aos eixos do seu *dolly*.



Figura B.3 Tritrem (SILVEIRA, G. L. *et al.*, 2004)



Figura B.4 Rodotrem (www.hunkstruckpictures.com)

Apesar de possuírem condições de estabilidade e controle inferiores aos bitrens, os rodotrens, bastante difundidos no setor de transporte de cana e de madeira, possuem algumas aplicações específicas onde o bitrem tem dificuldades de manobra e de desengate das unidades rebocadas.

O uso das CVC garante maior produtividade, melhor condição de estabilidade, menor diferença entre condições de frenagem com os veículos carregados e vazios, maior número de eixos em *tandem* (que implicam em menor destruição ao pavimento), menor investimento e menores custos (combustível, motoristas e manutenção) por tonelada transportada, especialmente em regiões de topografia favorável ao seu tráfego.

A maior desvantagem inerente ao uso das CVC é a *amplificação traseira*, o deslocamento lateral da última unidade da composição, possível de ocorrer quando se realizam manobras rápidas; pode haver até o tombamento. Há também o problema da distância de visibilidade em interseções de nível, o qual, entretanto, já é bastante crítico para as composições comuns na malha viária nacional (WIDMER, 2002).

A força de frenagem geralmente é avaliada como uma fração do peso do veículo de referência (MASON, 1977, PFEIL, 1985). Portanto, a força de frenagem produzida pelas CVC tende a ser maior que a produzida pelos veículos menores (EL DEBS *et al.*, 2002).

As CVC unidas por conexões tipo B, como os bitrens, têm melhor condição de estabilidade e controle e, portanto, são mais seguras do que aquelas com conexão do tipo A ou C, como rodotrens e treminhões. As ligações criam no bitrem uma combinação com dois pontos de articulação, ao invés de três, criando significativas forças de combate ao tombamento entre os dois semi-reboques. O aumento do número de articulações reduz a estabilidade da composição.

Além disso, os bitrens apresentam contraventamento e eficiência de frenagem melhor do que os rodotrens e treminhões.

Há uma tendência de incentivar a união das unidades rebocadas por engate tipo B e unidades tratoras com distâncias entre eixos maiores (que resultam em maior estabilidade longitudinal), bem como ao desestímulo à fabricação do *dolly* com conexão tipo A, o que alteraria bastante o perfil dos caminhões canavieiros e florestais.

As configurações 2S1S1, 2S2S1, 3S1S1 e 3S2S1, possíveis a partir do levantamento de alguns dos eixos de um bitrem 3S2S2, tendem a ser legalmente possíveis para o transporte de carga fracionada de menor peso específico.

B.2 Legislação

Antes da Resolução nº 12 do CONTRAN, estipulava-se que nenhum veículo, simples ou composto, poderia ter PBT ou PBTC maior que 450kN. Isso significava que os veículos cujas somas dos pesos máximos por eixo excediam esse limite tinham essa imposição de carga máxima, no sentido de preservar as obras de arte e os pavimentos das rodovias.

A Resolução nº 68 do CONTRAN (23/09/1998) permitiu que certos veículos compostos, chamados à época de *Combinações de Veículos de Carga (CVC)*, circulassem com Peso Bruto Total Combinado superior a 450kN. Essas CVC tinham o PBTC calculado da forma comum, através da soma dos pesos máximos permitidos por eixo. As CVC eram os veículos compostos de códigos 3C3, 3C4, 3C2C2 (treminhão), 3S2S2 (bitrem de 7 eixos), 3S2S2S2 (tritrem) e 3S2C4 (rodotrem). Mesmo legais, esses veículos necessitavam a Autorização Especial de Trânsito (AET), fornecida pelos órgãos competentes, para circular nas rodovias. Todos os outros veículos compostos tinham PBTC limitado em 450kN.

A Resolução nº 76 do CONTRAN (19/11/1998) autorizou, provisoriamente, o uso de cavalo mecânico de 3 eixos e tração simples para tracionar bitrens de 7 eixos;

posteriormente, a Resolução nº 102 do CONTRAN (31/08/1999) permitiu maior tolerância aos pesos por eixo, com excesso máximo autorizado de 7,5%, ao passo que a tolerância máxima ao PBT ou PBTC continua em 5%, segundo a Resolução nº 104 do CONTRAN (21/12/1999). A exigência de AET dos bitrens de 7 eixos com comprimento total entre 17,50m e 19,80m foi eliminada pela Resolução nº 164 do CONTRAN (10/09/2004).

Com a Resolução nº 184 do CONTRAN (21/10/2005), ocorreram significativas mudanças no cenário geral da Lei da Balança, como a revogação da Resolução nº 76 e a elevação do PBTC dos veículos de códigos 2I3, 3S3, 3I12 e 3I3 para 460kN, 485kN, 500kN e 530kN, respectivamente (essas classes têm agora o PBTC calculado a partir da soma dos pesos máximos por eixo), desde que com comprimento total mínimo de 17,50m. O novo limite de peso da classe 3I3 se aproxima bastante do PBTC dos bitrens de 7 eixos (570kN), com a vantagem adicional de não ser necessária uma segunda carreta. O aumento do PBTC da classe 3S3 permite aos autônomos ganho de produtividade e maior flexibilidade no uso de seus cavalos mecânicos, quando acoplados a carretas de terceiros.

Tanto nas classes 2I3, 3S3, 3I12 e 3I3 com menos de 17,50m de comprimento, quanto nos reboques, não houve alterações nos limites de PBTC: permanece o peso máximo de 450kN. A fixação de um comprimento mínimo tenta evitar a concentração excessiva das cargas nas pontes. Apesar de ser uma iniciativa coerente no sentido de preservar as obras de arte especiais, a medida é difícil se ser realizada (e fiscalizada) na prática, uma vez que o PBTC das classes 2I3, 3S3, 3I12 e 3I3 passa a variar com o seu comprimento (www.ntcelogistica.org.br).

Ainda em 2005 revogou-se o Anexo I da Resolução nº 68 do CONTRAN, que definia as CVC - agora entende-se como CVC qualquer veículo composto. Porém, por simplificação, esta abreviatura foi usada neste trabalho para designar apenas os veículos compostos com duas ou mais unidades rebocadas. Como o Anexo I não considerava a presença de eixos *tandem* triplo, abriram-se assim possibilidades para novas configurações, como o almejado bitrem de 9 eixos. Oficialmente, entretanto, essa CVC é considerada ainda uma nova configuração. Os novos veículos compostos terão circulação permitida após comprovação de desempenho. Sua utilização legal ainda depende de homologação pelo DENATRAN, de acordo com a Resolução nº 184.

Definiu-se também que as CVC com PBTC entre 570kN e 740kN, com 8 ou 9 eixos, têm agora comprimento limitado entre 25m e 30m. O comprimento máximo garante operacionalização aceitável em todos os trechos das estradas.

