LORENZO AUGUSTO RUSCHI E LUCHI

**REAVALIAÇÃO DO TREM-TIPO À LUZ DAS CARGAS REAIS NAS
RODOVIAS BRASILEIRAS**

SÃO PAULO

2006

LORENZO AUGUSTO RUSCHI E LUCHI

**REAValiação DO TREM-TIPO À LUZ DAS CARGAS REAIS NAS
RODOVIAS BRASILEIRAS**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Estruturas

Orientador:
Prof. Dr. Fernando Rebouças Stucchi

SÃO PAULO

2006

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

São Paulo, 24 de novembro de 2006

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Luchi, Lorenzo Augusto Ruschi e

Reavaliação do trem-tipo à luz das cargas reais nas rodovias brasileiras / L.A.R. e Luchi. – ed. rev. -- São Paulo, 2006.
257 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.

1.Pontes rodoviárias 2.Normas técnicas 3.Carregamento nas estruturas 4.Veículos de carga I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações II.t.

À minha esposa Juliana. Por tudo o que temos vivido juntos, essa vitória também é sua.

Aos meus pais, Solimar e Beatriz, meus primeiros professores. E aos meus irmãos, Giulliano e Sandrine, que me ensinaram o que é ser família.

AGRADECIMENTOS

Ao chegar ao fim desta marcante etapa da minha vida, expresso minha eterna gratidão...

Primeiramente a Deus, por ter me dado força e me abençoado em todas os momentos.

Ao meu Orientador, Professor Fernando Stucchi, pelos conselhos, incentivo e exemplo de dedicação.

Ao Professor Pedro Costa Neto, pelo apoio na parte estatística da pesquisa.

À Centrovias Sistemas Rodoviários S. A., e especialmente ao Engº. Giovane Zito Gomes, pelos dados fornecidos e permissão para que eu pudesse acompanhar as pesagens.

À Diretoria da EGT Engenharia por permitir que adequasse meu horário de trabalho ao tempo exigido pelo Doutorado.

Ao Luciano Maldonado Ferreira e ao Fernando Lopes de Moraes pelo empréstimo de livros e artigos valiosos e pelos debates sobre os nossos trabalhos. Ao Leandro Trautwein pelo companheirismo nesses últimos 5 anos.

A Juliana, pelo amor, dedicação e participação. Aos meus pais, irmãos, padrinhos, avós, sogros e demais familiares por terem sempre me incentivado e acreditado no meu sucesso.

Aos grandes amigos que tenho na EGT pelo apoio e compreensão em todas as horas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO	xvii
<i>ABSTRACT</i>	xviii

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.....	1
-----------------	---

CAPÍTULO 2

NORMAS PARA O CÁLCULO DE CARGAS DE PROJETO EM PONTES E

VIADUTOS.....	6
2.1. A NORMA BRASILEIRA	6
2.2. A NORMA EUROPÉIA.....	15
2.3. A NORMA NORTE-AMERICANA	20

CAPÍTULO 3

CARGAS ÚLTIMAS - COMPARAÇÕES ENTRE NORMAS.....	27
3.1. ANÁLISES EFETUADAS	27
3.2. RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	28

CAPÍTULO 4

OS VEÍCULOS DE CARGA QUE TRAFEGAM NAS RODOVIAS DO BRASIL	34
4.1. INTRODUÇÃO.....	34
4.2. TIPOS DE VEÍCULOS USUAIS.....	35
4.3. CARGAS PERMITIDAS	39
4.4. COMBINAÇÕES DE VEÍCULOS DE CARGA	43

CAPÍTULO 5

CONCEITOS ESTATÍSTICOS.....	49
5.1. INTRODUÇÃO.....	49
5.2. TEORIA DAS PROBABILIDADES.....	50
5.3. FENÔMENOS ALEATÓRIOS	50
5.4. FUNÇÕES DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES	53
5.5. PERÍODO DE RETORNO	58
5.6. DISTRIBUIÇÕES DE MÁXIMOS	59
5.7. ESTIMATIVA EMPÍRICA DE PARÂMETROS	64
5.8. SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO	72

CAPÍTULO 6

O ESTUDO DAS CARGAS DE VEÍCULOS EM PONTES E VIADUTOS	76
6.1. INTRODUÇÃO.....	76
6.2. A EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL	77
6.3. A EXPERIÊNCIA BRASILEIRA	111
6.4. CONCLUSÕES	120

CAPÍTULO 7

O MODELO PARA AVALIAÇÃO DO TREM-TIPO	121
7.1. INTRODUÇÃO.....	121
7.2. DESCRIÇÃO INICIAL DOS DADOS DE CAMPO.....	122
7.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	123
7.4. SEQUÊNCIA DE CÁLCULOS	134

CAPÍTULO 8

ANÁLISES E RESULTADOS	145
8.1. ANÁLISES EFETUADAS	145
8.2. PONTE BIAPOIADA COM 2 FAIXAS DE TRÁFEGO	148
8.3. PONTE CONTÍNUA DE 2 VÃOS IGUAIS (2 FAIXAS).....	154
8.4. PONTE BIAPOIADA COM 3 FAIXAS DE TRÁFEGO	157
8.5. PONTE BIAPOIADA COM 4 FAIXAS DE TRÁFEGO	158
8.6. PONTE EM GRELHA	160

CAPÍTULO 9

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	168
9.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	168
9.2. CONCLUSÕES	171
9.3. TEMAS PARA TRABALHOS FUTUROS	173

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	175
--	------------

ANEXO A

GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES CONTÍNUAS AJUSTADAS	181
---	------------

ANEXO B

LISTAGEM DAS MACROS DESENVOLVIDAS	200
--	------------

ANEXO C

EXEMPLO DE CÁLCULO DO ESFORÇO CARACTERÍSTICO	244
---	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Cargas segundo a NB6/43	8
Figura 2.2. Veículo tipo e multidão em planta para a NB-6/60	11
Figura 2.3. Veículos-tipo e distribuição em planta - NBR 7188	14
Figura 2.4. Tabuleiro carregado em planta (modelo 1)	18
Figura 2.5. Modelo de Carga 2	19
Figura 2.6. Faixas de Carga	23
Figura 2.7. Caminhões Padronizados.....	24
Figura 3.1. Seção Transversal em ponte para pista simples	28
Figura 3.2. Seção Transversal em ponte para pista dupla	28
Figura 3.3. Pontes Biapoiadas em Pista Simples – Momentos Fletores	29
Figura 3.4. Pontes Biapoiadas em Pista Dupla – Momentos Fletores.....	30
Figura 3.5. Pontes Biapoiadas em Pista Simples – Forças Cortantes.....	31
Figura 3.6. Pontes Biapoiadas em Pista Dupla – Forças Cortantes	31
Figura 3.7. Pontes de 2 vãos em Pista Dupla – Momentos Fletores Positivos	32
Figura 3.8. Pontes de 2 vãos em Pista Dupla – Momentos Fletores Negativos	33
Figura 4.1. Veículos 2S3 e 3S3 curtos – destinados ao transporte de areia e grãos	37
Figura 4.2. Veículos 2S3 e 3S3 longos – destinados ao transporte de granéis líquidos e carga geral.....	38
Figura 4.3. Veículo 2I3 – destinado ao transporte de granéis líquidos	38
Figura 4.4. Veículo 3C2.....	39

Figura 4.5. Romeu e Julieta (caminhão trucado + reboque) – até 500 kN	45
Figura 4.6. Bitrem articulado – até 570 kN – comprimento de 19,8 metros .	45
Figura 4.7. Tritrem – até 740 kN – comprimento de 30 metros	45
Figura 4.8. Rodotrem - até 740 kN – comprimento de 30 metros.....	46
Figura 4.9. Veículo 3T6 (9 eixos – 740 kN)	47
Figura 4.10. Veículo 3Q4 (7 eixos - 630 kN)	47
Figura 4.11. Alguns exemplos de utilização do veículo 3D4 (7 eixos – 570 kN)	48
Figura 5.1. Exemplo de histograma e polígono de frequências – variável: passagem diária de um tipo de veículo em um determinado ponto de uma rodovia	51
Figura 5.2. Função densidade de probabilidade e de probabilidade acumulada para a distribuição uniforme.....	53
Figura 5.3. Função densidade de probabilidade e de probabilidade acumulada para a distribuição exponencial	54
Figura 5.4. Função densidade de probabilidade e de probabilidade acumulada para variável aleatória com distribuição normal com média 0 e diferentes desvios-padrão	55
Figura 5.5. Função densidade de probabilidade e de probabilidade acumulada para variável aleatória com distribuição lognormal.....	57
Figura 5.6. Função densidade de probabilidade de Distribuição Normal Bimodal.....	58
Figura 5.7. Papel de Probabilidade Normal	67
Figura 5.8. Papel de Probabilidade Lognormal	68
Figura 5.9. Papel de Probabilidade Exponencial.....	69
Figura 5.10. Papel de Probabilidade de Gumbel	70

Figura 5.11. Frequência acumulada empírica $S_n(x)$ e função de distribuição acumulada $F(x)$	71
Figura 5.12. Relação entre μ e x	73
Figura 6.1. Histogramas dos pesos brutos de veículos	83
Figura 6.2. Cauda superior da distribuição de momentos fletores para um caminhão isolado.....	86
Figura 6.3. Cauda superior da distribuição de momentos fletores para vários caminhões.....	86
Figura 6.4. Viés (momento fletor de caminhão na ponte/HS20) para vários vãos em papel de probabilidade normal.....	87
Figura 6.5. Viés (força cortante de caminhão na ponte/HS20) para vários vãos em papel de probabilidade normal.....	88
Figura 6.6. Relação Esforço Médio / esforço do HS20 para diversos períodos (de cima para baixo, respectivamente 75 anos, 50 anos, 7,5 anos, 1,5 anos, 9 meses, 3 meses, 1,5 meses, 2 semanas e 1 dia).....	89
Figura 6.7. Tipos de veículos considerados.....	94
Figura 6.8. Histogramas dos pesos brutos em rodovias européias – 1986 e 1997	94
Figura 6.9. Histograma de peso total – veículo A113.....	96
Figura 6.10. Ultrapassagens de nível – x1 ultrapassa para maior, nove vezes e x2 ultrapassa para menor, 5 vezes	97
Figura 6.11. Histograma de ultrapassagens de nível para o momento fletor – Dados do peso em movimento (WIM) e por Monte Carlo (MC).....	97
Figura 6.12. Comparação dos valores característicos obtidos por diferentes métodos e para diferentes vãos.....	99
Figura 6.13. Classificação dos veículos suíços.....	100
Figura 6.14. Histograma e função densidade de probabilidade para o conjunto traseiro de eixos	101

Figura 6.15. Comparação entre os efeitos das simulações e os efeitos da carga normativa suíça	103
Figura 6.16. Modelos obtidos para o quantil de 98% do tráfego de Hong Kong.....	107
Figura 6.17. Função de probabilidade para $L_0 = 400$ metros	110
Figura 6.18. Comparação entre o valor característico ($F_w(w_k)=0,98$) um valor intermediário e o valor de cálculo ($F_w(w_d)=0,9996$).....	110
Figura 6.19. Veículos utilizados no relatório do DER-SP	113
Figura 6.20. Extrapolação para o caminhão 3S3 curto.....	114
Figura 6.21. Caminhão 3S3 curto para momento fletor positivo – PBT 1008,8 kN	115
Figura 6.22. Cargas por eixo no caminhão 2S2	117
Figura 7.1. Percentual de cada tipo de caminhão	123
Figura 7.2. Histograma de quantidade de veículos que passaram pela pesagem	124
Figura 7.3. Histograma de quantidade de veículos – 2C	125
Figura 7.4. Dados plotados em Papel de Probabilidade Normal - passagens de veículos 2C.....	126
Figura 7.5. Função densidade de Probabilidade Normal - passagens de veículos 2C	126
Figura 7.6. Função de Distribuição Acumulada Normal - passagens de veículos 2C	127
Figura 7.7. Função de Probabilidade Acumulada Contínua e Discreta	128
Figura 7.8. Função Densidade de Probabilidade Bimodal e Distribuição Discreta.....	129
Figura 7.9. Determinação por Monte Carlo da quantidade de veículos de um tipo em um dia.....	134

Figura 7.10. Tráfego gerado para 1 dia.....	135
Figura 7.11. Obtenção da fila de veículos	136
Figura 7.12. Alteração do tráfego em faixas lentas ou expressas	136
Figura 7.13. Determinação por Monte Carlo do Peso Bruto Total de um veículo	137
Figura 7.14. Cálculo do esforço solicitante através da soma dos efeitos das faixas de tráfego.....	138
Figura 7.15. Linhas de influência utilizadas	138
Figura 7.16. Distribuição de máximos anuais típica.....	139
Figura 7.17. Seqüência de cálculo através das planilhas.....	140
Figura 7.18. Planilha para montagem dos tráfegos diários – <i>Monta Dias</i>	141
Figura 7.19. Planilha para montagem das filas de veículos – <i>Monta cenários</i> .	142
Figura 7.20. Planilha para atribuição das cargas para cada veículo – <i>Monta Trem de carga</i>	143
Figura 7.21. Planilha para cálculo de momento fletor no meio do vão – <i>Calcula Esforço</i>	144
Figura 8.1. Variação do viés de momento fletor para o caso PS – ponte biapoiada.....	149
Figura 8.2. Variação do viés de momento fletor para o caso PD-A – ponte biapoiada.....	150
Figura 8.3. Variação do viés de momento fletor para o caso PD-B – ponte biapoiada.....	150
Figura 8.4. Variação do viés de força cortante para o caso PS – ponte biapoiada.....	151
Figura 8.5. Variação do viés de força cortante para o caso PD-A – ponte biapoiada.....	152

Figura 8.6. Variação do viés de força cortante para o caso PD-B – ponte biapoiada.....	152
Figura 8.7. Variação comparativa do viés de momento fletor e força cortante para o caso PS ponte biapoiada	153
Figura 8.8. Variação comparativa do viés de momento fletor e força cortante para o caso PD-A – ponte biapoiada	154
Figura 8.9. Variação comparativa do viés de momento fletor e força cortante para o caso PD-B – ponte biapoiada	154
Figura 8.10. Variação do viés de momento fletor no apoio central para o caso PS – ponte contínua com dois vãos iguais	155
Figura 8.11. Variação do viés de momento fletor no apoio central para o caso PD-A – ponte contínua com dois vãos iguais	156
Figura 8.12. Variação do viés de momento fletor no apoio central para o caso PD-B – ponte contínua com dois vãos iguais	156
Figura 8.13. Variação do viés de momento fletor para o caso de pista tripla – ponte biapoiada	157
Figura 8.14. Variação do viés de força cortante para o caso de pista tripla – ponte biapoiada	158
Figura 8.15. Variação do viés de momento fletor para o caso de com 4 faixas com tráfego no mesmo sentido – ponte biapoiada	159
Figura 8.16. Variação do viés de força cortante para o caso de com 4 faixas com tráfego no mesmo sentido – ponte biapoiada	159
Figura 8.17. Seção transversal da viga pré-moldada.....	160
Figura 8.18. Seção transversal da superestrutura da ponte	161
Figura 8.19. Linha de Influência de carga na longarina V1 – de extremidade ...	161
Figura 8.20. Linha de Influência de carga na longarina V2 - intermediária .	162
Figura 8.21. Linha de Influência de carga na longarina V3 - central.....	162

Figura 8.22. Situação de carregamento 1 – com refúgio de 1,0 m.....	163
Figura 8.23. Situação de carregamento 2 – sem refúgio de 1,0 m	163
Figura 8.24. Situação de carregamento 3 – três faixas de tráfego	164
Figura A.1. Histograma de quantidades – veículo 2C.....	181
Figura A.2. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2C	181
Figura A.3. Histograma de quantidades – veículo 3C	182
Figura A.4. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3C	182
Figura A.5. Histograma de quantidades – veículo 2S1	182
Figura A.6. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2S1	183
Figura A.7. Histograma de quantidades – veículo 4C	183
Figura A.8. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 4C	183
Figura A.9. Histograma de quantidades – veículo 2S2	184
Figura A.10. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2S2	184
Figura A.11. Histograma de quantidades – veículo 2I2	184
Figura A.12. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2I2.....	185
Figura A.13. Histograma de quantidades – veículo 2S3	185
Figura A.14. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2S3	185
Figura A.15. Histograma de quantidades – veículo 2C3	186