A Resolução nº 189 do CONTRAN (25/01/2006) autorizou a circulação de rodotrens com comprimento entre 20m e 25m. Atualmente o bitrem de 7 eixos é considerado um veículo comum, enquanto que os de 8 eixos já foram tema de várias discussões no setor dos transportes (www.ntcelogistica.org.br).

Os limites de PBT/PBTC das classes de veículos constantes na base de dados do DNIT são apresentados na Tabela II.2.

B.3 Impacto nos pavimentos

Não há relação direta entre o PBT ou PBTC e a deterioração dos pavimentos. Veículos mais pesados podem causar danos menores aos pavimentos, desde que a carga total seja distribuída em um número razoável de eixos. A carga de cada unidade é distribuída por seus eixos e transmitida ao pavimento por meio dos pneus; é como se o veículo fosse um comboio de eixos independentes.

Portanto, a *carga por eixo* é a variável mais significativa no dano ao pavimento, no custo inicial e na vida útil de uma rodovia, mesmo que por vezes não seja a única fonte relevante de deterioração. Outras características que influem na vida útil do pavimento são as configurações dos eixos dos veículos, seus sistemas de suspensão, tipo e pressão dos pneus, maior ou menor uniformidade das cargas individuais dos eixos agrupados etc.

Em pavimentos subdimensionados ou em mau estado, como geralmente ocorre nas rodovias brasileiras, essas variáveis tornam-se ainda mais importantes, pois as irregularidades do piso aumentam o impacto dinâmico dessas cargas.

Nos testes empíricos realizados pela antiga AASHO (AASHO Road Test) na década de 1950, ensaiou-se um eixo padrão com 4 pneumáticos e 18.000 libras (80kN), verificando-se que o desgaste do pavimento aumenta exponencialmente com a carga por eixo. Este expoente varia entre 3 e 6, de acordo com o tipo e a estrutura do pavimento. Para efeitos didáticos, se aceita um expoente igual a 4 – a destruição é, então, função da quarta potência da carga no eixo: um aumento de carga por eixo de 20% mais aumenta o dano em mais de 50%. Tamanha sensibilidade à carga axial, devido ao grande expoente, é razão suficiente tanto para se proibir quaisquer aumentos nos limites de carga

estipulados atualmente, pela Resolução nº 12 do CONTRAN (06/02/1998), como para considerar nos cálculos de dimensionamento apenas ônibus e caminhões na corrente de tráfego, negligenciando os veículos mais leves.

Os métodos de dimensionamento de pavimentos contemplam esses modelos exponenciais, representando os efeitos de deterioração devidos às cargas repetidas de eixos ou conjuntos de eixos por meio dos *fatores de equivalência de cargas* (FEC) relacionados ao eixo padrão de 80kN; são colocados genericamente na forma $(P/P_0)^b$, onde P é a carga considerada. A constante P_0 (uma carga de referência) assume um valor para cada configuração do eixo, tal qual o expoente b , se tratado realisticamente. No método da AASHTO, o valor da carga P_0 é próximo à carga limite de cada tipo de eixo e o expoente b geralmente é um pouco maior que 4. O método de dimensionamento do USACE conduz a resultados bem diferentes, desfavoráveis aos eixos em *tandem* (AKISHINO, 2004); porém, a fórmula da atual AASHTO é aceita internacionalmente. Além da carga por eixo, o *fator de destruição do eixo*, modernamente, leva em conta também a configuração dos eixos, dos pneus e da suspensão para se determinar o potencial destrutivo de um eixo ou grupo de eixos; as variações regionais podem traduzir-se valores diferentes dos FEC, conforme as condições dominantes do tráfego pesado em cada região.

A Tabela B.1 mostra os fatores de equivalência de carga relativos ao eixo padrão de 80kN, calibrados para o caso brasileiro (PEREIRA, 1992), segundo o método da AASHTO, quando os eixos estão carregados com seus limites de peso definidos pela Resolução nº 12 do CONTRAN.

Tabela B.1 Fatores de equivalência de cargas no Brasil

Tipo de eixo	Fator de equivalência
Simplex de rodas simples (SRS) com 60kN	0,18
Simplex de rodas duplas (SRD) com 100kN	2,35
Tandem duplo (TD) com 170kN	1,64
Tandem triplo (TT) com 255kN	1,97

Esses valores revelam que, no padrão atual do Brasil, os eixos *tandem* duplo geram, individualmente, para uma mesma condição de rodagem e suspensão, aproximadamente 41% do dano por tráfego de eixos isolados (SRD). No caso do *tandem* triplo, o valor corresponde a cerca de 33%.

De acordo com esse conceito, pode-se estabelecer um fator de deterioração para cada caminhão ou CVC, somando os fatores de deterioração em cada eixo.

A Figura B.5 relaciona, para cada classe de caminhão, os fatores de equivalência de carga *por tonelada de carga*, através da aplicação dos fatores de equivalência às classes de veículos padronizadas. Supõe-se que todas as classes de caminhões estejam com os eixos carregados até os seus limites legais previstos, sem considerar tolerância. As CVC foram destacadas e representadas pelos seguintes códigos:

- Treminhão: TRE-07;
- Rodotrem: ROD-09;
- Tritrem: TRI-09;
- Bitrem de 7 eixos: BIT-07;
- Bitrem de 8 eixos: BIT-08;
- Bitrem de 9 eixos: BIT-09.

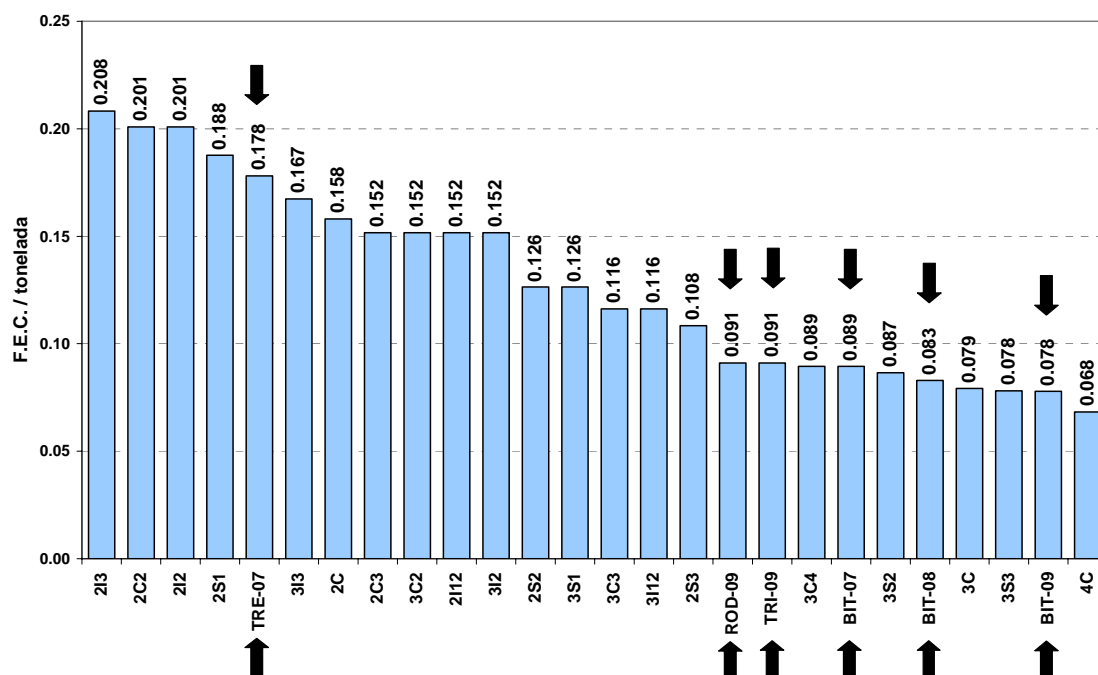


Figura B.5 Fatores de equivalência dos caminhões por tonelada (com PBT/PBTC)

Nota-se, por exemplo, que um veículo 2S3 com PBTC de 415kN tem fator de equivalência de 0,0108 por tonelada, ao passo que um bitrem de 7 eixos com PBTC de 570kN tem 0,0089 por tonelada: uma redução de 17%. Isso significa que, no caso do carregamento máximo permitido, cada tonelada de um bitrem causa um dano ao pavimento 17% menor do que um semi-reboque 2S3. Essa redução no dano é ainda

maior para cargas menores. O veículo 3S3 com PBTC de $485kN$ é mais favorável que a composição 2S3 com PBTC de $415kN$, que hoje constitui a configuração dominante na categoria de caminhões pesados.

As hidrovias e ferrovias existentes no país ainda não são capazes de escoar a produção agrícola e industrial; enquanto essa realidade não mudar, o uso de grandes composições, em especial o bitrem, será de fundamental importância para minimizar as desvantagens logísticas (www.guiadotrc.com.br). Para tal, é necessário adequar a malha rodoviária, que em vários locais ainda não é compatível com o tráfego desses novos veículos sem prejuízo ao nível de segurança dos demais usuários das vias.

Anexo C Análise de alguns dados disponibilizados pela base do DNIT

C.1 Introdução

No Anexo C são mostrados os diagramas de peso e velocidade obtidos da base de dados do DNIT, para se efetuar a comparação entre os valores considerados no posto representativo (P51) e aqueles tomados quando se considera toda a massa de dados. Em geral, as distribuições e os valores representativos do posto P51 são bastante semelhantes aos do padrão geral; essas semelhanças também ocorreram no posto P57, porém este posto acabou não sendo considerado nesta análise por colher dados de uma rodovia pouco representativa da malha viária nacional. Limitou-se a análise às planilhas da base de dados que estejam de alguma forma relacionada com os objetivos deste trabalho.

C.2 Peso por tipo de eixo

As Figuras C.1 mostram os histogramas de peso dos eixos simples de rodas simples, simples de rodas duplas, *tandem* duplo e *tandem* triplo, para o posto P51, obtidos das planilhas *Frequência de Peso por Tipo de Eixo* da base de dados do DNIT. As cargas máximas legais de cada configuração também são apresentadas.

Comparando as Figuras C.1 com as Figuras II.10 (que consideram todos os Postos de Monitoramento), verificam-se os aspectos similares entre as distribuições de peso por eixo de P51 e o padrão geral; da mesma forma que quando considerados todos os dados, há uma porcentagem considerável de veículos que trafegam com peso por eixo maior do que o limite imposto pela Lei da Balança.

A Figura C.2 compara os pesos médios por eixo do posto P51 com o padrão global. Também se vê bom nível de concordância entre os dados.

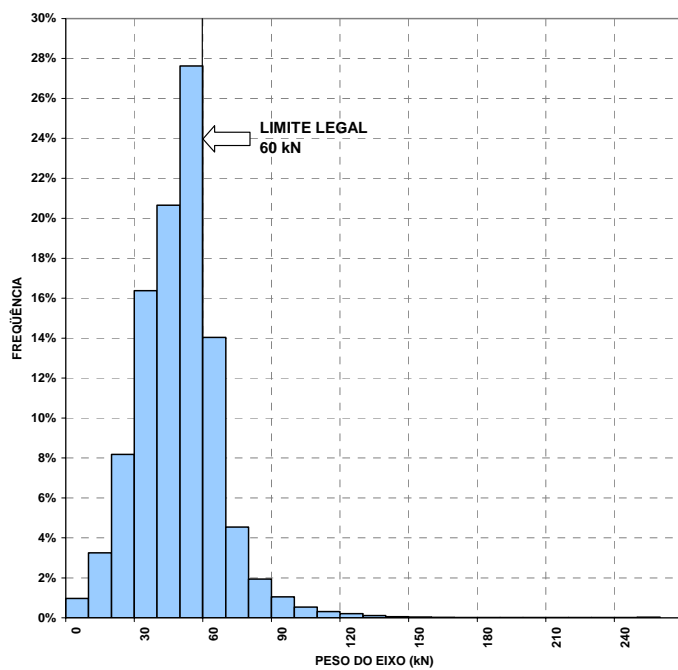


Figura C.1a Distribuição do peso por eixo simples de rodas simples em P51 ($\bar{X} = 47,7kN$; $s = 23,4kN$)

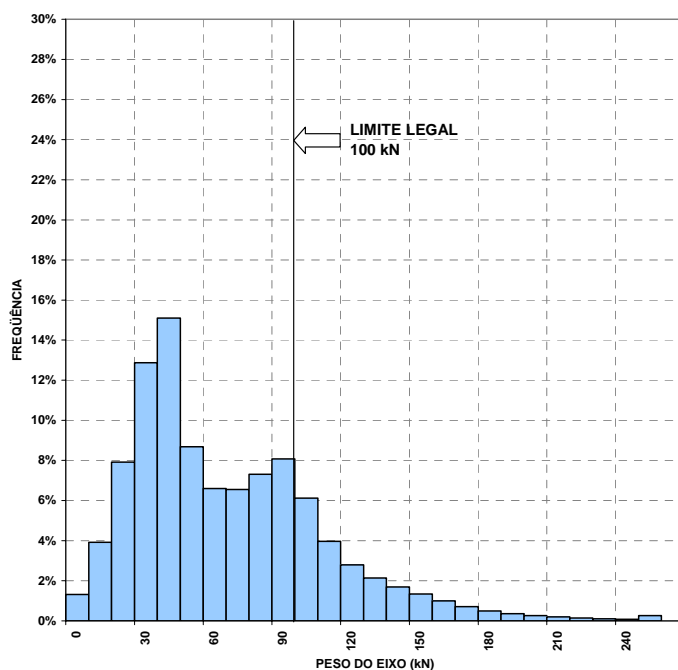


Figura C.1b Distribuição do peso por eixo simples de rodas duplas em P51 ($\bar{X} = 64,7kN$; $s = 39,8kN$)