Figura A.16. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2C3.....	186
Figura A.17. Histograma de quantidades – veículo 3S2	186
Figura A.18. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3S2	187
Figura A.19. Histograma de quantidades – veículo 3I2.....	187
Figura A.20. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3I2.....	187
Figura A.21. Histograma de quantidades – veículo 3S3	188
Figura A.22. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3S3	188
Figura A.23. Histograma de quantidades – veículo 2I3	188
Figura A.24. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2I3.....	189
Figura A.25. Histograma de quantidades – veículo 3D4.....	189
Figura A.26. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3D4.....	189
Figura A.27. Histograma de quantidades – veículo 3T6	190
Figura A.28. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3T6.....	190
Figura A.29. Histograma de peso bruto total – veículo 2C	190
Figura A.30. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2C.....	191
Figura A.31. Histograma de peso bruto total – veículo 3C	191
Figura A.32. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 3C.....	191
Figura A.33. Histograma de peso bruto total – veículo 2S1.....	192

Figura A.34. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2S1	192
Figura A.35. Histograma de peso bruto total – veículo 4C	192
Figura A.36. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 4C	193
Figura A.37. Histograma de peso bruto total – veículo 2S2.....	193
Figura A.38. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2S2	193
Figura A.39. Histograma de peso bruto total – veículo 2I2	194
Figura A.40. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2I2	194
Figura A.41. Histograma de peso bruto total – veículo 2S3	194
Figura A.42. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2S3	195
Figura A.43. Histograma de peso bruto total – veículo 2C3	195
Figura A.44. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2C3	195
Figura A.45. Histograma de peso bruto total – veículo 3S2.....	196
Figura A.46. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 3S2	196
Figura A.47. Histograma de peso bruto total – veículo 3I2	196
Figura A.48. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 3I2	197
Figura A.49. Histograma de peso bruto total – veículo 3S3.....	197
Figura A.50. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 3S3	197
Figura A.51. Histograma de peso bruto total – veículo 2I3.....	198

Figura A.52. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2I3.....	198
Figura A.53. Histograma de peso bruto total – veículo 3D4	198
Figura A.54. Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 3D4.....	199
Figura A.55. Histograma de peso bruto total – veículo 3T6	199
Figura A.56. Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3T6.....	199
Figura C.1. Histograma dos máximos anuais.....	255
Figura C.2. Plotagem no papel de probabilidades e obtenção dos parâmetros da distribuição.....	255
Figura C.3. Função Densidade de Probabilidade da Distribuição dos Máximos Anuais	257

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Cargas de multidão segundo a NB6/43.....	7
Tabela 2.2. Cargas para os compressores e caminhões segundo a NB6/43....	8
Tabela 2.3. Cargas segundo a NB-6/60.....	10
Tabela 2.4. Cargas na NBR 7188 (1984).....	13
Tabela 2.5. Características dos veículos-tipo – NBR 7188 (1984).....	13
Tabela 2.6. Número e largura de faixas de tráfego – <i>Eurocode</i>	16
Tabela 2.7. Cargas para cada faixa – Modelo 1.....	18
Tabela 2.8. Fatores de redução segundo a <i>AASHTO STD Specifications</i>	21
Tabela 2.9. Fatores de redução segundo a <i>AASHTO LRFD Specifications</i>	21
Tabela 4.1. Limites para o comprimento dos veículos	42
Tabela 4.2. Comparação entre os Limites de Carga do Brasil com EUA e Europa	43
Tabela 6.1. Valores para a fórmula simplificada	79
Tabela 6.2. Valores para $W_{0,95}$	79
Tabela 6.3. Configuração dos veículos espanhóis.....	82
Tabela 6.4. Resultados para simulação de fluxo de tráfego de 200 semanas .	85
Tabela 6.5. Período, caminhões e probabilidades	89
Tabela 6.6. Diferenças percentuais entre os resultados – Rice e Gumbel e entre parênteses Rice e Weibull.....	99
Tabela 6.7. Probabilidades de ocorrência simultânea	115

Tabela 6.8. Peso por eixo (kN) e coeficiente de variação dos caminhões para análise de presença simultânea	117
Tabela 6.9. Viés (momento de caminhão/momento TT45) – vãos de 20 a 40 m	118
Tabela 6.10. Comparação entre resultados de coeficientes de impacto por diversos métodos.....	119
Tabela 7.1. Distribuições contínuas obtidas para quantidades de veículos ..	127
Tabela 7.2. Distribuições contínuas obtidas para peso bruto total dos veículos	130
Tabela 7.3. Proporção de Cargas entre os eixos e conjuntos de eixos.....	130
Tabela 7.4. Distâncias entre eixos consideradas.....	132
Tabela 8.1. Situações de tráfego analisadas.....	146
Tabela 8.2. Momentos Fletores característicos no meio do vão em pontes celulares isostáticas – 2 faixas de tráfego	148
Tabela 8.3. Forças Cortantes características na seção do apoio em pontes celulares isostáticas – 2 faixas de tráfego	148
Tabela 8.4. Trem-tipo de $M_{\text{máx}}$ – PD-B	164
Tabela 8.5. Trem-tipo de $M_{\text{máx}}$ – PS	164
Tabela 8.6. Momentos fletores nas longarinas – casos 1 e 2.....	165
Tabela 8.7. Relação entre o momento fletor do trem de carga (2 faixas) e o momento máximo do TT45, no meio do vão – entre parênteses a diferença entre as relações para a longarina e para a ponte celular.....	165
Tabela 8.8. Trem-tipo de $M_{\text{máx}}$ – caso PS-3F	166
Tabela 8.9. Trem-tipo de $M_{\text{máx}}$ – caso PT	166
Tabela 8.10. Momentos fletores nas longarinas – três faixas de tráfego.....	166

Tabela 8.11. Relação entre o momento fletor do trem de carga (3 faixas) e o momento máximo do TT45, no meio do vão – entre parênteses a diferença entre as relações para a longarina e para a ponte celular.....167

Tabela C.1. Padrão das tabelas dos trens de carga de momentos máximos244

Tabela C.2. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 1.....244

Tabela C.3. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 2.....244

Tabela C.4. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 3.....245

Tabela C.5. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 4.....245

Tabela C.6. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 5.....245

Tabela C.7. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 6.....245

Tabela C.8. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 7.....245

Tabela C.9. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 8.....246

Tabela C.10. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 9246

Tabela C.11. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 10246

Tabela C.12. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 11246

Tabela C.13. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 12246

Tabela C.14. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 13	247
Tabela C.15. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 14	247
Tabela C.16. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 15	247
Tabela C.17. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 16	247
Tabela C.18. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 17	247
Tabela C.19. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 18	248
Tabela C.20. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 19	248
Tabela C.21. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 20	248
Tabela C.22. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 21	248
Tabela C.23. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 22	248
Tabela C.24. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 23	249
Tabela C.25. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 24	249
Tabela C.26. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 25	249
Tabela C.27. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 26	249
Tabela C.28. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 27	249

Tabela C.29. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 28	250
Tabela C.30. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 29	250
Tabela C.31. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 30	250
Tabela C.32. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 31	250
Tabela C.33. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 32	250
Tabela C.34. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 33	251
Tabela C.35. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 34	251
Tabela C.36. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 35	251
Tabela C.37. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 36	251
Tabela C.38. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 37	251
Tabela C.39. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 38	252
Tabela C.40. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 39	252
Tabela C.41. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 40	252
Tabela C.42. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 41	252

Tabela C.43. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 42	252
Tabela C.44. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 43	253
Tabela C.45. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 44	253
Tabela C.46. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 45	253
Tabela C.47. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 46	253
Tabela C.48. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 47	253
Tabela C.49. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 48	254
Tabela C.50. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 49	254
Tabela C.51. Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 50	254
Tabela C.52. Momentos Fletores no meio do vão (40 m) – máximos anuais	254

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo para a verificação do trem-tipo de projeto de pontes e viadutos da norma brasileira a partir do tráfego real nas estradas.

Inicialmente, apresenta-se a comparação da carga móvel da norma brasileira com o *Eurocode* e com as normas da *AASHTO*. Em seguida, apresenta-se o estado da arte no Brasil e no mundo em pesquisas na área de cargas móveis em pontes.

Propõe-se um modelo de verificação do trem-tipo baseado em simulações das passagens e cargas de veículos, através do método de Monte Carlo. São utilizados dados de pesagem e de quantidades de veículos provenientes de uma rodovia concedida à iniciativa privada no interior paulista.

São efetuadas análises de pontes celulares com diversos vãos, de 30 a 200 metros, sendo estudados os momentos fletores no meio do vão e forças cortantes adjacentes aos apoios, em obras isostáticas, e momentos fletores no apoio central de pontes contínuas de dois vãos. É dada maior ênfase às situações de congestionamento sobre a ponte, e são efetuadas extrapolações estatísticas para a obtenção dos esforços característicos, levando-se em conta as diferentes situações de tráfego possíveis.

Por fim, é feita uma extensão ao estudo das grelhas, utilizando-se linhas de influência transversais em ponte com vão de 30 metros, sem transversinas intermediárias.

ABSTRACT

This work presents a model to verify the design traffic load model of the Brazilian code, based on real traffic at road bridges.

First, it compares Brazilian load model with Eurocode 1 and AASHTO Standard and LRFD Specifications. Then, recent development and research on bridge traffic load models are presented, in Brazil and other countries.

A verification model of the traffic load is proposed, based on quantity and weight vehicle simulations, using Monte Carlo method. Real traffic data of trucks, used in this work, have been collected at highways of Sao Paulo state.

Box-girder bridges from 30 to 200 m spans are investigated, studying the bending moment at midspan and the shear forces near the supports, on simply supported bridges, and the bending moment at center support, on two-span continuous bridges. Traffic jam situations on the bridge are emphasized, and statistical extrapolations to the load effects characteristic values are done.

Finally, it presents an extension of this study to multi-beam cross sections, using transverse influence lines, in a 30 m span bridge, without transverse beams.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No projeto de componentes estruturais das pontes, o engenheiro deve considerar todas as cargas às quais eles podem estar submetidos. Essas ações podem variar dependendo da duração (carga permanente ou carga acidental), direção (vertical, transversal, longitudinal, etc.), distribuição (distribuída ou séries de concentradas) e tipo de deformação imposta (devido a temperatura, retração e fluência).

As cargas móveis atuantes nas estruturas de pontes e viadutos provêm do tráfego de veículos. O tráfego de veículos pode ser muito variado entre as pontes, em que pese a sua composição (porcentagem de caminhões), densidade de tráfego (volume médio de veículos por dia), as condições (frequência de engarrafamentos), as cargas máximas permitidas e as distribuições dos eixos.

Em relação ao fluxo, é importante lembrar que são possíveis alguns cenários, que devem ser analisados. Inicialmente, tem-se o fluxo normal dos veículos com velocidades usuais. Um segundo cenário seria o de congestionamento, que pode ser analisado tanto com os veículos parados como com os veículos em movimento.

Na situação de congestionamento, com os veículos completamente em repouso, o coeficiente de impacto não deve obviamente ser considerado. Isto pode ocorrer em situações normais de trânsito, mas também em caso de acidente na rodovia. Nesse caso, deveria ser considerada, além da carga dos veículos, uma carga de multidão distribuída no tabuleiro, referente à aglomeração de pessoas em casos como este.

Abalisando-se os veículos trafegando com baixas velocidades e formando filas em todas as faixas, temos também uma situação de congestionamento, porém, neste caso, faz-se necessária a consideração do impacto das suas rodas no tabuleiro. Neste estudo, considera-se o coeficiente de impacto usual, conscientemente a favor da segurança, já que para baixas velocidades este poderia até mesmo ser reduzido, na sua parcela global.

Ainda em relação à situação de congestionamento, pode-se vislumbrar um cenário de fila de veículos pesados em rodovias de acesso a terminais multimodais de carga. Com o crescente aumento do transporte e incremento do volume de carga transportado, este é também um problema que merece consideração.

Pode-se ter também situações mistas entre congestionamento e fluxo normal, principalmente em rodovias com várias faixas de tráfego, onde haveria algumas faixas em cada situação.

O tráfego, consistindo de pedestres, motos, carros, ônibus, caminhões e veículos especiais, dá origem a forças horizontais e verticais, com efeito estático e dinâmico.

Em todas as normas internacionais, os modelos de carregamento procuram representar as cargas reais a favor da segurança, mas isso nem sempre é garantido.

Nas normas internacionais, bem como na norma brasileira, as cargas são consideradas através de trens-tipo idealizados, que não refletem necessariamente a realidade dos veículos passantes nas obras, seja em relação à carga por eixo, seja em relação à distribuição de eixos.

Desde a norma NB-6/1960, utiliza-se no Brasil a configuração do trem-tipo com três eixos espaçados de 1,50 m entre si e com o veículo possuindo dimensões de 6 metros de comprimento por 3 metros de largura. Desde então, houve algumas modificações em relação às cargas atuantes, mas não em relação às dimensões dos veículos. A norma atualmente em vigor no país é a NBR 7188/1984: Ações em Pontes Rodoviárias e Passarelas de Pedestres. O carregamento da norma Brasileira é adotado com base na norma alemã DIN 1072. Diversos autores comentam o fato de as cargas utilizadas no Brasil serem cópias das cargas alemãs, no entanto, pouco esforço se fez até hoje em termos de pesquisas para se ter um trem-tipo genuinamente nascido em terras brasileiras.

É muito difícil pensar em modificações no trem-tipo a ser considerado, visto que já existe uma cultura de utilização desta configuração de trem de carga pelos projetistas brasileiros há mais de 40 anos. Por outro lado, com o advento dos computadores e dos programas de análise automáticos, tornou-se muito simples a consideração de cargas com diferentes configurações no cálculo estrutural.

O objetivo desta tese não é modificar a configuração e as cargas do trem-tipo, mas verificar a validade da carga móvel indicada pela norma Brasileira para o projeto de pontes e viadutos em função das características do tráfego nas rodovias brasileiras.

Inicia-se por comparações do trem tipo previsto na Norma Brasileira com as cargas de cálculo das normas mais importantes no cenário da engenharia atual, a Norma dos Estados Unidos e a Norma Européia. Em seguida, é discutido o tráfego rodoviário pesado brasileiro, e é apresentada uma visão crítica das pesquisas desenvolvidas no Brasil e no restante do mundo em relação às cargas móveis em pontes e viadutos.

Finalmente, analisa-se, com base em dados de pesagem obtidos com concessionária de rodovias do interior paulista, as características do tráfego comercial. Baseado em estudos probabilísticos, admite-se uma distribuição de veículos no tabuleiro das pontes de modo a representar a variabilidade das passagens desses veículos e os esforços solicitantes por consequência dessas passagens.

As verificações são inicialmente efetuadas em relação a pontes de concreto com seção celular. As vigas de seção celular apresentam eficiente distribuição transversal de cargas excêntricas, grande rigidez e, principalmente, grande resistência à torção e a momentos fletores positivos e negativos, em consequência da existência de mesa de compressão superior e inferior. Em razão dessas características, é permitido considerar, para efeito de esforços solicitantes globais longitudinais, que a estrutura seja uma viga única, distribuindo homogeneamente os esforços devido ao trem tipo.

Em seguida, é feita uma avaliação para que se considere, também, o efeito em pontes em grelha, de forma aproximada, considerando-se duas ou três faixas carregadas. Para esta análise é necessário a utilização de linhas de influência de distribuição de esforços transversais. É utilizado o método de Fauchart (1972) no estudo de uma ponte em grelha sem transversinas de vão.

Uma análise completa dos efeitos do tráfego nas pontes e viadutos deve levar em conta tanto os efeitos globais na estrutura como os efeitos locais no tabuleiro, flexões transversais da alma e fadiga. A necessidade de se separar essas análises provém da dificuldade de estudo em conjunto, no qual se tornaria muito difícil a compreensão de todas as variáveis do problema.