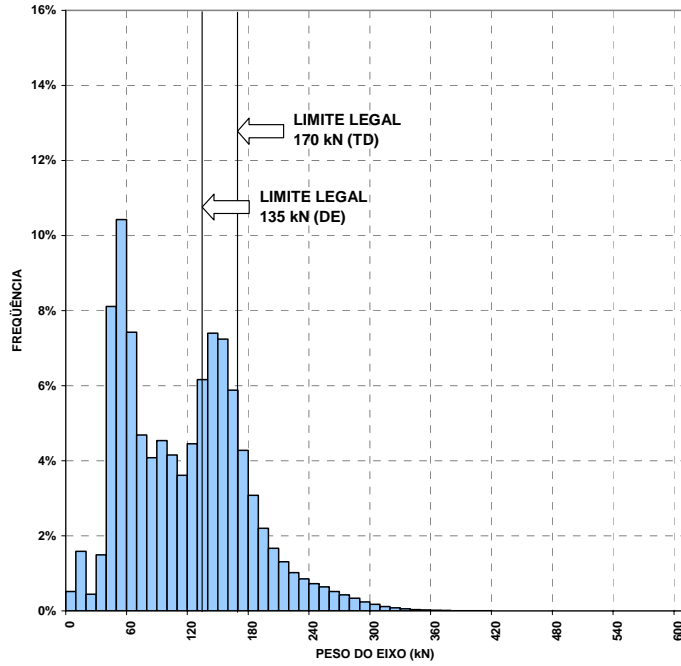


Figura C.1c Distribuição do peso por eixo *tandem* duplo em P51 ($\bar{X} = 109kN$; $s = 55,0kN$)

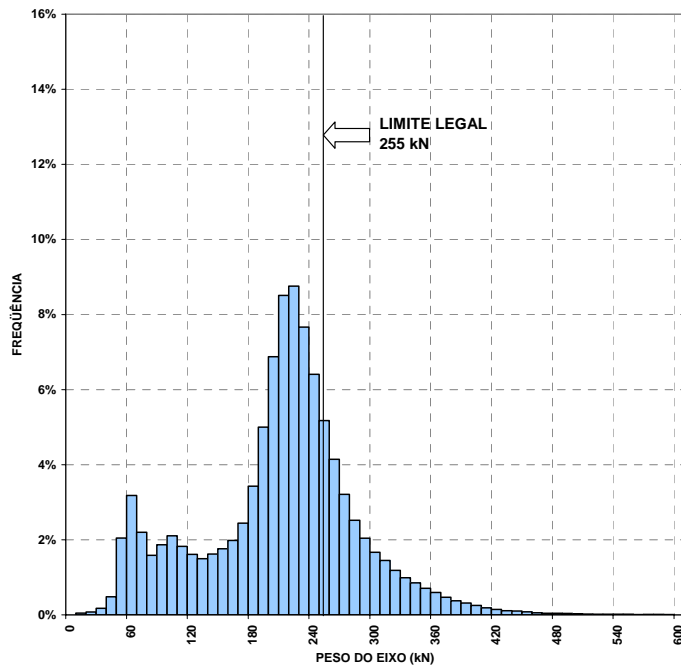


Figura C.1d Distribuição do peso por eixo *tandem* triplo em P51 ($\bar{X} = 207kN$; $s = 78,4kN$)

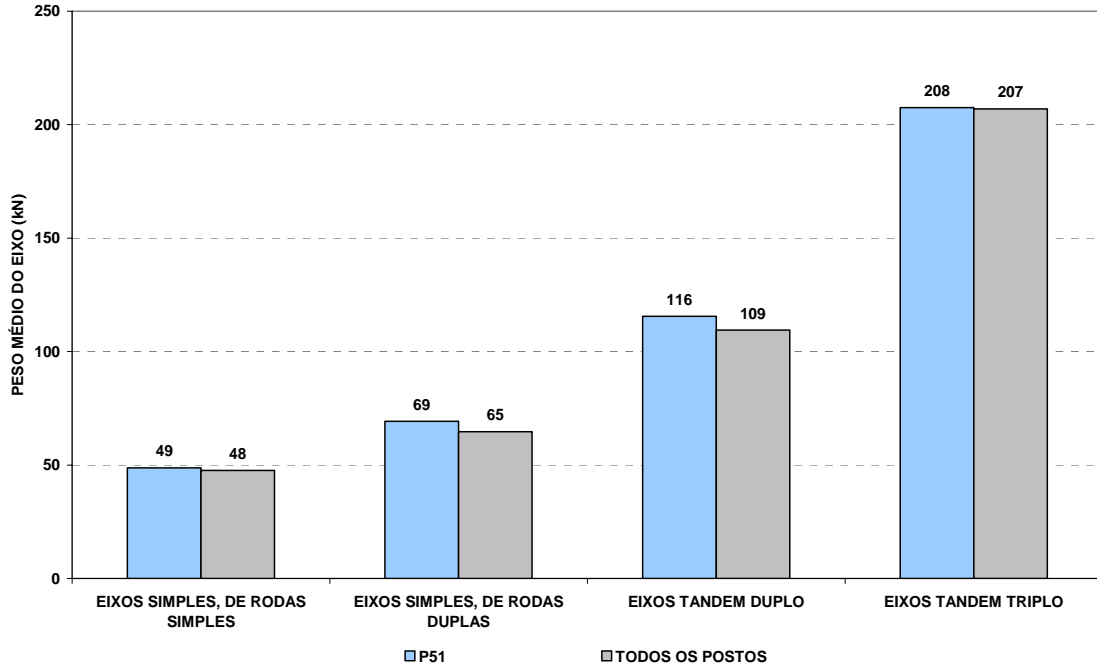


Figura C.2 Comparação entre os pesos médios dos eixos no posto P51 e em todos os postos

C.3 Pesos das classes de veículos consideradas neste trabalho

As planilhas de *Distribuição dos veículos comerciais por faixa de peso* relacionam, para cada classe de veículo, vários intervalos de peso e as frequências de cada tipo de veículo nos intervalos. As Figuras C.3 mostram esses histogramas de peso nas seis classes de veículos consideradas neste trabalho: O2C, O3C, 2C, 3C, 2S2 e 2S3.

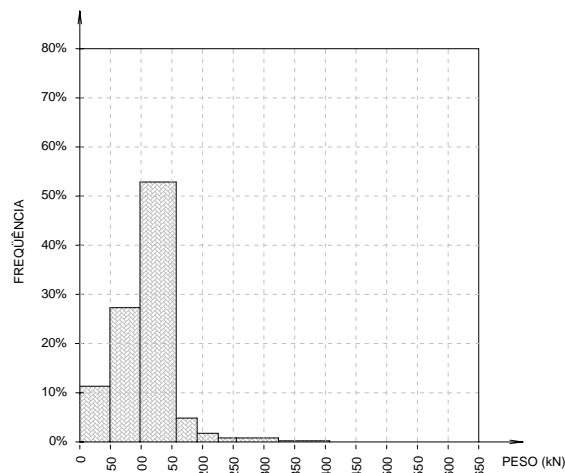


Figura C.3a Histograma de peso da classe O2C ($\bar{X} = 108kN$; $s = 71,4kN$)

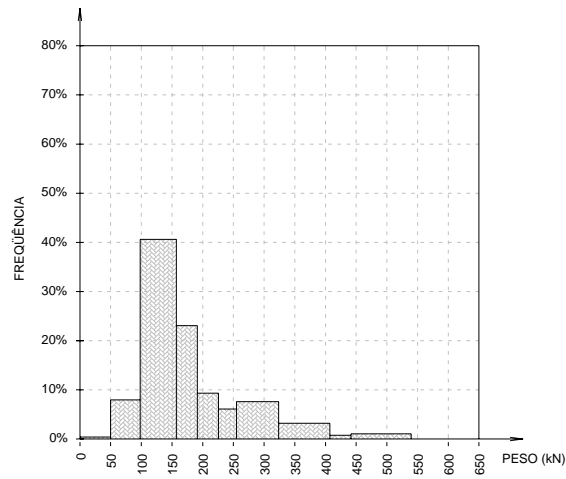


Figura C.3b Histograma de peso da classe O3C ($\bar{X} = 174kN$; $s = 139kN$)

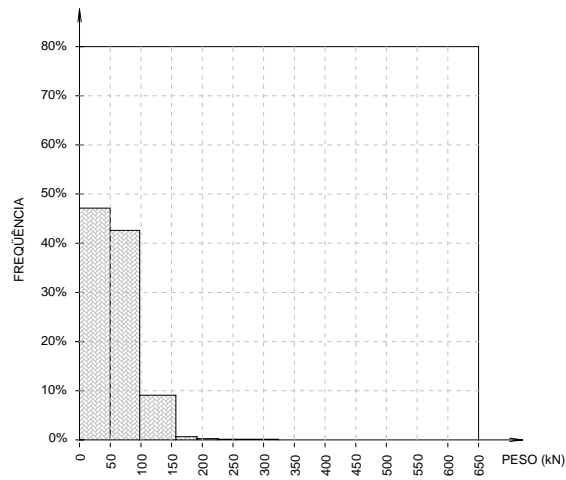


Figura C.3c Histograma de peso da classe 2C ($\bar{X} = 56,9kN$; $s = 38,4kN$)

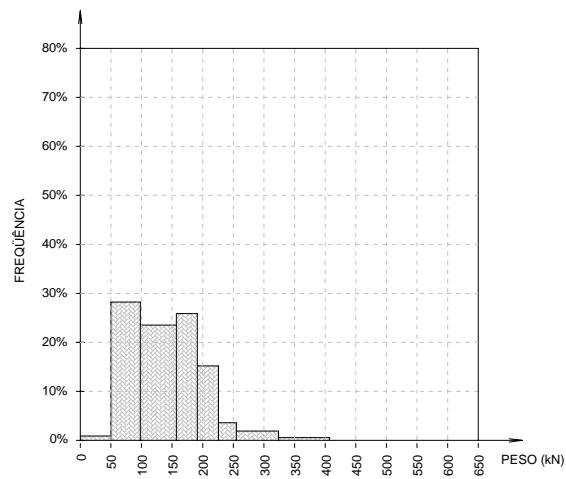


Figura C.3d Histograma de peso da classe 3C ($\bar{X} = 145kN$; $s = 116kN$)

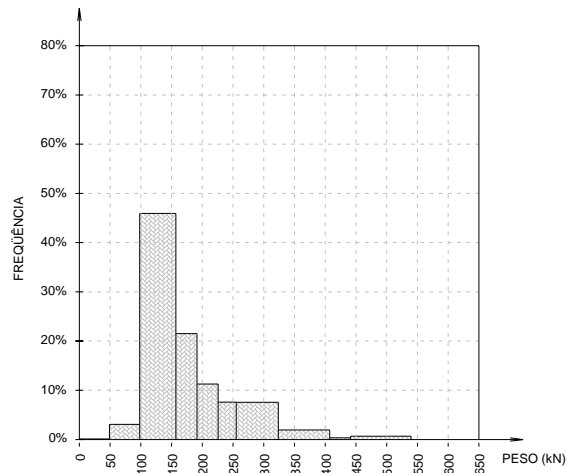


Figura C.3e Histograma de peso da classe 2S2 ($\bar{X} = 174kN$; $s = 134kN$)

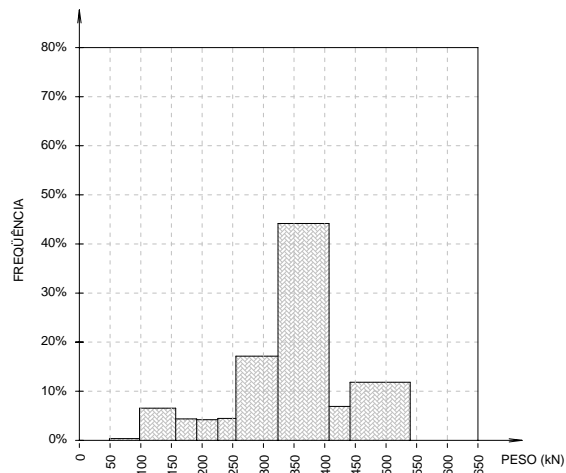


Figura C.3f Histograma de peso da classe 2S3 ($\bar{X} = 334kN$; $s = 252kN$)

Os histogramas de peso destas seis classes as classes de veículos para o posto P51 são mostrados nas Figuras C.4.

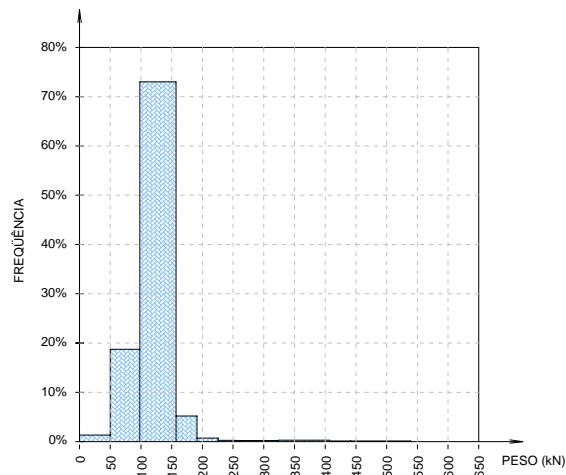


Figura C.4a Histograma de peso da classe O2C em P51 ($\bar{X} = 121kN$; $s = 61,9kN$)