Este estudo é centrado em verificações no Estado Limite Último. É conveniente lembrar que o Estado Limite Último de Fadiga, que não será abordado neste estudo, também é considerado importante e deve ser assunto de estudos posteriores.

CAPÍTULO 2

NORMAS PARA O CÁLCULO DE CARGAS DE PROJETO EM PONTES E VIADUTOS

2.1 A NORMA BRASILEIRA

2.1.1 Aspectos Históricos

2.1.1.1 A NB-6/1943

No Brasil, a questão da normalização das cargas em pontes surge na década de 1940 com a publicação da norma NB-1 que tratava do cálculo de estruturas de concreto armado. Posteriormente, outras normas a complementariam, entre elas a NB-6: Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias, publicada em 1943.

As rodovias eram divididas conforme o grau de importância, sendo as rodovias principais classificadas como rodovias de classe I. O trem-tipo era composto por cargas de compressores, caminhões e multidão.

A multidão representa o tráfego de veículos de pequeno porte que pode acompanhar a passagem do caminhão e/ou do compressor. A multidão é constituída por carga uniformemente distribuída cuja intensidade, para o cálculo dos arcos ou vigas principais, é mostrada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Cargas de multidão segundo a NB6/43 (ABNT, 1943) *apud* Cavalcanti (2004)

Característica da estrutura	Carga de multidão (kN/m ²)		
	Classe I	Classe II	Classe III
Vão teórico ≤ 25 m	4,5	4,0	4,0
$25 < \text{vão (L)} \leq 125$ m	$4,5 - (L-25)$	$4,0 - (L-25)$	$4,0 - (L-25)$
Vão teórico > 125 m	3,5	3,0	3,0

Já para os outros elementos estruturais a multidão deveria ser considerada como constante e de valor 4,5 ou 4,0 kN/m², dependendo da classe utilizada.

A multidão distribui-se sobre os passeios e sobre a parte do tabuleiro não ocupada pelos veículos. Para esse fim, a área ocupada por um veículo (compressor ou caminhão) é suposta retangular, com 2,5 m de largura e 6,0 m de comprimento, com o centro sobre o eixo longitudinal do veículo e a igual distância dos eixos dianteiro e traseiro. No cálculo dos arcos ou vigas principais, com 30 m ou mais de vão, permite-se ainda substituir as cargas concentradas dos veículos (compressor ou caminhão) por carga uniformemente distribuída, sobre área retangular com 2,5 m de largura e 6,0 m de comprimento, cuja resultante é igual à soma das cargas concentradas.

Figura 2.1 – Cargas segundo a NB6/43 (ABNT, 1943) *apud* Cavalcanti (2004)

Tabela 2.2 – Cargas para os compressores e caminhões segundo a NB6/43

ABNT (1943) *apud* Cavalcanti (2004)

COMPRESSORES	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Unidades
Peso total	7	16	24	tf
Peso da roda dianteira	5	7	10	tf
Peso da roda traseira	1	4,5	7	tf
Largura da roda dianteira	1	1	1	m
Largura da roda traseira	10	40	50	cm
Distância entre os eixos diant. e traseiro	3	3	3	m
Distância entre os meios da rodas traseiras	160	160	160	cm

CAMINHÕES	Tipo A	Tipo B	Unidades
Peso total	6	9	tf
Peso de cada roda dianteira	750	1500	kgf
Peso de cada roda traseira	2250	3000	kgf
Largura de cada roda dianteira	8	12	cm
Largura de cada roda traseira	18	24	cm
Distância entre os eixos diant. e traseiro	3	3	m
Distância entre os meios da rodas diant. ou traseiras	160	160	cm

O trem-tipo para pontes da Classe I compõe-se de multidão (dada na tabela 2.1), de um compressor Tipo B e de tantos caminhões tipo B quantas forem as faixas de tráfego, menos uma, todos orientados na direção do tráfego e colocados em uma

posição mais desfavorável para o cálculo de cada elemento, com a restrição de apenas um veículo por faixa de tráfego e com espaçamento de, no mínimo 2,5 metros entre eixos longitudinais de dois veículos. A resistência da estrutura deve ainda ser verificada para um compressor Tipo C (Tabela 2.1), posto isolado sobre a ponte, na posição mais desfavorável para o elemento estudado, mas orientado na direção do tráfego.

Na classe II, é considerada multidão, além de um compressor do tipo A e de tantos caminhões tipo A quantas forem as faixas de tráfego, observando-se as condições de posicionamento para a classe I. Além disso deve-se verificar a resistência da estrutura para um compressor Tipo B, isolado sobre a ponte, na posição mais desfavorável para o elemento estudado, na direção do tráfego.

Já o trem-tipo para pontes da Classe III é composto da multidão, de um compressor Tipo A e de tantos caminhões Tipo A quantas forem as faixas de tráfego, menos uma, todos orientados na direção do tráfego e colocados na posição mais desfavorável para o cálculo de cada elemento, apenas com a seguinte restrição: nunca se colocará mais de um veículo sobre cada faixa de tráfego, nem em posição que dê lugar a afastamento de menos de 2,5 m entre eixos longitudinais de dois veículos.

2.1.1.2 A NB-6/1960

Em 1960 foi publicada a NB-6, que esteve em vigor por mais de 20 anos. Esta norma estabelecia as classes de cargas 360, 240 e 120 kN para as rodovias de classe I, II e III, respectivamente. As cargas são consideradas através de trens-tipo idealizados que não refletem a realidade dos veículos passantes nas obras, seja em

relação a carga por eixo, seja em relação à distribuição de eixos. Tais trens-tipo são idênticos aos considerados nas normas alemãs da época.

O notável crescimento do Brasil no período das décadas de 1960 e 1970 possibilitou a ampliação da malha rodoviária nacional, o que conseqüentemente trouxe a construção de milhares de obras-de-arte que foram projetadas pela NB-6, norma em vigor na época.

Tabela 2.3 – Cargas segundo a NB-6/60 (ABNT, 1960)

Classe da Ponte	Veículo		Carga uniformemente distribuída			Classe da Rodovia
	Tipo	Peso Total (tf)	p (kg/m ²)	p' (kg/m ²)	Disposição da carga	
36	36	36	500	300	- Carga p à frente e atrás do veículo.	Classe I
24	24	24	400	300		Classe II
12	12	12	300	300	- Carga p' no restante da pista e passeios.	Classe III

	Unid.	Tipo 36	Tipo 24	Tipo 12
Quantidade de eixos	Eixo	3	3	2
Peso total do veículo	t	36	24	12
Peso de cada roda dianteira	t	6	4	2
Peso de cada roda traseira	t	6	4	4
Peso de cada roda intermediária	t	6	4	-
Largura de contato b_1 de cada roda dianteira	m	0,45	0,35	0,20
Largura de contato b_3 de cada roda traseira	m	0,45	0,35	0,30
Largura de contato b_2 de cada roda intermediária	m	0,45	0,35	-
Comprimento de contato de cada roda	m	0,20	0,20	0,20
Área de contato de cada roda	m ²	0,20 x b	0,20 x b	0,20 x b
Distância entre eixos	m	1,50	1,50	3,00
Distância entre os centros de roda de cada eixo	m	2,00	2,00	2,00

Figura 2.2 – Veículo tipo e multidão em planta para a NB-6/60
(ABNT, 1960)

O trem-tipo, sempre orientado na direção do tráfego, deve ser colocado na posição mais desfavorável para o cálculo de cada elemento, não se considerando a carga do eixo ou da roda que produza redução de esforços solicitantes. Para o cálculo de placas, longarinas e transversinas junto às bordas do tabuleiro, é obrigatório encostar a roda do veículo-tipo no guarda-rodas.

A carga p deve ser aplicada na faixa longitudinal correspondente ao veículo na parte não ocupada por este e a carga p' na parte restante da pista de rolamento e nos passeios, como mostra a figura 2.2. Nos casos em que os guarda-rodas tiverem altura superior a 25 cm, contados a partir da borda de pavimentação da pista, e

ocuparem faixa de largura útil de, no máximo, 75 cm, não se deve dispor carga devido à multidão na faixa ocupada por ele. Nos outros casos, a multidão deve ser considerada na faixa ocupada pelo guarda-rodas. Quando se tratar de ponte com refúgios centrais elevados, em rodovias de mais de uma pista, é obrigatório o carregamento dessa área, com carga p' .

No cálculo dos arcos ou vigas principais com 30 m ou mais de vão, permite-se, ainda, substituir as cargas concentradas do veículo por carga igual, mas uniformemente distribuída, disposta sobre área retangular ocupada pelo mesmo, o chamado trem-tipo homogeneizado.

2.1.2 A NBR 7188/1984

Em 1984, foi publicada a norma NBR 7188: Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias e Passarelas para Pedestres, substituindo os trens-tipo de 240 e 360 kN por 300 e 450 kN, respectivamente. No entanto foi mantida a distribuição de eixos, continuando assim a não refletir a realidade do tráfego existente nas rodovias nacionais. Esta norma segue em vigor até os dias de hoje

Esta norma define três veículos-tipo, respectivamente para as classes 12, 30 e 45. O número da classe corresponde ao peso em toneladas do veículo-tipo. A área ocupada pelo veículo é retangular, de 3,0 m de largura por 6,0 m de comprimento. As cargas uniformemente distribuídas na pista e no passeio têm intensidade p e p' , respectivamente, dada pela tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Cargas na NBR 7188 (ABNT, 1984)

Classe da Ponte	Veículo		Carga uniformemente distribuída		Distribuição da carga
	Tipo	Peso Total	p	p'	
		(kN)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	
45	45	450	5	3	Carga p em toda a pista - Carga p' nos passeios
30	30	300	5	3	
12	12	120	4	3	

Tabela 2.5 – Características dos veículos-tipo – NBR 7188 (ABNT, 1984)

Item	Tipo 45	Tipo 30	Tipo 12
Quantidade de eixos	3	3	2
Peso total do veículo (kN)	450	300	120
Peso de cada roda dianteira (kN)	75	50	20
Peso de cada roda traseira (kN)	75	50	40
Peso de cada roda intermediária (kN)	75	50	-
Largura de contato (b_1) de cada roda dianteira (m)	0,50	0,40	0,20
Largura de contato (b_3) de cada roda traseira (m)	0,50	0,40	0,30
Largura de contato (b_2) de cada roda intermediária (m)	0,50	0,40	-
Comprimento de contato de cada roda (m)	0,20	0,20	0,20
Área de contato de cada roda (m)	0,20 x b	0,20 x b	0,20 x b
Distância entre eixos (m)	1,50	1,50	3,00
Distância entre os centros de roda de cada eixo (m)	2,00	2,00	2,00

A norma NBR 7188/1984 não estabelece a utilização das diferentes classes, ficando a critério dos órgãos jurisdicionais a sua definição. Nas vias principais rurais e urbanas as pontes são projetadas para a classe 45. As outras classes são utilizadas apenas para rodovias secundárias, de caráter local ou regional.

Figura 2.3 – Veículos-tipo e distribuição em planta – NBR 7188 (ABNT, 1984)

O coeficiente que leva em conta o efeito dinâmico das cargas móveis, chamado de coeficiente de impacto, é estabelecido pela norma NBR 7187/1987: Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido. O coeficiente de impacto, a ser aplicado nas cargas móveis para projeto da superestrutura e pilares, excetuando-se o projeto da infraestrutura e as cargas p' nos passeios de pedestres, é dado por:

$$\phi = 1,4 - 0,007 \cdot \ell \quad (2.1)$$

onde

ϕ – coeficiente de impacto ≥ 1

ℓ – comprimento, em metros do vão teórico carregado.

O veículo-tipo, sempre orientado na direção do tráfego, deve ser colocado na posição mais desfavorável para o cálculo de cada elemento, não se considerando a porção do carregamento que provoque redução nas solicitações. A carga distribuída de intensidade p pode ser aplicada em toda a pista de rolamento, nesta incluídas as

faixas de tráfego, os acostamentos e os afastamentos; é descontada apenas a área ocupada pelo veículo.

Segundo a Norma Brasileira, o coeficiente de majoração das ações para as cargas móveis em pontes, para a verificação no Estado Limite Último é $\gamma_f = 1,5$.

2.2 A NORMA EUROPÉIA

A maioria dos países europeus hoje utiliza o *Eurocode*. As cargas de tráfego estão definidas no Eurocode 1 – parte 2 (CEN, 2002). Os membros do CEN – Comitê Europeu de Normalização, que elabora esta norma são: Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Islândia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Malta, Noruega, Portugal, República Tcheca, Suécia, Suíça e Reino Unido. Além das padronizações unificadas, cada país estabelece em seu anexo nacional alguns parâmetros que dependem da especificidade local.

A amplificação dinâmica já se encontra incluída nos modelos, e é definida para um pavimento de qualidade média e veículos apoiados em pneus, mas na realidade depende de vários parâmetros, inclusive da interação veículo-estrutura. Portanto, essa representação é aproximada. Assim, a Norma Européia estabelece que para verificações locais, principalmente, se deve considerar fatores de impacto em separado.

Para a obtenção da carga de projeto, a Norma Européia divide o trecho trafegável do tabuleiro em faixas de projeto. A largura w das faixas adotadas em um leito trafegável, e o número máximo possível de faixas n estão na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Número e largura de faixas de tráfego – *Eurocode* (CEN, 2002)

Largura Trafegável	Número de faixas de tráfego	Largura da faixa de tráfego	Largura da área remanescente
$w < 5,4 \text{ m}$	$n = 1$	3,0 m	$w - 3,0 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n = 2$	$w/2$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n = \text{Int}(w/3)$	3,0 m	$w - 3,0 \times n$

Para cada verificação (por exemplo, estado limite último na flexão), o número de faixas a serem carregadas, a posição e a sua numeração devem ser escolhidas para que os efeitos sejam os mais desfavoráveis possíveis. Para combinação frequente e de fadiga a posição e numeração das faixas deve ser escolhida dependendo do tráfego esperado em condições normais. A faixa que fornece os efeitos mais desfavoráveis é numerada como faixa 1, a faixa que dá o segundo efeito mais desfavorável é a faixa 2 e assim sucessivamente.

2.2.1 Modelos de Carga Vertical

As cargas características são destinadas à determinação de efeitos de tráfego de veículos associados com as verificações de estado limite último e de algumas verificações em serviço. Os modelos de carga 1, 2 e 3, quando importantes, devem ser levados em conta para todos os tipos de situações de projeto (definitivas e temporárias). Já o modelo 4 somente deve ser aplicado em situações provisórias.

Nos passeios de pontes para pedestres ou ciclovias, o valor característico da carga uniformemente distribuída deve ser $q_{fk} = 5 \text{ kN/m}^2$.

2.2.1.1 Modelo de Carga 1

O modelo de carga 1 é destinado a cobrir o a fluidez e congestionamento de veículos com uma alta porcentagem de caminhões pesados. Ele deve ser utilizado

para a verificação de efeitos globais e locais. Segundo o *Eurocode*, geralmente, quando utilizado com os valores básicos, ele cobre os efeitos de um veículo especial de 600 kN. O modelo de carga 1 consiste de dois sistemas parciais:

- cargas concentradas em eixo duplo (sistema em tandem), com cada eixo possuindo a carga $\alpha_Q Q_k$, onde α_Q é um fator de ajuste.
- cargas uniformemente distribuídas (sistema UDL) com a carga distribuída por área de faixa $\alpha_q q_k$, onde α_q é um fator de ajuste.

Vale lembrar que apenas um sistema em tandem deve ser levado em consideração por faixa de tráfego. A superfície de contato de cada roda deve ser tomada como quadrada com lado igual a 0,4 metros.

O modelo deve ser aplicado em cada faixa de tráfego e nas áreas remanescentes. Na faixa de tráfego número i , a magnitude das cargas é referida como $\alpha_{Qi} Q_{ik}$ e $\alpha_{qi} q_{ik}$. Nas áreas remanescentes o valor das cargas é dado por $\alpha_{qr} q_{rk}$. Os valores de α_{Qi} , α_{qi} e α_{qr} são dados nos anexos nacionais. De qualquer modo, para pontes sem sinalização restritiva de carga, os valores recomendados pelo *Eurocode* são, no mínimo $\alpha_{Q1} \geq 0,8$ e, para: $i \geq 2$, $\alpha_{qi} \geq 1$. Ressalta-se que esta restrição não é aplicável a α_{qr} .