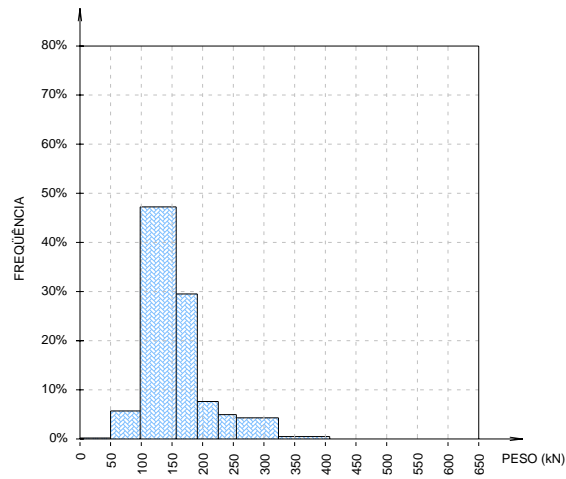


Figura C.4b Histograma de peso da classe O3C em P51 ($\bar{X} = 158kN$; $s = 114kN$)

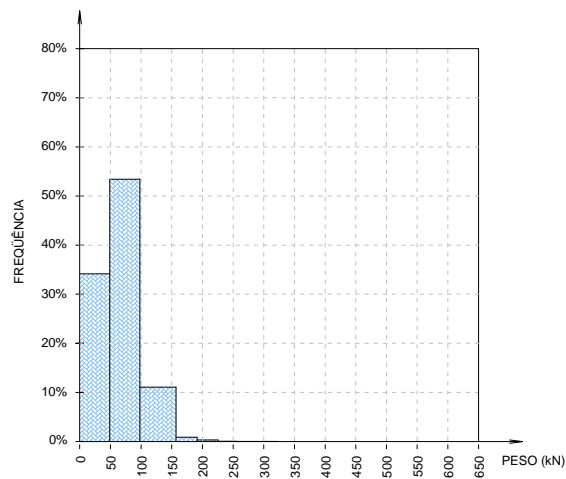


Figura C.4c Histograma de peso da classe 2C em P51 ($\bar{X} = 64,4kN$; $s = 41,7kN$)

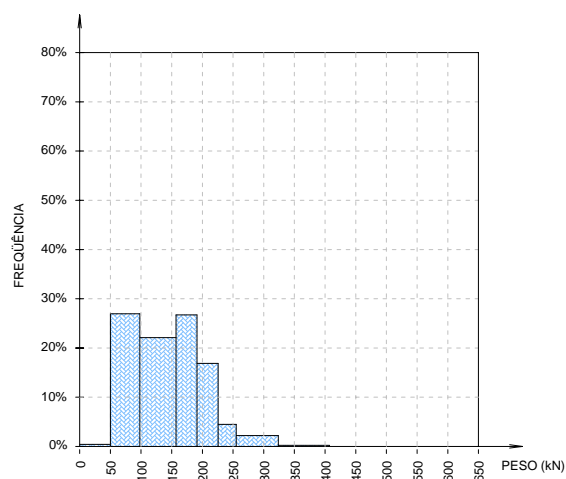


Figura C.4d Histograma de peso da classe 3C em P51 ($\bar{X} = 148kN$; $s = 118kN$)

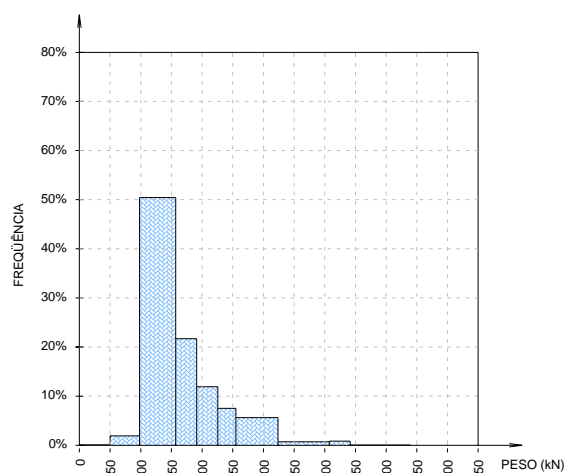


Figura C.4e Histograma de peso da classe 2S2 em P51 ($\bar{X} = 166kN$; $s = 122kN$)

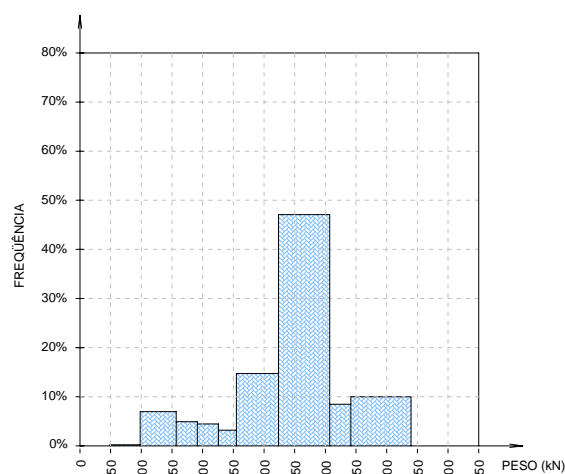


Figura C.4f Histograma de peso da classe 2S3 em P51 ($\bar{X} = 334kN$; $s = 248kN$)

Comparando as Figuras C.3 e C.4, nota-se que os veículos medidos em P51 apresentam distribuições de peso bastante próximas do conjunto global.

C.4 Velocidades

As planilhas de *Distribuição dos veículos por faixa de velocidade* possibilitam a confecção dos histogramas mostrados nas Figuras C.5 e C.6, que mostram as distribuições de velocidade para cada classe simples. Esses histogramas têm o último intervalo aberto, pois a última classe disponível de cada distribuição contempla as velocidades maiores que $150km/h$. Como a base de dados não fez detalhamento algum deste último intervalo aberto, preferiu-se omitir as estatísticas destas distribuições.