Os valores dos fatores α correspondem, nos anexos nacionais, às classes de tráfego. Quando eles são tomados iguais a 1, correspondem a um tráfego no qual veículos industriais pesados internacionais são esperados, representando uma grande parte do tráfego total de veículos. Para composições mais comuns (rodovias) uma redução moderada dos fatores α aplicados a sistemas tandem e as cargas uniformemente distribuídas na faixa 1 são recomendados (10 a 20%). Neste trabalho utilizamos $\alpha_{Qi}=0,8$ e $\alpha_{qi}=1$, seguindo as recomendações mínimas da norma.

Os valores característicos de Q_{ik} e q_{ik} , já com amplificação dinâmica incluída, são dados pela tabela 2.7, e os detalhes da carga estão mostrados na figura 2.4.

Tabela 2.7 – Cargas para cada faixa – Modelo 1 (CEN, 2002)

Posição	Sistema Tandem	Sistema UDL
	Cargas por eixo Q_{ik} (kN)	q_{ik} (kN/m ²)
Faixa número 1	300	9
Faixa número 2	200	2,5
Faixa número 3	100	2,5
Outras faixas	0	2,5
Áreas remanescentes	0	2,5

Figura 2.4 – Tabuleiro carregado em planta (modelo 1)

2.2.1.2 Modelo de Carga 2

O Modelo de Carga 2 consiste em uma carga de eixo simples $\alpha_Q Q_{ak}$ com Q_{ak} igual a 400 kN, efeito de amplificação dinâmica incluído, o qual deve ser aplicado em qualquer posição no leito trafegável. No entanto, quando relevante, pode ser levado em conta somente uma roda de $200 \alpha_Q$ (kN). O valor de α_Q deve ser igual ao valor de α_{Q1} . A superfície de contato de cada roda é retangular, com dimensões de 0,35 m por 0,60 m.

Figura 2.5 – Modelo de Carga 2

As áreas de contato dos modelos 1 e 2 são diferentes, e correspondem a diferentes modelos de pneus, arranjos e distribuição de pressões. As áreas de contato do modelo 2 correspondendo a dois pneus adjacentes, são normalmente relevantes no caso de tabuleiros ortotrópicos.

2.2.1.3 Modelo de Carga 3 (veículos especiais)

Este modelo consiste em um grupo de cargas de eixos montados representando veículos especiais que podem trafegar em rodovias permitidas para cargas excepcionais. É destinado a verificações locais e globais. Quando importante, devem ser definidos e levados em conta modelos de veículos especiais. Neste trabalho estamos preocupados apenas com os carregamentos usuais, portanto não detalharemos este modelo de carga.

2.2.1.4 Modelo de Carga 4 (carga de multidão)

A carga de multidão, quando importante, deve ser representada por um modelo de carga consistindo de carga uniformemente distribuída (já incluindo o efeito dinâmico das cargas móveis) de 5 kN/m^2 . O modelo de carga 4 deve ser aplicado nas partes relevantes do comprimento e largura da ponte, incluindo os refúgios centrais quando existentes. Esse sistema de cargas, específico para verificações globais, deve ser associado unicamente com uma situação transitória de projeto.

2.2.2 Combinação Última de Ações

Para verificações no Estado Limite Último, assim como a norma brasileira, a norma européia estabelece como coeficiente majorador das cargas móveis um γ_f de 1,5.

2.3. NORMA NORTE-AMERICANA

Nos Estados Unidos, as normas da *AASHTO* (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) definem as cargas móveis para pontes rodoviárias. As normas em vigor são a *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges* (aqui chamada de *STD Specifications*), 17ª. Edição, 2002 e *AASHTO Load and Resistance Factor Design Bridge Design Specifications* (no texto denominada *LRFD Specifications*), 2ª. Edição, 1998, revisada em 2003. No entanto, devido à autonomia dos estados, não possuem caráter de norma nacional. Além disso, os Departamentos de Transporte estaduais possuem exigências adicionais para cargas, distribuição de carga e combinações de carga. As Normas dos Estados Unidos apresentam seus valores em unidades britânicas. Neste trabalho converteremos as grandezas para as unidades do Sistema Internacional.

Assim como a Norma Européia, a Norma dos Estados Unidos divide o tabuleiro em faixas de projeto. As faixas devem ser de quantidades inteiras, possuindo 3,66 m de largura, espaçadas de um lado a outro em toda a largura do trecho trafegável da ponte, entre guias ou guarda-rodas. As cargas ocuparão uma largura de 3,05 m de cada faixa de tráfego.

Em virtude da baixa probabilidade das ações ocorrerem simultaneamente, A *STD Specifications* admite uma redução no valor das cargas móveis aplicadas, de acordo com a quantidade de faixas de carga existentes, mostrado na tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Fatores de redução segundo a *AASHTO STD Specifications* (PCI, 2003)

Nº. de faixas carregadas	Fator de redução
1 a 2	1,0
3	0,90
4 ou mais	0,75

A *LRFD Specifications* apresenta um fator de múltipla presença (m - tabela 2.9) que deve ser aplicado Quando se considera uma faixa carregada, o fator de múltipla presença é opcional.

Tabela 2.9 – Fatores de redução segundo a *AASHTO LRFD Specifications* (PCI, 2003)

Nº. de faixas carregadas	Fator de redução (m)
1	1,20
2	1,00
3	0,85
4 ou mais	0,65

Em relação às cargas nos passeios, a *STD Specifications*, estabelece que a estrutura da ponte deve ser dimensionada para as seguintes cargas:

- vãos de 0 a 7,62 m – 4,15 kN/m²
- vãos de 7,62 m a 30,48 m – 2,93 kN/m²
- vãos maiores que 30,48 m:

$$p = \left(30 + \frac{3000}{\ell} \right) \cdot \left(\frac{55 - W}{50} \right) \quad (2.2)$$

onde

p – carga distribuída na área, máximo 2,93 kN/m²

ℓ – comprimento carregado do passeio em metros

W – largura do passeio em metros

A *LRFD Specifications* estabelece uma carga de $3,66 \text{ kN/m}^2$ a ser aplicada em todos os passeios em obras com vão maior que 6,10 m e deve ser considerada juntamente com as cargas dos veículos.

2.3.1 Cargas Móveis Segundo a *Standard Specifications*

A *STD Specifications* define que as cargas móveis rodoviárias nas pontes consistem de caminhões padronizados ou faixas de carga que são equivalentes a trens de carga. Dois sistemas de cargas são fornecidos, as cargas H e as cargas HS. As cargas HS são mais pesadas que as cargas H correspondentes. Existem quatro classes padrão de cargas móveis rodoviárias: H 20, H 15, HS 20 e HS 15. Se forem necessárias cargas superiores a estas, deverão ser obtidas aumentando-se proporcionalmente as cargas para os caminhões padronizados e para as faixas de carga. Alguns estados norte-americanos já começaram a utilizar veículos HS25, que representariam uma carga 25% maior em relação ao veículo HS20. Além disso, alguns estados desenvolveram configurações de cargas diferentes, que muitas vezes são importantes na análise de estruturas.

2.3.1.1 Faixas de Carga

Cada faixa de carga consiste de uma carga linearmente distribuída ou uma carga de tráfego combinada com uma carga concentrada simples (ou duas cargas concentradas no caso de vigas contínuas), posicionadas no vão de forma a produzir máximo esforço. A carga concentrada e a carga distribuída devem ser consideradas como uniformemente distribuída em uma largura de 3,05 m em uma linha normal ao centro da faixa (figura 2.6).

Figura 2.6 – Faixas de Carga (PCI, 2003)

Para a determinação de momentos máximos negativos no projeto de vigas contínuas, a faixa de carga mostrada na figura 2.6 deve ser modificada com o acréscimo de uma segunda carga concentrada (de igual valor) em outro vão da série em uma posição tal que seja produzido o máximo esforço. Para o momento positivo máximo, somente uma carga concentrada deve ser usada por faixa, combinada com o máximo de vãos carregados pela carga distribuída, para que se tenha o maior esforço possível.

2.3.1.2 Caminhões Padronizados

O caminhão padronizado relativo às classes H15 e H20 possui um eixo traseiro e um eixo dianteiro, espaçados entre si por 4,27 metros. Já o veículo do tipo HS possui três eixos com espaçamento variável entre os eixos traseiros. Ele foi introduzido de forma que os espaçamentos dos eixos poderão se aproximar dos caminhões reais em utilização atualmente. O espaçamento variável também fornece melhores resultados em vigas contínuas, nas quais os eixos mais pesados devem ser posicionados em vãos adjacentes de modo a produzir maiores momentos negativos. Vale lembrar que somente um caminhão padronizado H ou HS pode ser utilizado por faixa de projeto na determinação dos esforços solicitantes (figura 2.7).

As pontes situadas em rodovias interestaduais ou outras rodovias importantes que suportem, ou deverão suportar, tráfego de caminhões pesados deverão ser projetadas para a carga HS20-44 ou para uma Carga Alternativa Militar de dois eixos afastados de 1,22 m com cada eixo pesando 106,76 kN, o que produzir o maior efeito.

Figura 2.7 – Caminhões Padronizados (PCI, 2003)

2.3.2 Cargas Móveis Segundo a *LRFD Specifications*

As cargas móveis em pontes, chamadas de HL-93, consistem numa combinação de um caminhão padronizado ou eixo tandem com uma carga linear de projeto.

O caminhão padronizado é o HS20, dado pela *STD Specifications*. O Eixo tandem padronizado consiste em um par de eixos de 113,39 kN afastados de 1,22 m. Em cada caso, o espaçamento transversal é de 1,83 m. A faixa de carga de projeto consiste em uma carga uniforme de 9,52 kN/m na direção longitudinal. Ela é distribuída transversalmente em uma largura de 3,05 m.

Portanto, a carga móvel a ser utilizada será:

- o efeito combinado do eixo tandem padronizado e a faixa de carga de projeto, ou
- o efeito combinado de um caminhão padrão e a faixa de carga de projeto, e
- para vigas contínuas, tanto para momentos negativos como para reações de apoio, ambos nos apoios internos, a combinação de 90% do efeito de dois caminhões padrão (espaçados no mínimo 15,24 m entre o eixo dianteiro de um e o eixo traseiro do outro) com 90% do efeito da faixa de carga de projeto. A distância entre os eixos de 145,14 kN é de 4,27 m.

Os eixos que não contribuem para o efeito mais desfavorável não devem ser levados em conta. Todas as faixas de projeto e as cargas devem ser posicionadas para que se tenha o efeito mais desfavorável. O caminhão de projeto e o eixo tandem padronizado são posicionados, transversalmente, de modo que a distância mínima para o guarda-rodas ou a guia seja de 0,61 m.

2.3.3 Impacto

A Norma Americana, assim como a Norma Brasileira, possui um coeficiente que leva em conta o efeito dinâmico das cargas móveis, chamado de coeficiente de impacto. O impacto é considerado no cálculo da superestrutura e dos pilares, não devendo ser considerado no projeto da infraestrutura. Normalmente também não se considera impacto nas faixas de carga e nas cargas provenientes de pedestres.

Segundo a *STD Specifications*, o coeficiente de impacto é igual a $(1+I)$, com I sendo dado por:

$$I = \frac{15,24}{\ell + 38,10} \leq 0,3, \text{ onde:} \quad (2.3)$$

l – comprimento em metros do vão carregado para momentos provenientes dos caminhões; comprimento do trecho carregado do vão até o apoio mais distante, para força cortante proveniente de caminhões.

Na *LRFD Specifications*, o fator de impacto é dado por $(1+IM)$, onde IM é dado por: 75% para juntas de laje em todos os estados limites; 15% para os outros elementos no estado-limite de fadiga, e 33% para os estados limite restantes.

2.3.4 Combinação Última de Ações

A *STD Specifications* estabelece algumas combinações de carregamentos a serem verificadas, levando-se em conta a simultaneidade das ações variáveis. A combinação onde as cargas móveis verticais são predominantes estabelece um coeficiente de segurança do lado das solicitações, γ_f de 2,17. Já a *LRFD Specifications*, para o mesmo caso de combinação para verificação na ruptura, estabelece um coeficiente majoração das ações de 1,75.

CAPÍTULO 3

CARGAS ÚLTIMAS - COMPARAÇÕES ENTRE NORMAS

3.1 ANÁLISES EFETUADAS

Foram analisadas pontes de seção celular de diversos vãos isostáticos e consideradas todas as três normas em estudo neste trabalho. As seções celulares foram escolhidas para análise porque são bastante comuns nos dias de hoje e permitem facilidade de cálculo, por serem analisadas como vigas únicas.

Por se entender que sejam as mais importantes no dimensionamento, foram analisadas as seções do meio do vão nas vigas isostáticas, para momento fletor

máximo, e seção adjacente ao apoio, para força cortante máxima. Também foram analisadas vigas contínuas com dois vãos, idênticos, para momento fletor máximo positivo, no vão, e momento fletor máximo negativo, no apoio central. Em todos os casos, os esforços solicitantes foram calculados através de linhas de influência. No caso das vigas contínuas, utilizou-se linhas de influência fornecidas em Zellerer (1967).

Em relação à seção transversal, foram analisados dois tipos de obras, pistas simples e pistas duplas. Em rodovias de pista simples, com duas faixas de tráfego e dois acostamentos laterais, a largura adotada, segundo normalização do DER-SP, a largura trafegável é de 13,0 m. Já em rodovias de pista dupla, tem-se duas faixas de tráfego, acostamento lateral e refúgio central, totalizando 11,0 metros de largura para o tráfego (figuras 3.1 e 3.2). Como se tratam de seções celulares, toda a largura possível foi carregada em cada ponte.

Figura 3.1 – Seção Transversal em ponte para pista simples

Figura 3.2 – Seção Transversal em ponte para pista dupla

3.2 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Inicialmente observamos os resultados de momento fletor para a ponte biapoiada. Ao se variar o vão e determinar os valores de cálculo das cargas variáveis para

Estado Limite Último, foram obtidos os resultados apresentados nos gráficos das figuras 3.3 e 3.4, para pista simples e pista dupla, respectivamente.

Pode-se observar que, no caso da obra em pista simples (figura 3.3), os resultados da Norma Brasileira, do *Eurocode* e da Norma Americana praticamente coincidem até um vão de 50 metros. A partir daí os valores da Norma Americana são menores em relação às outras duas normas. Os esforços de cálculo segundo a Norma Brasileira e o *Eurocode* coincidem até aproximadamente 100 metros de vão. Então, os resultados da Norma Brasileira passam a crescer em relação ao *Eurocode*. No caso extremo, de obras com 200 metros de vão, o resultado pela Norma Brasileira é 11,8% superior ao *Eurocode*.

Já no caso da obra em pista dupla (fig. 3.4), os resultados da Norma Brasileira e da Norma Americana praticamente coincidem até um vão de 70 m. A partir daí os valores da Norma Americana são sempre menores em relação à Brasileira. Pode-se dizer que os valores de acordo com a Norma Brasileira e do *Eurocode* são praticamente coincidentes para todos os vãos a partir de 80 metros, com o *Eurocode* superando a Norma Brasileira em, no máximo, 10,7%. Ao se atingir o vão de 200 metros os resultados brasileiros superam os europeus em 3,6%.

Figura 3.3 – Pontes Biapoiadas em Pista Simples – Momentos Fletores

Figura 3.4 – Pontes Biapoiadas em Pista Dupla – Momentos Fletores

Em relação à força cortante, apresentamos os gráficos nas figuras 3.5 e 3.6, para a obra biapoiada. Eles representam os resultados para a obra em pista simples e em pista dupla, respectivamente.

Pode-se observar que, no caso da obra em pista simples e 10 metros de vão os resultados europeus e americanos para força cortante são 36,1% superiores aos brasileiros. Os resultados da Norma Brasileira, do *Eurocode* e da Norma Americana praticamente coincidem até um vão de 50 metros. A partir daí os valores da Norma Americana se reduzem, em relação às outras duas normas. Mais uma vez os esforços de cálculo segundo a Norma Brasileira e o *Eurocode* caminham com valores próximos ao aumentarmos o vão, com estes últimos sendo 11,8% superiores com 200 metros de vão.