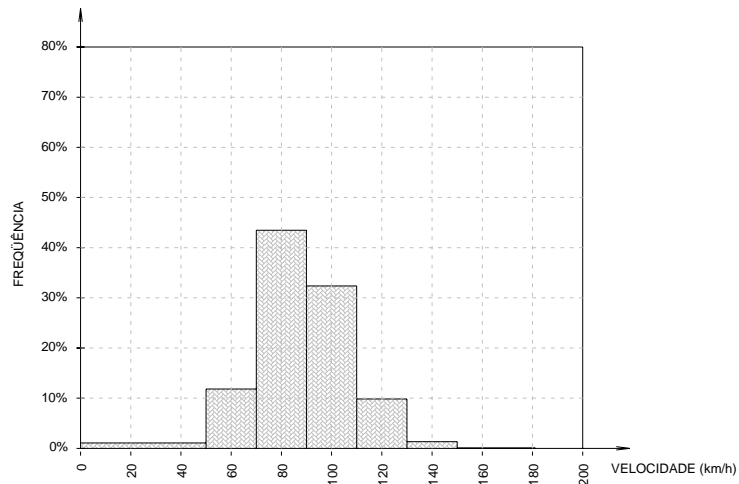


Figura C.5a Distribuição de velocidades: veículos leves

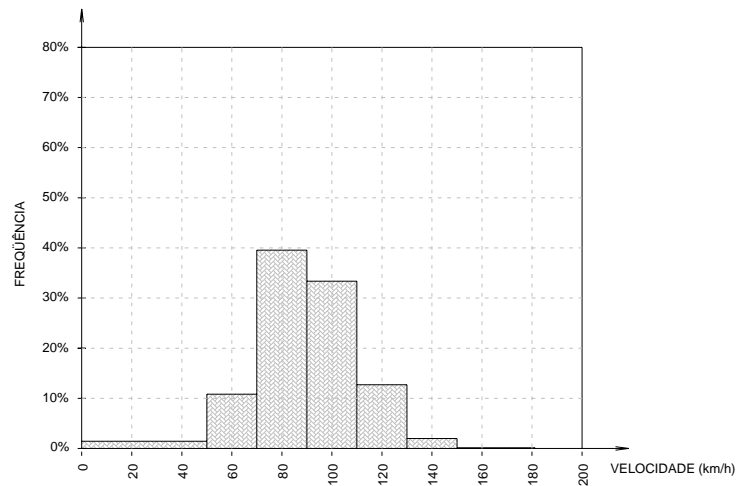


Figura C.5b Distribuição de velocidades: utilitários

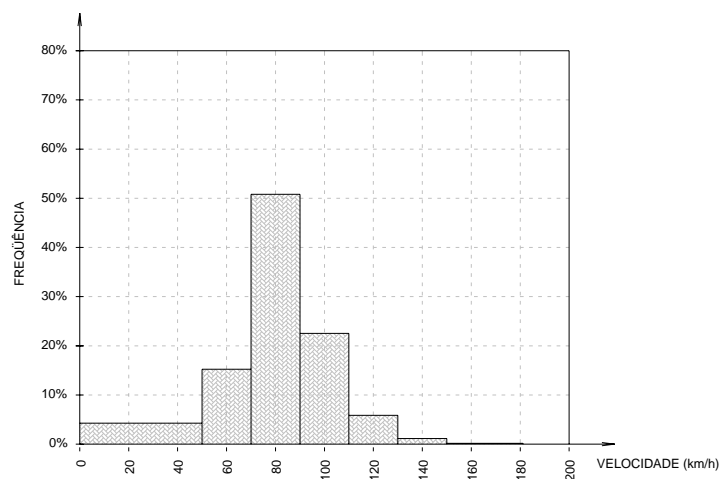


Figura C.5c Distribuição de velocidades: ônibus

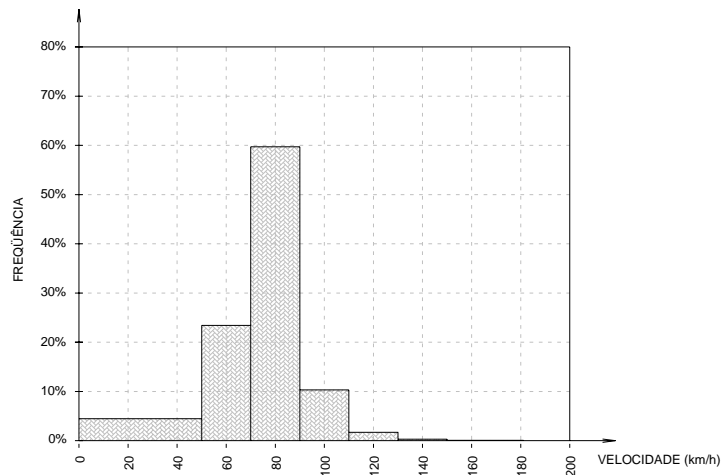


Figura C.5d Distribuição de velocidades: caminhões monolíticos e reboques

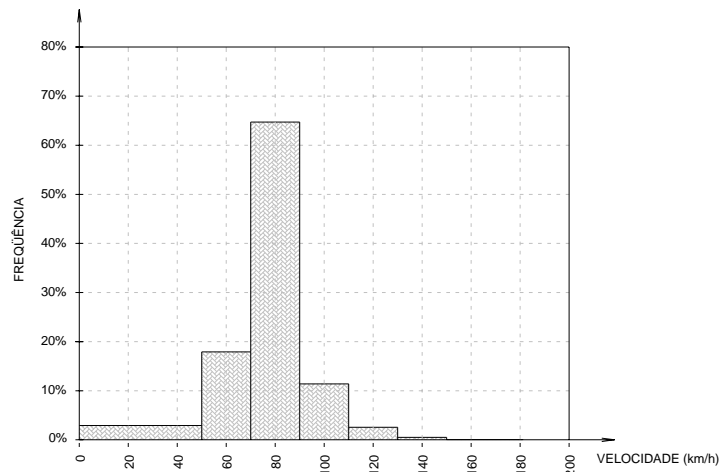


Figura C.5e Distribuição de velocidades: semi-reboques

As Figuras C.6 mostram os histogramas de velocidade de cada classe simples de veículos no posto P51.