Já no caso da obra em pista dupla, os resultados da Norma Brasileira, do *Eurocode* e da Norma Americana possuem pequenas diferenças até um vão de 70 metros. A partir daí os valores da Norma Americana são menores que os da Norma Brasileira. Observa-se que os valores da Norma Brasileira e do *Eurocode* são sempre próximos

para vãos a partir de 100 metros, atingindo, no vão de 200 metros, uma diferença de 4,0%.

Figura 3.5 – Pontes Biapoiadas em Pista Simples – Forças Cortantes

Figura 3.6 – Pontes Biapoiadas em Pista Dupla – Forças Cortantes

Foram analisadas também obras contínuas, com dois vãos iguais e pista dupla, para o cálculo de momento fletor. As seções estudadas foram a de máximo momento fletor positivo, no vão, e máximo momento negativo, no apoio central.

O gráfico 3.7 nos apresenta os resultados para vários vãos, de 10 a 200 metros do momento máximo positivo de cálculo segundo as três normas analisadas. Observa-se que, assim como nas obras biapoiadas, quando temos 2 vãos, a Norma Americana continua a apresentar resultados menores em relação às outras normas para este esforço. Novamente pode-se apurar que a Norma Brasileira e o *Eurocode* apresentam valores muito próximos para todos os vãos analisados. Para vão de 80 metros a diferença é de 12,3% a favor da Norma Européia. Ao se aumentar o vão, esta diferença diminui, e a norma brasileira ultrapassa em valores a européia, sendo, para 200 metros de vão, 3,0% maior.

Já no caso do máximo momento negativo (figura 3.8) observa-se que os resultados da Norma Brasileira e o *Eurocode* coincidem para vãos de até 70 metros, e a partir deste ponto, se afastam, com a nossa norma ficando com valores maiores. Para 200 metros de vão, a Norma Brasileira apresenta resultados 10,8% maiores que a Norma Européia. Já a Norma Americana apresenta sempre resultados menores que as outras duas normas em estudo.

Figura 3.7 – Pontes de 2 vãos em Pista Dupla – Momentos Fletores Positivos

Figura 3.8 – Pontes de 2 vãos em Pista Dupla – Momentos Fletores Negativos

Observa-se que, apesar de aparentemente apresentarem formas de cálculo distintas, a Norma Brasileira e o *Eurocode*, para os casos analisados, apresentam resultados muito próximos e muitas vezes idênticos. Já a Norma Americana apresenta valores menores de esforço que a Norma Brasileira tanto para obras biapoiadas como para obras contínuas. Assim, pode-se concluir que os resultados de momento fletor e força cortante no estado limite último para a Norma Brasileira são compatíveis com as demais normas analisadas.

CAPÍTULO 4

OS VEÍCULOS DE CARGA QUE

TRAFEGAM NAS RODOVIAS DO

BRASIL

4.1 INTRODUÇÃO

A consideração das cargas devido aos veículos que circulam nas pontes depende de vários fatores. Os caminhões em tráfego não são padronizados, e, embora existam classificações quanto à quantidade e tipo de eixos dos veículos, pouco se pode afirmar a respeito da distribuição desses eixos. A malha rodoviária brasileira recebe diariamente milhões de veículos de diferentes configurações e cargas por eixo, o que torna muito difícil a padronização das cargas a considerar em uma análise.

Nos últimos anos diversas possibilidades de veículos de carga e ônibus têm sido utilizadas. Além disso, tem-se o o crescimento acentuado do tráfego de CVCs – Combinações de Veículos de Carga, que não possuem nomenclatura padronizada. O que se tem, na prática, são nomes populares, como “toco”, “truque”, “carreta”, “romeu e julieta”, “bitrenzinho”, “bitrenção”, “rodotrem”, “treminhão”, “tritrem”, e outros, nos regulamentos do CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito, bem como em trabalhos técnico-científicos e projetos de engenharia.

A nomenclatura existente é imprecisa no que diz respeito às distâncias entre eixos e conjuntos de eixos dos veículos. Widmer (2004) demonstra preocupação com esta nomenclatura propondo um esquema de denominação mais detalhado, que permita identificar de forma inequívoca uma impressão digital do veículo, ou combinação de veículos, para que os diversos agentes do sistema de transporte rodoviário, pesquisadores, fabricantes, operadores, legisladores e outros, possam usar uma linguagem mais precisa, que identifique características importantes que descrevem o veículo, ou a composição veicular, tais como, número de unidades que compõe o veículo, tipo de engate entre as unidades veiculares no caso de CVCs, o número e a configuração dos conjuntos de eixos e também o tipo de rodagem utilizado nos eixos. Neste trabalho é utilizada a nomenclatura do Departamento Estadual de Estradas de Rodagem de São Paulo - DER-SP e do Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes – DNIT, para os veículos e CVCs.

4.2 TIPOS DE VEÍCULOS USUAIS

Os eixos dos veículos podem ser classificados como:

- **EIXOS SIMPLES:** conjunto de duas ou mais rodas, cujos centros estão em um plano transversal vertical ou podem ser incluídos entre dois planos transversais distantes de 100 cm, que se estendem por toda a largura do veículo. Podem ser de dois tipos:

DE RODAS SIMPLES: com 2 rodas, uma em cada extremidade;

DE RODAS DUPLAS: com 4 rodas, sendo duas em cada extremidade (4 pneus)

- EIXOS TANDEM (RODAS DUPLAS): são dois ou mais eixos que constituem um conjunto integral de suspensão, podendo qualquer deles ser ou não motriz. Eles estão ligados a um dispositivo de suspensão que distribui a carga igualmente entre os eixos (balancim). O conjunto desses eixos constitui um eixo tandem. Podem ser:

TANDEM DUPLO: 2 eixos com 2 rodas em cada extremidade (8 pneus), sendo nos fabricantes nacionais, o espaçamento médio de 1,36 m

TANDEM TRIPLA: 3 eixos, com 2 rodas em cada extremidade (12 pneus)

- EIXO DUPLO NÃO EM TANDEM: com 2 eixos, rodas duplas (8 pneus), mas com espaçamento entre eixos superior a 2,00 m.

O código adotado pelo DER-SP e pelo DNIT para a classificação dos veículos, ainda não regulamentado, é dado por:

nSm – cavalo mecânico com n eixos transportando uma unidade rebocada do tipo semi-reboque (S) de m eixos;

nIm – a substituição da letra S pela letra I indica que os m eixos estão espaçados de mais de 2,4 metros, aumentando a carga possível;

nCm – caminhão plataforma com n eixos transportando um reboque acoplado com m eixos. Se m for omitido, o caminhão não possui unidade rebocada.

No entanto, a classificação acima não descreve completamente os tipos de veículos. Dentro de cada categoria é possível encontrar variabilidade nas distâncias entre eixos, devido às diferentes utilizações dos veículos. As figuras 4.1 a 4.4 apresentam diversos exemplos de veículos de carga em circulação.

Figura 4.1 – veículos 2S3 e 3S3 curtos – destinados ao transporte de areia e grãos

Figura 4.2 – veículos 2S3 e 3S3 longos – destinados ao transporte de graneis líquidos e carga geral

Figura 4.3 – veículo 2I3 – destinado ao transporte de graneis líquidos

Figura 4.4 – veículo 3C2

4.3 CARGAS PERMITIDAS

O Código de Trânsito Brasileiro – CTB foi sancionado em 23 de setembro de 1997 (Lei Nº. 9.503, 1997), substituindo o antigo Código Nacional de Trânsito, que datava de 1966. O CTB entrou em vigor em 22 de janeiro de 1998, após 120 dias da publicação no Diário Oficial da União.

No que se refere a limitações na área do transporte de cargas, os elementos de maior interesse são os seguintes:

“Art. 99. Somente poderá transitar pelas vias terrestres o veículo cujo peso e dimensões atenderem aos limites estabelecidos pelo CONTRAN.

§ 1º O excesso de peso será aferido por equipamento de pesagem ou pela verificação de documento fiscal, na forma estabelecida pelo CONTRAN.

§ 2º Será tolerado um percentual sobre os limites de peso bruto total e peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias, quando aferido por equipamento, na forma estabelecida pelo CONTRAN.

Art. 100. Nenhum veículo ou combinação de veículos poderá transitar com lotação de passageiros, com peso bruto total, ou peso bruto total combinado com peso por eixo, superior ao fixado pelo fabricante, nem ultrapassar a capacidade máxima de tração da unidade tratora.

Art. 231. Transitar com o veículo:

V - Com excesso de peso, admitido percentual de tolerância quando aferido por equipamento, na forma a ser estabelecida pelo CONTRAN:

Infração - média (80 UFIR, 4 pontos);

Penalidade - multa acrescida a cada duzentos quilogramas ou fração de excesso de peso apurado, constante na seguinte tabela:

- a) até seiscentos quilogramas - 5 (cinco) UFIR;*
- b) de seiscentos e um a oitocentos quilogramas - 10 (dez) UFIR;*
- c) de oitocentos e um a mil quilogramas - 20 (vinte) UFIR;*
- d) de um mil e um a três mil quilogramas - 30 (trinta) UFIR;*
- e) de três mil e um quilogramas a cinco mil quilogramas - 40 (quarenta) UFIR;*
- f) acima de cinco mil e um quilogramas - 50 (cinquenta) UFIR;*

Medida administrativa - retenção do veículo e transbordo da carga excedente;

Art. 275. O transbordo da carga com peso excedente é condição para que o veículo possa prosseguir viagem e será efetuado às expensas do proprietário do veículo, sem prejuízo da multa aplicável.”

A regulamentação do Código de Trânsito Brasileiro e o perfeito entendimento se dá através das resoluções emitidas pelo CONTRAN. Em relação às cargas máximas permitidas para os veículos, podemos citar:

- Resolução n.º 12 de 6 de fevereiro de 1998. Estabelece limites de peso e dimensões para veículos que transitam por vias terrestres;
- Resolução n.º 102 de 20 de setembro de 1999. Dispõe sobre a tolerância Máxima do peso bruto de veículos;

- Resolução n.º 104 de 21 de dezembro de 1999. Define o PBT e o PBTC como critérios para aferição do peso e emissão de multas. Isenta de multas excessos de peso verificados em eixos isolados. Autoriza o controle através da nota fiscal;
- Resolução n.º 114 de 12 de maio de 2000. Admite uma tolerância de 5% sobre o peso declarado na nota fiscal;
- Resolução n.º 68 de 23 de setembro de 1998. Requisitos de segurança necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC;
- Resolução n.º 164 de 10 de setembro de 2004. Dispensa de autorização especial de tráfego para CVC's com PBTC entre 450 e 570 kN.
- Resolução n.º 184 de 21 de outubro de 2005. Altera as Resoluções 12/98 e 68/98 e revoga a Resolução 76/98.

Em relação às cargas totais permitidas, é importante citar os conceitos inseridos na legislação:

- Peso Bruto Total - PBT é o peso máximo que o veículo pode transmitir ao pavimento, considerando a tara mais a lotação (carga máxima útil);
- Peso Bruto Total Combinado - PBTC é o peso máximo que pode ser transmitido ao pavimento pela combinação de um caminhão trator mais seu semi-reboque (veículo de um ou mais eixos que se apóia na sua unidade tratora ou é a ela ligado por meio de articulação) ou de caminhão trator mais seu reboque (veículo destinado a ser engatado atrás de veículo automotor);

- A largura máxima permitida para os veículos circulantes é de 2,60 m, e os comprimentos permitidos totais podem variar, conforme a tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Limites para o comprimento dos veículos

Tipo de veículo	Comprimento máximo
Veículos simples	14,00 m
Veículos articulados	18,15 m
Veículos com reboque	19,80 m

Em relação aos limites de cargas, resumidamente tem-se:

- o limite máximo do PBT ou PBTC é de 450 kN ;
- o limite máximo de peso bruto por eixo simples isolado, equipado com rodado duplo é de 100 kN ;
- o limite máximo de peso bruto por eixo simples isolado, equipado com rodado simples é de 60 kN ;
- o limite máximo de peso bruto por eixo tandem duplo, quando a distância entre dois planos verticais que contenham os centros das rodas for superior a 1,20 m ou inferior (ou igual) a 2,40 m é de 170 kN ;
- o limite máximo do peso bruto por eixo tandem triplo (aplicável somente para semi-reboques), quando a distância entre os três planos verticais que contenham os centros das rodas for superior a 1,20 m e inferior (ou igual) a 2,40 m é de 255 kN ;
- nenhum veículo ou combinação de veículo poderá transitar com PBT ou PBTC superior ao fixado pelo fabricante, nem ultrapassar a capacidade máxima de tração da unidade tratora;

Segundo Albano *et al.* (2002), o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem - DAER, do Rio Grande do Sul, através da Comissão de Circulação Viária conclui em estudos que muitos veículos estão saindo de fábrica com capacidade de carga por eixo maior do que a estabelecida pela legislação.

Ainda segundo Albano *et al.* (2002), nos Estados Unidos os limites de carga de eixos tandem, duplos ou triplos são controlados desde a publicação, em 1964, através da *Secretary of Commerce*, da tabela de cargas brutas permissíveis para proteger as estruturas de pontes. A referida tabela foi confeccionada com base na chamada Fórmula B (Federal Bridge Formula) que considera o limite de peso em função das tolerâncias admissíveis, da distância entre grupos de eixos consecutivos e ainda do número de eixos. A limitação para eixos simples é definida pelo efeito provocado pelas cargas sobre a estrutura dos pavimentos.

O autor apresenta ainda a tabela 4.2, com a comparação entre os limites de carga máxima autorizados nos EUA e Europa e Brasil.

Tabela 4.2 – Comparação entre os Limites de Carga do Brasil com EUA e Europa.
(Albano *et al.*, 2002)

Situação / Carga (kN)	Brasil	EUA	Europa
Eixo Simples com rodado duplo	60	-	100
Eixo Simples com rodado duplo	100	89	100
Eixo Tandem Duplo	170	151,3	160
PBT	450	356	440

Os limites de PBT e da carga por eixo estão em vigor no Brasil desde 1985 (Lei n.º 7.408/85). Posteriormente, foi concedida uma tolerância de 5,0%, alegando-se falta de precisão das balanças.

4.4 COMBINAÇÕES DE VEÍCULOS DE CARGA

As combinações de veículos de carga – CVC são composições constituídas por mais de duas unidades, semireboques ou reboques, incluindo a unidade tratora, podendo ser treminhões, rodotrens, tritrens, e com duas articulações, bitrens. Em legislação específica (resoluções n.º 68/98 e 184/05 do CONTRAN) são estabelecidos os limites para a sua utilização:

- O Peso Bruto Total Combinado - PBTC máximo permitido é igual a 740 kN, respeitando-se os limites de peso por eixo previstos anteriormente;
- As CVCs com PBTC superior a 570 kN e menor ou igual a 740 kN deverão ter comprimento igual ou superior a 25 metros, não podendo ultrapassar 30 metros;
- Nas Combinações com Peso Bruto Total Combinado - PBTC de no máximo 570 kN, o cavalo mecânico poderá ser de tração simples e equipado com 3º Eixo;
- As Combinações de Veículos de Carga - CVC com Peso Bruto Total Combinado - PBTC superior a 570 kN e até 740 kN deverão possuir Autorização Especial de Trânsito - AET, fornecida pelo Órgão executivo Rodoviário da União, dos Estados, dos Municípios e do Distrito Federal, determinando o trecho a ser percorrido.

A Resolução nº. 184/05 de 21/10/2005 passou a permitir que as CVCs com PBTC até 570 kN, com até 7 eixos, comprimento entre 17,5 m e 19,8 m e que obedeçam às normas da ABNT quanto ao acoplamento das unidades, poderiam circular sem a necessidade de AET. Isso reflete a disseminação das CVCs conhecidas como Bitrens nas rodovias brasileiras. Segundo dados da concessionária *Centrovias Sistemas Rodoviários S. A.*, do interior paulista, este veículo já corresponde a quase 10% do total de veículos comerciais em circulação no seu trecho.

As figuras 4.5 a 4.8 apresentam esquematicamente algumas CVCs contidas na resolução nº. 68/ 98 do CONTRAN.

Figura 4.5 - Romeu e Julieta (caminhão trucado + reboque) – até 500 kN

Figura 4.6 - Bitrem articulado – até 570 kN – comprimento de 19,8 metros

Figura 4.7 - Tritrem – até 740 kN – comprimento de 30 metros

Figura 4.8 - Rodotrem - até 740 kN – comprimento de 30 metros

Devido ao surgimento das CVCs - Combinações de Veículos de Carga, faz-se necessária a adoção de mais algumas classes, de acordo com o DNIT:

nDm – combinação dotada de 2 articulações;

nTm – combinação dotada de 3 articulações;

nQm – combinação dotada de 4 articulações.

Novamente o número n indica a quantidade de eixos da unidade tratora, enquanto m indica a quantidade de eixos da unidade rebocada. As figuras 4.9 a 4.11 apresentam exemplos desta nova nomenclatura.

Figura 4.9 – veículo 3T6 (9 eixos – 740 kN)

Figura 4.10 – veículo 3Q4 (7 eixos - 630 kN)

Figura 4.11 – alguns exemplos de utilização do veículo 3D4 (7 eixos – 570 kN)

CAPÍTULO 5

CONCEITOS ESTATÍSTICOS

5.1 INTRODUÇÃO

Como neste trabalho busca-se a análise estatística de cargas atuantes nas pontes e viadutos das rodovias brasileiras, torna-se importante primeiramente a apresentação de alguns conceitos utilizados nesta análise.

Segundo Fusco (1977), pode-se conceituar a Estatística como sendo o ramo da ciência que lida com os dados obtidos pela contagem ou pela medida das propriedades de populações de fenômenos naturais, entendendo-se por fenômeno natural qualquer evento do mundo exterior. Portanto, a Estatística lida com as propriedades dos conjuntos de fenômenos, não se preocupando com cada um deles individualmente.

A Estatística busca inferir conclusões e resultados de fenômenos aleatórios. A grande importância da análise estatística se encontra na condensação da informação, possibilitando maior clareza na análise e a facilitação da tomada de decisão nas situações de incerteza.

Na engenharia estrutural, a Estatística possui papel fundamental, dadas as diversas incertezas envolvidas nos valores dos parâmetros utilizados em projetos.

5.2 TEORIA DAS PROBABILIDADES

Segundo Lagrange, a probabilidade de um evento é a relação entre o número de casos em que ele ocorre e o número total de casos. Por exemplo, em um lançamento de um dado não viciado, a probabilidade de que saia um determinado número é de 1 em 6.

Já Von Mises trata a probabilidade de um evento como sendo o limite para o qual tende a frequência relativa com que esse evento é observado numa série independente de ensaios, dentro das mesmas condições. É o caso, por exemplo, da determinação da resistência à compressão do concreto.

Bayes define probabilidade de um evento como o grau de confiança de um indivíduo na ocorrência desse evento. Entre os exemplos, pode-se citar a avaliação subjetiva na inspeção de uma estrutura.

5.3 FENÔMENOS ALEATÓRIOS

Conceitua-se um fenômeno aleatório como aquele em que, após algumas medidas de uma certa variável, não se tem um valor fixo como resultado, mas uma certa regra de repetição para esses valores. Entre os fenômenos aleatórios, podemos citar

a resistência à compressão do concreto, a carga acidental em um painel de laje, a capacidade resistente à flexão da viga de uma ponte, ou a vazão de um rio.

A frequência de um resultado é dada por:

$$F = (\text{no. de resultados iguais a } x) / \text{no. total de resultados}$$

Podemos representar os resultados dos fenômenos aleatórios em histogramas, que são diagramas constituídos por colunas que representam a frequência de cada valor possível para a variável estudada. Sobre o histograma, pode-se traçar uma curva que representa a tendência de aparecimento dos valores, chamada de polígono de frequências ou densidade de probabilidade.

Figura 5.1 – Exemplo de histograma e polígono de frequências – variável: passagem diária de um tipo de veículo em um determinado ponto de uma rodovia

Normalmente, em uma distribuição, é importante calcular-se as medidas de locação da distribuição. Elas são a média, a moda e a mediana. A média aritmética é a soma dos diversos valores observados para a variável divididos pela quantidade total de observações, dada pela fórmula abaixo.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.1)$$

Já a moda é o valor mais freqüente da distribuição e a mediana, o valor correspondente à freqüência acumulada de 50%.

Já as medidas de dispersão podem ser a variância, o desvio padrão, o coeficiente de variação e a assimetria da distribuição. As fórmulas para essas medidas, respectivamente, são dadas a seguir.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (5.2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (5.3)$$

$$C.Var. = \frac{s}{\bar{x}} \quad (5.4)$$

Os histogramas refletem apenas as propriedades da amostra tomada, muitas vezes não representando a população como um todo. Por isso, torna-se necessária a utilização das distribuições contínuas. Neste caso, tem-se a função densidade de probabilidade, usualmente dada por $f_X(x)$ que corresponderia ao histograma da distribuição discreta, e a função de distribuição acumulada, $F_X(x)$, que apresenta as freqüências acumuladas da distribuição. As duas funções de distribuição podem ser relacionadas como a seguir.

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (5.5)$$

No caso das distribuições contínuas, os parâmetros também são importantes. Respectivamente, a média (μ_X) e o desvio padrão (σ_X), são dados por:

$$\mu_X = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_X(x) dx \quad (5.6)$$

$$\sigma_X^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x_i - \mu_X)^2 f_X(x) dx \quad (5.7)$$

5.4 FUNÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES

5.4.1 Distribuição Uniforme

A distribuição uniforme (também chamada de distribuição retangular) possui uma função densidade de probabilidade constante entre os seus dois parâmetros, a , o mínimo, e b , o máximo. As funções densidade de probabilidade, $f_X(x)$ e, de probabilidade acumulada, $F_X(x)$, são dadas por:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{se } a < x < b \\ 0 & \text{se } x \leq a \text{ ou } x \geq b \end{cases} \quad (5.8)$$

$$F_X(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (5.9)$$

Figura 5.2 – Função densidade de probabilidade e de probabilidade acumulada para a distribuição uniforme (Getachew, 2003)

5.4.2 Distribuição Exponencial

A variável estocástica X é dita como exponencialmente distribuída quando as suas funções densidade de probabilidade, $f_X(x)$ e, de probabilidade acumulada, $F_X(x)$, são dadas por:

$$f_X(x) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda x) & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

$$F_X(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < 0 \\ 1 - \exp(-\lambda x) & \text{se } x \geq 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

onde λ é uma constante maior que zero.

Figura 5.3 – Função densidade de probabilidade e de probabilidade acumulada para a distribuição exponencial (Getachew, 2003)

5.4.3 Distribuição Normal

A distribuição Normal é utilizada para descrever a variabilidade de diversos fenômenos naturais. É a distribuição mais conhecida, principalmente por suas várias propriedades matemáticas.

A variável aleatória X é dita como normalmente distribuída quando a sua função densidade de probabilidade, $f_X(x)$ é dada por:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (-\infty < x < \infty) \quad (5.12)$$

onde μ e σ são, respectivamente, a média e o desvio padrão da variável X . A distribuição normal muitas vezes é representada como $N(\mu, \sigma)$.

A função de probabilidade acumulada é dada, através de integração, por:

$$F_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (5.13)$$

Figura 5.4 – Função densidade de probabilidade e de probabilidade acumulada para variável aleatória com distribuição normal com média 0 e diferentes desvios-padrão

(Getachew, 2003)

Tem-se a distribuição normal padrão ou reduzida quando $\mu = 0$ e $\sigma = 1$. Assim, as funções densidade, $\phi(x)$ e acumulada, $\Phi(x)$ reduzem-se a:

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right), \quad (-\infty < x < \infty) \quad (5.14)$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (5.15)$$

5.4.4 Distribuição Lognormal

A distribuição Lognormal ocorre na prática quando o logaritmo natural de uma variável aleatória possui distribuição normal. As funções densidade de probabilidade, $f_X(x)$ e, de probabilidade acumulada, $F_X(x)$, são dadas por:

$$f_X(x) = \frac{1}{\zeta_X \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \lambda)^2}{2\zeta^2}\right), \quad (0 < x < \infty) \quad (5.16)$$

$$F_X(x) = \frac{1}{\zeta_X \sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{(\ln x - \lambda)^2}{2\zeta^2}\right) dx \quad (5.17)$$

onde

$$\mu = \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right) \quad (5.18)$$

$$\sigma = \mu \sqrt{\exp(\zeta^2) - 1} \quad (5.19)$$

Figura 5.5 – Função densidade de probabilidade e de probabilidade acumulada para variável aleatória com distribuição lognormal (Getachew, 2003)

5.4.5 Distribuições Multimodais

Alguns resultados de pesagens de veículos mostraram que o peso bruto obedece a uma distribuição multimodal. Segundo Getachew (2003), estudos numerosos mostraram que isso pode ser representado pela soma de distribuições normais. Frequentemente distribuições multimodais são resultados de diferentes populações. Elas podem ser escritas como a soma de diversas distribuições normais:

$$F_X(x) = \sum_{i=1}^n p_i \Phi\left(\frac{x - \mu_i}{\sigma_i}\right) \quad (5.20)$$

onde p_i , μ_i e σ_i são respectivamente, a proporção, a média e o desvio padrão para o modo i . Para toda a população, são válidas as expressões:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (5.21)$$

$$\mu = \sum_{i=1}^n p_i \mu_i \quad (5.22)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^n p_i (\mu - \mu_i)^2} \quad (5.23)$$

Na figura 5.6, apresentam-se as funções densidade de probabilidade correspondentes a $N(\mu_i, \sigma_i)$ e a função de probabilidade acumulada $F_X(x)$, para $n = 2$. A curva contínua mostra a distribuição bimodal, que corresponde à soma de duas distribuições normais com diferentes médias e desvios padrão.

Figura 5.6 – Função densidade de probabilidade de Distribuição Normal Bimodal
(Getachew, 2003)

5.5 PERÍODO DE RETORNO

Dado um evento $\mathcal{A}$, e seja T o intervalo de tempo aleatório entre ocorrências consecutivas do evento $\mathcal{A}$. A média, τ , da variável aleatória T é chamado de período de retorno, PR_T , do evento $\mathcal{A}$. Portanto, se x é o quantil $(1 - \alpha)$ da variável aleatória para a carga ou o seu efeito, então o período de retorno, PR_T pode ser expresso por:

$$PR_T \cong \frac{-T}{\ln(1-\alpha)} \cong \frac{T}{\alpha} \quad 0 < \alpha \ll 1 \quad (5.24)$$

onde T é o chamado período de referência.

Se $F_X(x)$ é a função de distribuição acumulada dos máximos anuais de uma variável aleatória, o período de retorno da variável aleatória para exceder o valor de x é $1/[1-F_X(x)]$ anos. Da mesma forma, se $F_X(x)$ é a função de distribuição acumulada dos mínimos anuais de uma variável aleatória, o período de retorno da variável para estar abaixo do valor x é $1/F_X(x)$ anos.

Nota-se que se uma estrutura vai a colapso quando, e somente quando, o evento $\mathcal{A}$ ocorre, isso significa que o seu período de vida útil coincide com o período de retorno de $\mathcal{A}$. O conceito de período de retorno é muito importante em engenharia, por definir muitos critérios de projeto (Castillo, 1988).

5.6 DISTRIBUIÇÕES DE MÁXIMOS

Na consideração da segurança estrutural, é muito importante o estudo da estatística de extremos, que trata dos problemas envolvendo os valores “máximos” ou “mínimos” das variáveis aleatórias. No caso específico dos carregamentos, como se está sempre preocupado com as mais altas cargas que podem surgir na estrutura ao longo da sua vida útil, por isso, neste trabalho se tratará somente das distribuições de máximos.

Seja X uma variável aleatória com distribuição de probabilidades conhecida $F_X(x)$. Considerem-se amostras de tamanho n tomadas da população de X ; cada amostra será um conjunto de observações $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ representando respectivamente a

primeira, a segunda, ... e a n -ésima observação. Sendo esses valores independentes e identicamente distribuídos, e portanto, $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ uma amostra de variáveis aleatórias, define-se uma nova variável:

$$Y_n = \max(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

A distribuição de probabilidades de valores extremos pode ser entendida como nos termos das distribuições usuais de probabilidades. O valor máximo de uma amostra de tamanho n tomada de uma população X é também uma variável aleatória, cuja distribuição de probabilidades pode ser obtida da variável inicial X .

Observa-se que, se Y_n , o máximo entre $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ é menor que algum valor y , então todas as outras variáveis da amostra necessariamente serão menores que y . Como $X_1, X_2, \dots, X_n$ são estatisticamente independentes e identicamente distribuídas, como a variável inicial X , então podemos escrever:

$$\begin{aligned} P(Y_n \leq y) &= P(\max(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq y) \\ &= P(X_1 \leq y) \cdot P(X_2 \leq y) \cdot \dots \cdot P(X_n \leq y) \\ &= F_{X_1}(y) \cdot F_{X_2}(y) \cdot \dots \cdot F_{X_n}(y) \\ &= [F_X(y)]^n \end{aligned} \quad (5.25)$$

que é a função de probabilidade acumulada de Y_n .

Quando $n \rightarrow \infty$, a equação acima tende às distribuições de extremos assintóticas, classificadas por Gumbel (1958) em três tipos:

- Tipo I – a forma exponencial dupla

$$F_{Y_n}(y) = \exp\{-\exp[-A(n)y]\} \quad (5.26)$$

- Tipo II – a forma exponencial

$$F_{Y_n}(y) = \exp[-A(n)/y^k] \quad (5.27)$$

- Tipo III – a forma exponencial com limite superior w

$$F_{Y_n}(y) = \exp[-A(n)(w - y)^k] \quad (5.28)$$

onde

$A(n)$ é uma função e k , uma constante.

5.6.1 Valor Característico

5.6.1.1 Definição Matemática

Segundo a definição matemática de valor característico, esta é uma medida conveniente da locação de possíveis valores máximos (Castillo, 1988). Em uma amostra de tamanho n de uma variável inicial X , o número esperado de valores da amostra que sejam maiores que x é $n[1 - F_X(x)]$. O valor característico extremo, u_n , é definido como o valor particular de X tal que em uma amostra de tamanho n da população inicial X , o número esperado de amostras maiores que u_n é um, ou seja:

$$n \cdot [1 - F_X(u_n)] = 1,0 \Rightarrow F_X(u_n) = 1 - \frac{1}{n} \quad (5.29)$$

A probabilidade de ultrapassagem do valor característico no período é de:

$$1 - [F_X(u_n)]^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{n}\right)^n \quad (5.30)$$

quando $n \rightarrow \infty$, a expressão acima tende a $1 - e^{-1} \cong 0,6321$.

Isso significa que, entre a população dos possíveis valores máximos de amostras de tamanho n , cerca de 37% são menores que u_n ou 63% são maiores que u_n .

5.6.1.2 Definição de Engenharia

Segundo Getachew (2003), o valor característico corresponde a cargas certamente raras, e que possuem uma pequena probabilidade de ocorrência durante a vida útil da estrutura.

As ações representativas nas estruturas para verificação do estado limite último são definidas por valores característicos. Na Norma Européia (CEN, 2002), carga característica é definida como aquela correspondente a uma probabilidade limitada de ser excedida em uma ponte durante a sua vida útil.

Para o *Eurocode*, o valor característico para as cargas móveis é dado para um período de retorno de 1000 anos, ou seja, um valor com a probabilidade de ser excedido de 5% em 50 anos. Na norma Sueca e diversas normas internacionais, segundo Getachew (2003), o valor característico é definido pelo quantil 98% na distribuição de máximos anuais, ou seja, possui 2% de probabilidade de ser ultrapassado em 1 ano. Já na norma AASHTO LRFD, o valor característico das cargas móveis é dado pelo período de retorno de 75 anos, com a probabilidade de ser excedido de 67% em 50 anos.