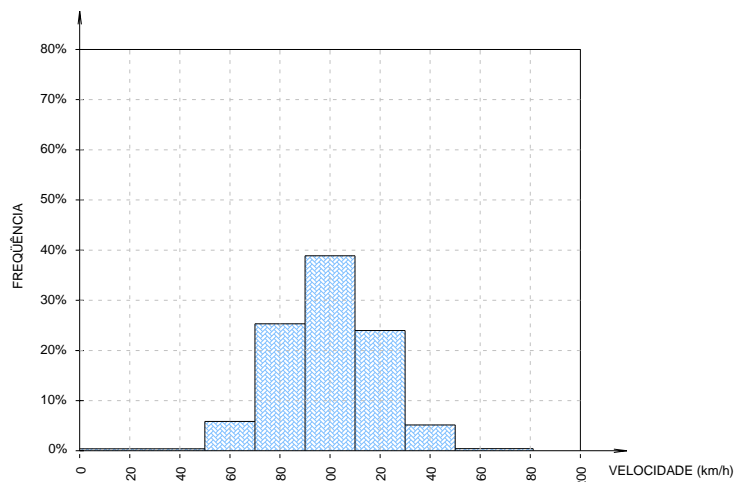


Figura C.6a Distribuição de velocidades em P51: veículos leves

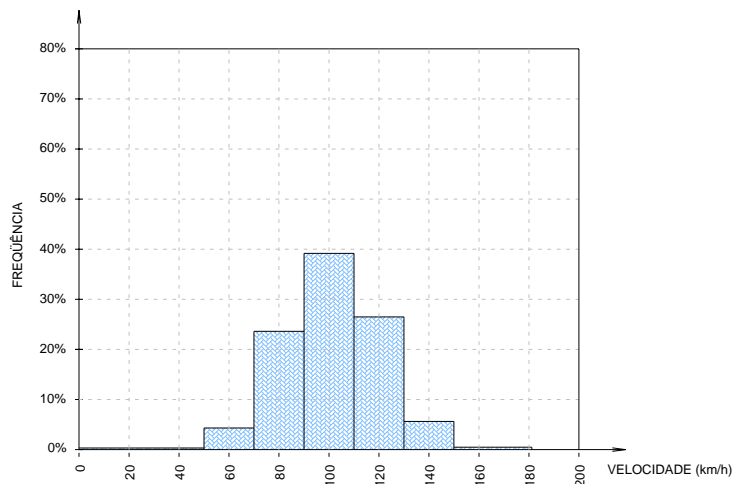


Figura C.6b Distribuição de velocidades em P51: utilitários

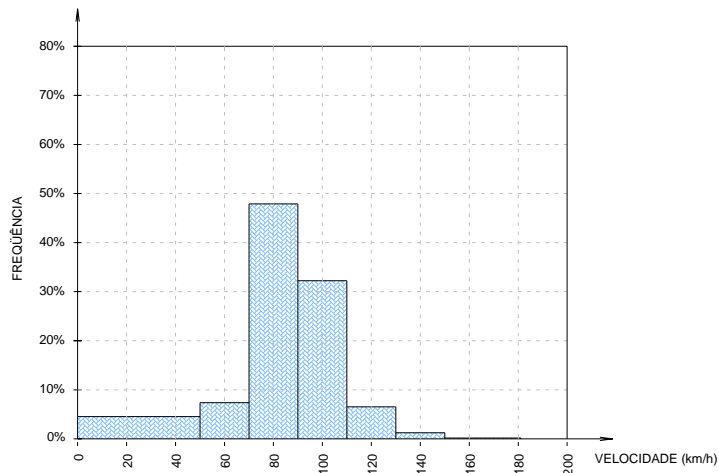


Figura C.6c Distribuição de velocidades em P51: ônibus

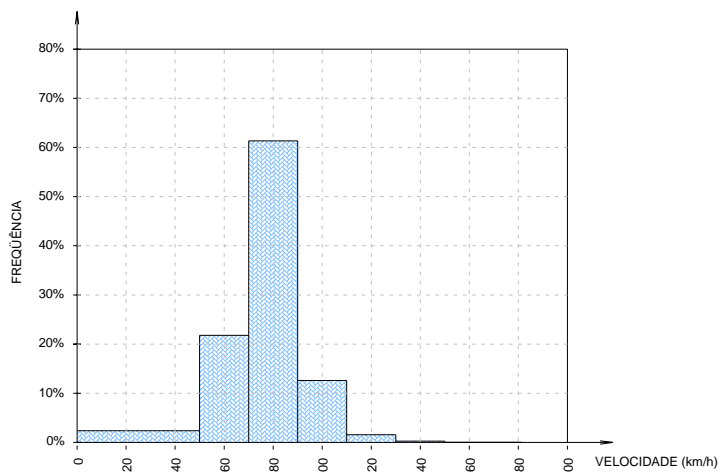


Figura C.6d Distribuição de velocidades em P51: caminhões rígidos e reboques

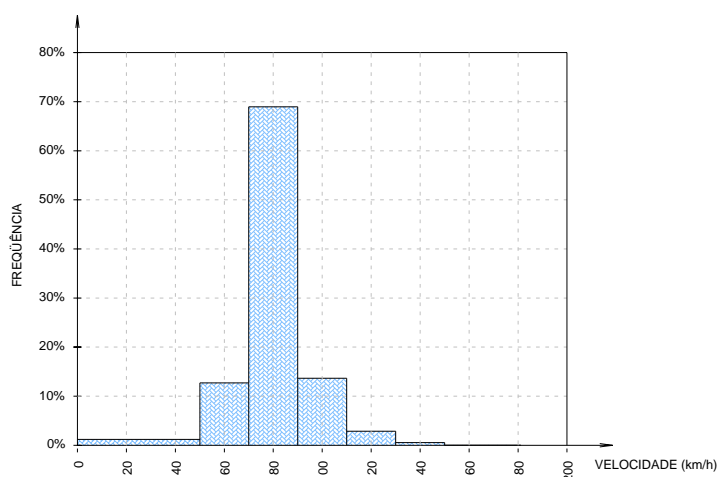


Figura C.6e Distribuição de velocidades em P51: semi-reboques

Comparando as Figuras C.5 e C.6, verifica-se a semelhança entre as velocidades medidas em P51 com as globais.

As planilhas de *Velocidades médias por hora* mostram a evolução da velocidade média de cada classe simples de veículo durante cada intervalo horário do dia e podem ser usadas para estimar a velocidade média de cada veículo, mostradas na Figura C.7. Ressalte-se que o número de veículos com velocidade medida é bastante inferior ao número de veículos contados. As velocidades médias dos veículos pesados, (caminhões, ônibus e semi-reboques), praticamente não se alteram entre P51 e o conjunto global, o que confirma a proximidade desse posto com a realidade geral medida; a velocidade do tráfego de veículos pesados no posto P51 é representativa do conjunto global.

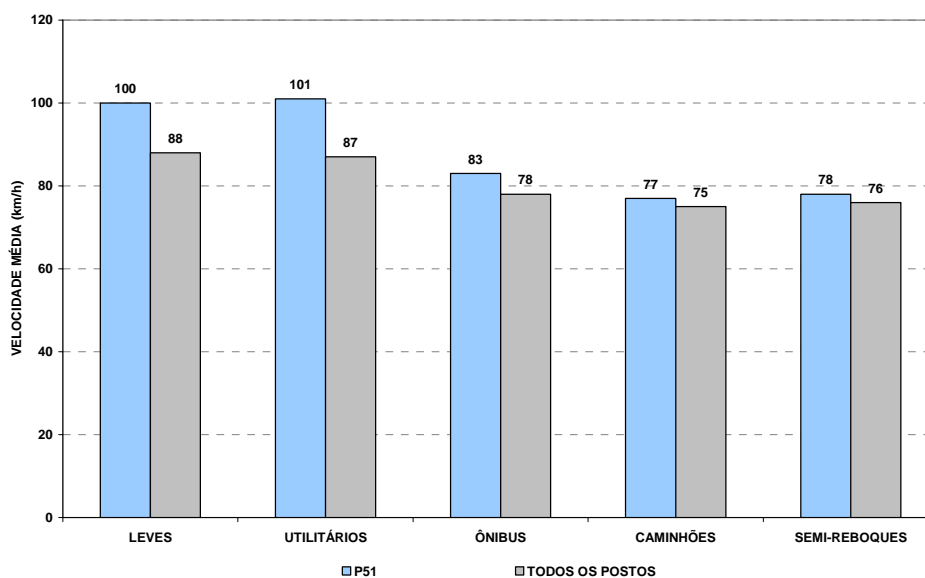


Figura C.7 Comparação entre as velocidades médias dos veículos de P51 e de todos os Postos de Monitoramento