A Norma NBR 8681 (ABNT, 2003) define os valores característicos das ações variáveis como sendo valores que têm de 25% a 35% de probabilidade de serem ultrapassados no sentido desfavorável, no período de 50 anos. Ao invés de definir um valor específico como outras normas, a norma brasileira trabalha com uma faixa de probabilidades, que corresponde a 0,57%~0,86% de ser atingida ao ano. A mesma norma estabelece um período convencional de referência de 50 anos para a construção da distribuição de extremos.

5.6.2 A Distribuição de Máximos de Gumbel – Tipo I

A função de probabilidade acumulada da forma assintótica de máximos do Tipo I é dada por:

$$F_X(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x - u)]\} \quad (5.31)$$

onde u e α são respectivamente, parâmetros de locação e de escala, definidos a seguir:

u : máximo valor característico da variável inicial X

α : medida inversa de dispersão da variável inicial X .

A média e o desvio padrão são respectivamente dados por:

$$\mu = u + \frac{\gamma}{\alpha}, \quad \gamma \cong 0,577216 \quad (\text{Número de Euler}) \quad (5.32)$$

$$\sigma = \frac{\pi}{\alpha\sqrt{3}} \quad (5.33)$$

A função densidade de probabilidade correspondente é:

$$f_X(x) = \alpha \cdot \exp\{-\alpha(x - u) - \exp[-\alpha(x - u)]\} \quad (5.34)$$

5.6.3 Outras Distribuições de Máximos

A Distribuição Assintótica do Tipo II de Gumbel possui funções de probabilidade acumulada e densidade de probabilidades dadas, respectivamente, por:

$$F_X(x) = \exp\left[-\left(\frac{u}{x}\right)^k\right] \quad (5.35)$$

$$f_X(x) = \frac{k}{u} \left(\frac{u}{x}\right)^{k+1} \exp\left[-\left(\frac{u}{x}\right)^k\right] \quad (5.36)$$

onde

w : máximo valor característico da variável inicial X

k : parâmetro de forma, $1/k$ é uma medida de dispersão.

Ambas as formas assintóticas do Tipo I e II são ilimitadas na direção dos extremos máximos. Já a Distribuição de Máximos do Tipo III possui um limite superior, dado por ω . As suas respectivas funções são:

$$F_X(x) = \exp\left[-\left(\frac{\omega - x}{\omega - w}\right)^k\right]; \quad x \leq \omega \quad (5.37)$$

$$f_X(x) = \frac{k}{\omega - w} \left(\frac{\omega - x}{\omega - w}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{\omega - x}{\omega - w}\right)^k\right]; \quad x \leq \omega \quad (5.38)$$

onde novamente w é o máximo valor característico da variável inicial X e k , o parâmetro de forma.

5.7 ESTIMATIVA EMPÍRICA DE PARÂMETROS

5.7.1 Introdução

Os fenômenos aleatórios possuem características probabilísticas que muitas vezes dificultam o seu entendimento, de modo que nem sempre é possível a utilização de distribuições de probabilidades conhecidas. Isso pode tornar muito difícil a obtenção das funções de probabilidades para uma determinada situação.

Na engenharia civil, o principal interesse está em pequenas probabilidades e portanto nas caudas das distribuições, isto é, na forma da função densidade de probabilidades distante do seu valor médio. De acordo com Schneider (1997), em muitos casos é mais importante que seja verificada a aproximação do histograma à cauda da distribuição que à região da média. Especificamente no caso das

resistências, a preocupação está na cauda inferior da distribuição, enquanto que no estudo das cargas e esforços, é muito importante a sua cauda superior. Ainda segundo Schneider (1997), é muito comum se utilizar de distribuições conhecidas para os estudos das estruturas, como por exemplo, distribuições lognormais e de Weibull¹ para resistências, distribuições de Gumbel para problemas de origem climática, distribuição normal para dimensões e imperfeições de qualquer natureza.

No escopo deste trabalho, diversas vezes se deparará com a necessidade de aproximar um histograma por uma distribuição contínua de probabilidades. Isso se fará no caso das probabilidades de passagem de veículos sobre a ponte, das próprias cargas brutas dos veículos, e, por fim, na extrapolação e estudo das distribuições de máximos esforços solicitantes para a estrutura, com a consequente determinação dos valores característicos.

5.7.2 Papéis de Probabilidade

Uma forma inicial de estimativa de parâmetros consiste em aproximar a média e o desvio padrão discretos aos de uma distribuição contínua. No entanto, conforme já explicado, a preocupação muitas vezes está nos valores extremos das distribuições, e não nos valores médios. É, portanto, necessário um método mais efetivo na determinação das distribuições apropriadas também nas regiões afastadas da média.

Dentro desse contexto, tem-se os papéis de probabilidade. Tratam-se de ferramentas importantes na determinação empírica de distribuições contínuas apropriadas a histogramas de distribuições discretas. Consistem de papéis convenientemente definidos para distribuições pré-estabelecidas, onde são plotados os dados da amostra, de forma que, se esses pontos configurarem aproximadamente retas, significa que a distribuição escolhida é apropriada.

¹ Também conhecida como a distribuição de extremos (mínimos) de Gumbel – Tipo III.

Obviamente, para cada distribuição conhecida há um papel de probabilidade diferente.

Segundo Ang e Tang (1975), se existem N observações $x_1, x_2, \dots, x_N$, o m -ésimo valor entre as N observações (em ordem crescente) é plotado no papel de probabilidades com a probabilidade acumulada $m/(N+1)$.

Os papéis de probabilidade mais comuns estão disponíveis no mercado e na literatura para plotagem manual dos dados. No entanto, com o advento do computador, tornou-se mais prático a utilização de planilhas que, inclusive, aproximam os pontos por retas através de regressão linear, de forma automática. Desta forma, é importante o conhecimento da construção de tais papéis, de modo que se possa reproduzi-los nas planilhas e se possa utilizar da ferramenta computacional. Este assunto é abordado de forma clara em Ang e Tang (1975) e é resumido a seguir.

5.7.2.1 O Papel de Probabilidade Normal

O papel de probabilidades correspondente à distribuição normal é construído com base na distribuição normal padrão. Um dos eixos representa os valores da variável X . No outro eixo, tem-se duas escalas paralelas; uma delas aritmética, que representa os valores da variável padrão s , enquanto o outro representa as probabilidades acumuladas $\Phi_S(s)$. Uma variável normal X com distribuição $N(\mu, \sigma)$ seria representada por uma reta passando por $\Phi_S(s_0) = 0,5$ e $X = \mu$. Particularmente, quando $\Phi_S(s_1) = 0,841$, $s_1 = 1$. Assim, a média e o desvio padrão da distribuição são dados por:

$$\mu = X(s_0) \tag{5.39}$$

$$\sigma = \frac{1}{X(s_1) - X(s_0)} \quad (5.40)$$

onde $X(s)$ é o valor da variável X para um determinado valor de s .

Figura 5.7 – Papel de Probabilidade Normal

Para a tornar possível a plotagem dos dados, é necessário, portanto, que se tenha a função $\Phi^{-1}_s(s) = s$, já que se dispõe deste valor, mas não do valor s , que é o que será plotado. Esta é uma função de difícil inversão, mas é facilmente encontrada em tabelas em livros de estatística. Além disso, planilhas como o *Microsoft Excel* já contém em suas fórmulas a inversa da distribuição normal padrão.

5.7.2.2 O Papel de Probabilidade Lognormal

Baseado no papel de probabilidades da distribuição normal, pode-se obter aquele correspondente à distribuição lognormal. Simplesmente substitui-se a escala aritmética dos valores da variável X por uma escala logarítmica. Desta forma, a variável padrão se torna:

$$s = \frac{\ln(X/x_m)}{\zeta} \quad (5.41)$$

onde x_m é a mediana de X .

Assim, tem-se uma reta definindo os valores s_0 e s_1 tais que $F_X(s_0) = 0,5$ e $F_X(s_1) = 0,841$.

$$\lambda = \ln[X(s_0)] \quad (5.42)$$

$$\zeta = \ln[X(s_1) / X(s_0)] \quad (5.43)$$

onde $X(s)$ é o valor da variável X para um determinado valor de s .

Assim, através das equações (5.18) e (5.19), obtêm-se a média e o desvio padrão. Novamente, deve-se ter a inversa da função de probabilidade acumulada lognormal padrão para a plotagem dos pontos.

Figura 5.8 – Papel de Probabilidade Lognormal

5.7.2.3 O Papel de Probabilidade Exponencial

No caso da distribuição exponencial, em um dos eixos estará a escala da variável padronizada s ; em um eixo paralelo, estará plotada a correspondente probabilidade acumulada $F_s(s) = 1 - \exp(-s)$. O eixo perpendicular representa os valores da variável X na escala aritmética. Neste caso, o coeficiente angular da reta corresponde ao fator λ da distribuição (equação 5.11).

Figura 5.9 – Papel de Probabilidade Exponencial

A função de probabilidade acumulada exponencial padrão é de fácil inversão, sendo dada por:

$$F_s^{-1}(s) = s = -\ln(1 - F_s(s)) \quad (5.44)$$

5.7.2.4 O Papel de Probabilidade de Gumbel

No caso da distribuição de extremos de Gumbel - Tipo I, a variável padronizada deve ser definida como:

$$S = \alpha \cdot (X - u) \quad (5.45)$$

Portanto, e, de acordo com a equação (5.31), tem-se:

$$F_s(s) = \exp[-\exp(-s)] \quad (5.46)$$

Um dos eixos representa os valores de s e suas correspondentes probabilidades $F_s(s)$, e no eixo perpendicular, os valores de X em escala aritmética. Se $F_s(s_0) = 0,368$, e s_1 convenientemente escolhido, tem-se os parâmetros da distribuição:

$$u = X(s_0) \quad (5.47)$$

$$\alpha = \frac{X(s_1) - X(s_0)}{X(s_1) - X(s_0)} \quad (5.48)$$

onde $X(s)$ é o valor da variável X para um determinado valor de s .

Figura 5.10 – Papel de Probabilidade de Gumbel

Conforme visto acima, α é dado pelo coeficiente angular da reta. Segundo Schneider (1997), é conveniente que se utilize $s_1=3$, tal que $F_s(s_1) = 0,951$, e, assim, aproxime-se a cauda superior da distribuição. Ainda de acordo com o mesmo autor, no caso de interesse em valores extremos, como na distribuição de máximos, os pontos para plotagem devem ser modificados para $(m - 0,4)/(N+0,2)$.

Assim como a distribuição exponencial, a função de probabilidade acumulada de Gumbel é de fácil inversão, dada por:

$$F_s^{-1}(s) = s = -\ln[-\ln(F_s(s))] \quad (5.49)$$

5.7.3 O Teste de Kolmogorov-Smirnov

Mesmo após a definição de uma distribuição teórica, muitas vezes é necessária a verificação da validade da distribuição assumida através de um teste de ajuste. Entre os testes mais utilizados, encontra-se o teste de *Kolmogorov-Smirnov*. É um teste que envolve a comparação entre a frequência acumulada discreta e uma função de distribuição acumulada previamente escolhida. Se a diferença entre os valores esperados teóricos e as amostras observadas forem maiores que o esperado pelo teste, o modelo teórico é rejeitado. (Ang e Tang, 1975)

Para uma amostra com tamanho n , organizam-se os dados em ordem crescente. Para a amostra ordenada, observa-se uma função de frequência acumulada “degrau”, dada por:

$$S_n(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < x_1 \\ \frac{k}{n} & \text{se } x_k \leq x \leq x_{k+1} \\ 1 & \text{se } x \geq x_n \end{cases} \quad (5.50)$$

Figura 5.11 – Frequência acumulada empírica $S_n(x)$ e função de distrib. acumulada $F(x)$
(Ang e Tang, 1975)

Onde $x_1, x_2, \dots, x_n$ são os valores da amostra ordenada, e n é o tamanho da amostra. A figura 5.11 mostra a função $S_n(x)$ e também a distribuição teórica proposta, $F(x)$. No teste, a máxima diferença entre $S_n(x)$ e $F(x)$ em todos os valores de X é a medida de discrepância entre o modelo teórico e os dados observados. A máxima diferença é dada, portanto, por:

$$D_n = \max |F(x) - S_n(x)| \quad (5.51)$$

Teoricamente, D_n é uma variável aleatória que depende de n . Para um determinado nível de significância α , o teste Kolmogorov-Smirnov compara a máxima diferença observada na equação acima com o valor crítico D_n^α , definido por:

$$P(D_n \leq D_n^\alpha) = 1 - \alpha \quad (5.52)$$

Os valores de D_n^α são apresentados em tabelas (Ang e Tang, 1975), para diferentes níveis de significância α . Segundo Ang e Tang (1975), um nível aceitável de significância em engenharia seria de 5%. Ainda de acordo com o mesmo autor, a vantagem do teste de Kolmogorov-Smirnov em relação a outros testes, como o teste do Qui-quadrado, é que não é necessário se dividir os dados em intervalos.

5.8 SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO

Segundo Ang e Tang (1984), simulação é o processo de se copiar o mundo real com base em uma série de suposições e modelos com base na realidade, podendo ser teórica ou experimental. As simulações numéricas ganham grande impulso nos dias de hoje, com a utilização maciça da ferramenta computacional, onde espaço para armazenagem e tempo de processamento não são exatamente o maior problema.

Para problemas estatísticos, que envolvam distribuições de probabilidades, tem-se a Simulação de Monte Carlo. Este método consiste na repetição de processos simulados com utilização de parâmetros que obedecem a alguma distribuição de probabilidade pré-estabelecida. Repetindo-se o processo, tem-se um conjunto de soluções de uma variável aleatória. Neste conjunto, cada amostra é similar a uma amostra de observações experimentais. Desta forma, o processo de Monte Carlo não é exato para quantidades finitas de amostras, a não ser que o seu tamanho tenda a infinito.

Seja $F_X(x)$ a função densidade de probabilidade de uma dada distribuição. Se forem gerados n números aleatórios u entre 0 e 1, que obedecem a uma distribuição uniforme, tais que $U=(U_1, U_2, \dots, U_N)$, para cada número de U corresponderá uma amostra da distribuição pré-estabelecida inicialmente.

A simulação das amostras está, portanto, na base do método. Para as distribuições usuais, isso pode ser feito da forma enumerada acima e mostrada na figura 5.12.

Figura 5.12 – Relação entre u e x (Ang e Tang, 1984)

Mais uma vez, tem-se um problema no qual é necessária a inversão da função de probabilidade acumulada das distribuições. No caso da Distribuição Normal e Lognormal isso pode ser feito por cálculo numérico, através de tabelas em livros de

estatística, ou ainda, através de algoritmos pré-estabelecidos em planilhas. Para a distribuições Exponencial e de Gumbel, como já mostrado anteriormente, a função inversa é facilmente encontrada por ferramentas matemáticas.

No caso da distribuição Normal Multimodal, pode-se utilizar do Método da Composição (Ang e Tang, 1984). Seja X a variável aleatória expressa pela função densidade de probabilidade:

$$f_X(x) = \sum_{i=1}^n p_i f_{X_i}(x) \quad (5.53)$$

onde $f_{X_i}(x)$; $i=1,2,...,n$ é uma série de funções densidade de probabilidades e p_i a probabilidade associada com $f_{X_i}(x)$. A geração de valores para a variável X pode ser efetuada em dois passos. Primeiramente, um número aleatório é gerado para a probabilidade p_i e a função correspondente $f_{X_i}(x)$. Em seguida, outro número aleatório é gerado de acordo com a função $f_{X_i}(x)$ selecionada inicialmente.

Assim, para uma distribuição bimodal de probabilidades, tem-se a sua função densidade de probabilidade:

$$f_X(x) = p_1 f_I(x) + (1 - p_1) f_{II}(x) \quad (5.54)$$

São gerados números u_1 e u_2 , aleatórios e uniformemente distribuídos. Portanto:

$$x = \begin{cases} F_I^{-1}(u_2); & \text{se } u_1 < p_1 \\ F_{II}^{-1}(u_2); & \text{se } u_1 \geq p_1 \end{cases} \quad (5.55)$$

Onde $F_I^{-1}(x)$ e $F_{II}^{-1}(x)$ são as inversas das funções de probabilidade acumulada que formam a distribuição bimodal.

As simulações de Monte Carlo serão utilizadas nas simulações de tabuleiros carregados por veículos, conforme se verá no capítulo 7.

CAPÍTULO 6

ESTUDO DAS CARGAS DE VEÍCULOS EM PONTES E VIADUTOS

6.1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (2005), o transporte rodoviário representou 46,8% do volume de carga transportada no país em 2004, com mais de 600 milhões de toneladas transportadas. Tudo isso em 1.597.374 km de rodovias, sendo 181.762 km de estradas pavimentadas. O Brasil conta com cerca de 2,9 milhões de veículos comerciais circulando nas estradas, rodovias e vias urbanas, compreendendo caminhões, carretas, combinações de veículos e ônibus. Todo esse volume também trafega pelas pontes e viadutos que se encontram presentes em toda a extensão da nossa malha rodoviária.

A normalização brasileira em engenharia de estruturas possui fortes raízes européias, como já descrito anteriormente. Isso pode ser observado nos diversos estudos implementados em vários países europeus a respeito das cargas móveis em pontes. A seguir, apresenta-se um panorama das pesquisas no mundo a respeito do assunto, e posteriormente os estudos desenvolvidos no Brasil.

6.2 A EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL

6.2.1 O Modelo de Moses e Ghosn

Moses e Ghosn (1985) desenvolveram programas de simulação para o estudo do carregamento de caminhões em pontes de pequenos e médios vãos.

A chegada de caminhões na ponte é modelada pelo processo de renovação de Markov, processo estocástico que se modifica de um estado a outro no domínio do tempo de forma que esses estados obedeçam à cadeia de Markov. Este processo pode ser adaptado para considerar a característica dos caminhões que chegam à ponte. É idealizado que o intervalo de tempo entre a chegada de dois caminhões subsequentes é independente e identicamente distribuído.

São considerados apenas dois tipos de veículos, o caminhão com um eixo dianteiro e dois eixos em tandem, traseiros (3C) e um caminhão com dois grupos de eixos em tandem, um intermediário e outro traseiro (3S2). O peso a ser considerado no veículo é proveniente do histograma de peso bruto.

Segundo explicação de Ferreira (2006): “A superfície da ponte é dividida em regiões e um evento de carregamento ocorre quando há pelo menos um caminhão em qualquer região. O primeiro caminhão que chega à ponte e que faz parte de um

evento de carregamento é considerado o caminhão “principal”, cuja probabilidade de estar em uma certa faixa de tráfego é obtida das estatísticas de tráfego da localidade considerada. Dadas as posições dos caminhões e o peso de todos os caminhões no evento, o máximo efeito é calculado através da linha de influência da ponte e associado a uma probabilidade (probabilidade da faixa ocupada pelo caminhão principal, vezes a probabilidade condicional das faixas ocupadas pelos caminhões seguintes, vezes a probabilidade da posição longitudinal do veículo na ponte, vezes a probabilidade dos pesos brutos). Esse procedimento assume independência entre as posições relativas dos caminhões e os pesos brutos e entre os pesos brutos dos diferentes caminhões no evento.”

O resultado dos momentos fletores é então associado a um histograma de probabilidade acumulada $F(x)$. O valor máximo em um determinado período é calculado determinando-se o número N de eventos ao longo da vida útil da estrutura. Como para pequenos e médios vãos o esforço solicitante é determinado para um veículo, a quantidade de veículos no período considerado será a quantidade de eventos. Assim, a distribuição de probabilidade dos efeitos máximos na vida útil da estrutura é dado por:

$$Gm(x) = F(x)^N \quad (6.1)$$

Moses e Ghosn (1985) propõem também um método simplificado para a determinação dos esforços máximos. A média dos máximos efeitos em 50 anos para um caminhão genérico é dado por:

$$M = a.m.W_{0,95}.H \quad (6.2)$$

onde:

a é um valor determinístico dependendo do tipo de caminhão padrão e do vão;

m é uma variável aleatória que reflete a variação entre o efeito de um caminhão aleatório e o caminhão padrão;

H é uma variável aleatória que reflete a presença simultânea de veículos na ponte, lado a lado ou em sequência;

$W_{0,95}$ é o percentil de 95% do histograma de pesos brutos dos veículos.

Tabela 6.1 – Valores para a fórmula simplificada (Ghosn, 2000) *apud* (Ferreira, 2006)

Vão (m)	a (kN · m)	m		H	
		Média	CV (%)	Média	CV (%)
9	8,23	0,92	15	2,63	10
12	11,62	0,93	12	2,69	10
18	18,40	0,94	6	2,75	10
24	18,17	0,93	9	2,78	7
30	24,95	0,95	7	2,80	7
38	33,09	0,96	6	2,86	7
46	41,90	0,96	5	2,87	7
53	50,04	0,97	4	2,98	7
61	58,85	0,97	4	3,05	7

Tabela 6.2 – Valores para $W_{0,95}$ (Ghosn, 2000) *apud* (Ferreira, 2006)

Vão (m)	$W_{0,95}$ (kN)	CV (%)
≤ 18	209	15
> 18	334	10

Além disso, podem ser inseridos na equação acima o fator de impacto (i), o coeficiente de distribuição (g) e um coeficiente que leve em conta o crescimento do tráfego (Gr).

$$M = a.m.W_{0,95}.H.i.g.Gr \quad (6.3)$$

Para o impacto, são valores dependentes da superfície – 1,1 para superfície suave, 1,2 para média e 1,3 para superfície rugosa, todos com coeficiente de variação de 10%, de acordo com Moses e Verma (1987), *apud* Ferreira (2006). Moses e Ghosn (1985) sugerem 1,2 com coeficiente de variação de 8% para pontes em aço e

concreto protendido, enquanto 1,15 e coeficiente de variação de 10% para vigas T em concreto armado. Em relação ao coeficiente que leva em conta o crescimento do tráfego é recomendável 1,15 com coeficiente de variação de 10%. Os coeficientes de distribuição das vigas podem ser encontrados na norma *AASHTO* (1996).

6.2.2 O Modelo de Crespo-Minguillón e Casas

Em seu trabalho, Crespo-Minguillón e Casas (1997), propõem, como bem diz o título de seu trabalho¹, um modelo para as cargas de tráfego com o objetivo de verificar a segurança em pontes e que seja de fácil compreensão.

Os autores inicialmente fazem uma discussão clara sobre o caminho que se deve seguir quando se pensa em modelos mais realistas para análise de cargas provenientes de veículos. São listados três grupos de métodos de análise possíveis: primeiramente, métodos teóricos, incluindo a teoria dos processos estocásticos e aproximações por integração. Um segundo grupo seria o de métodos baseados na simulação de configurações estáticas de tráfego e, o terceiro, o de métodos que contemplem simulações reais de tráfego. O presente trabalho, conforme a classificação do autor, se situaria no segundo grupo de métodos possíveis.

Em seu modelo, Crespo-Minguillón e Casas (1997) desenvolvem um método que seja válido nas mais importantes situações de estado limite de serviço (fissuração) e de estado limite último (fadiga e flexão). Além disso são consideradas correlações entre os veículos em uma faixa de tráfego, entre diferentes faixas e as variabilidades do tráfego conforme os dias da semana.

¹ Tradução livre: “Modelo completo das cargas de tráfego para checagem da segurança das pontes”.

Crespo-Minguillón e Casas (1997) utilizam os veículos reais que trafegam em rodovias espanholas. O que se observa conforme a tabela 6.3 é que, em termos de configuração, os veículos são aproximadamente os mesmos que trafegam em rodovias brasileiras.

Em relação às cargas, o modelo dos autores utiliza dados obtidos em um sistema de peso-em-movimento, muito difundido na Europa e Estados Unidos, mas ainda pouco utilizado no Brasil.

Crespo-Minguillón e Casas (1997) simulam o tráfego sobre a obra-de-arte considerando a sazonalidade, por exemplo, do dia da semana. Não foi atribuída nenhuma distribuição contínua às variáveis do problema, mas foram geradas distribuições numéricas com base nos dados coletados. Portanto, o tráfego fictício é gerado com base nas distribuições cumulativas numéricas do tráfego registrado.

O sistema computacional utilizado é composto por dois algoritmos. Inicialmente, cria-se o tráfego fictício utilizando-se as propriedades estatísticas do tráfego real. O segundo algoritmo é responsável pelo gerenciamento das passagens dos veículos pela ponte.

Muitos dados eram disponíveis, tais como volume médio diário para o ano, sua relação com o tráfego médio diário para cada mês, porcentagem de veículos pesados, etc. Assim, criou-se um modelo para simular um fluxo contínuo de tráfego sobre a ponte. Foi assumido que a ação do tráfego em períodos de 1 ano poderia ser tomada como um processo estacionário, e foi considerado também que 1 semana seria um período representativo. Desta forma, 1 semana foi tomada como o período básico de simulação, gerando-se as posições dos veículos a cada 0,2 segundo.

Tabela 6.3 – Configuração dos veículos espanhóis
(Crespo-Minguillón e Casas, 1997)

No. de EIXOS	CONFIGURAÇÃO			VEÍCULO
2		$d_{12} < 3.1$	$P < 35 \text{ kN}$	1
	$P > 35 \text{ kN}$	2
	$3.1 < d_{12} < 3.6$		3
		$3.6 < d_{12} < 4.6$		4
		$4.6 < d_{12}$		5
3		$d_{12} + d_{23} > 9.0$		6
	$d_{12} + d_{23} < 9.0$	$d_{12} > d_{23}$	7
			$d_{23} > d_{12}$	8
4		$d_{12} < 2.2$ $d_{34} < 2.2$		9
	$2.2 < d_{12} < 4.0$ $d_{34} < 2.2$	$d_{12} + d_{23} < 9.0$	10
			$d_{12} + d_{23} > 9.0$	11
	$d_{12} > 4.0$ $d_{34} < 2.2$		12
		$d_{34} > 2.2$		13
5		$d_{34} + d_{45} < 4.0$	$d_{12} < 4.0$	14
			$d_{12} > 4.0$	15
	$d_{34} + d_{45} > 4.0$	$d_{34} > 2d_{45}$	16
			$d_{45} > 3.0$	17
6		$d_{14} < 11.0$		18
		$d_{14} > 11.0$		19
	$d_{34} > 2.5$		20
		$d_{34} < 2.5$		21

Figura 6.1 – Histogramas dos pesos brutos de veículos (em kN)
(Crespo-Minguillón e Casas , 1997)

O processo que define que categoria de veículo chega na ponte em cada instante é modelado como um processo Markoviano. A matriz transitória do processo depende da densidade real dos veículos na pista, da aproximação entre o tráfego simulado e o tráfego real para cada dia da semana.

Em seguida, considera também a velocidade de cada veículo que trafega na ponte, e a possibilidade de ultrapassagens, para que se defina a distância entre eles. A distância mínima entre veículos é considerada como 1 metro.

Os esforços solicitantes são então calculados, para cada instante, por linhas de influências de seções importantes, como, por exemplo, momento fletor no meio do vão.

Para a obtenção dos valores característicos normalmente se utiliza a distribuição de extremos do tipo I, mas, segundo o autor, esta metodologia apresenta algumas desvantagens, como o fato de as extrapolações baseadas em pequenas amostras não

serem confiáveis, pois longas séries de dados anuais seriam necessárias. Além disso, o fato de que muitos valores altos obtidos em um ano poderem ser descartados, mesmo sendo maiores que os máximos para outros anos, tendo em vista que somente os valores máximos anuais serão mantidos.

O método utilizado por Crespo-Minguillón e Casas (1997) é baseado na escolha de um valor máximo de referência, a partir do qual são estudados os valores excedentes. Este método foi desenvolvido por hidrologistas, sendo o seu uso bastante empírico, sem bases teóricas. Esta linha de raciocínio trata os picos após o valor de referência como variáveis aleatórias. A base matemática deste conceito parte de uma lista de observações independentes, igualmente distribuídas ($X_1, \dots, X_n$), e um valor de referência fixo U . Se a distribuição de freqüências de X for conhecida ($F_X(x)$), a função distribuição acumulada ($F_S(s)$) da variável aleatória $S =$ “excessos de X acima do valor de referência U ”, $S = X - U$ dado $X > U$ é a seguinte:

$$\begin{aligned} F_S(s | U) &= P[X - U < s | X > U] = \frac{P[X < s + U] - P[X < U]}{P[X > U]} \\ &= \frac{F_X(s + U) - F_X(U)}{1 - F_X(U)} \quad 0 < s < X_{\max} - U \end{aligned} \quad (6.4)$$

Mostra-se que a família de distribuições para o excesso S é a distribuição generalizada de Pareto, dada por:

$$\begin{aligned} G_S(s) &= 1,0 - \left(1,0 + \frac{\xi \cdot s}{\sigma} \right)^{-1,0/\xi} \quad \xi \neq 0 \\ G_S(s) &= 1,0 - \exp\left(-\frac{s}{\sigma}\right) \quad \xi = 0 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Além disso, a distribuição de Pareto é uma boa aproximação para $F_S(s | U)$ se, e somente se, F_X estiver no domínio de uma distribuição de extremos. Assim, este é o método utilizado pelos autores para a extrapolação.

Foi feita a análise de uma ponte em seção celular contínua de três vãos, com vãos laterais de 42 metros e vão central de 56 metros. Considerou-se um volume de 20.000 veículos, em 2 faixas de tráfego, onde 30% dos veículos eram veículos pesados. Deste total, 90% estariam trafegando na faixa da direita. Ao todo foram simuladas 200 semanas de tráfego. Os resultados são apresentados na tabela 6.4.

**Tabela 6.4 – Resultados para simulação de fluxo de tráfego de 200 semanas
(Crespo-Minguillón e Casas, 1997)**

Momento Fletor (kN.m) no meio do vão central para diferentes períodos de retorno			
1 semana	2 semanas	1 ano	1000 anos
7507	9604	11691	18052

Nota-se que não é considerada a possibilidade de aumento no tráfego ao longo dos anos, no entanto, o autor afirma que é usual aumentar-se o coeficiente de variação da distribuição de máximos para que algumas incertezas, tais com essa, sejam levadas em conta.

6.2.3 O Modelo de A. S. Nowak

Em diversos trabalhos de Nowak são desenvolvidos os modelos de cargas móveis para as normas americanas. O princípio deste método está na extrapolação das cargas móveis obtidas através de medidas WIM (peso em movimento). Este método para consideração das cargas de tráfego foi utilizado na calibração das cargas móveis da norma *LRFD Specifications* da *AASHTO*.

Em seu primeiro trabalho abordando o assunto de cargas móveis, Nowak (1979) utiliza-se de dados do Ministério de Transportes de Ontário, Canadá, obtidos em 1975 através do sistema WIM (peso em movimento) e que foram utilizados na calibração da norma canadense.

São calculados os momentos fletores para os veículos de carga reais, e comparados com os momentos relativos à norma do Departamento de Ontário. É feita a extrapolação para 50 anos de vida útil das obras, sendo que a cauda superior da distribuição dos momentos fletores obtidos é admitida como sendo exponencial, assim:

$$F_{L50}(x) = 1 - e^{-x} \quad (6.6)$$

Figura 6.2 – Cauda superior da distribuição de momentos fletores para um caminhão isolado

(Nowak e Zhou, 1985), *apud* (Ferreira, 2006)

Figura 6.3 – Cauda superior da distribuição de momentos fletores para vários caminhões

(Nowak e Zhou, 1985), *apud* (Ferreira, 2006)

Em outro estudo utilizando os dados de Ontário em 1975, Nowak e Hong (1991) desenvolveram um método para análise da carga HS20 presente na norma

americana. Os dados correspondem a mais de 10.000 veículos de carga, obtidos por pesagens em movimento. Neste estudo a distribuição passa a ser considerada como normal.

São calculados os momentos fletores por caminhão, sendo que as distribuições de probabilidade acumuladas são plotadas em papel de probabilidade normal, conforme a figura 6.4.

Figura 6.4 – Viés (momento fletor de caminhão na ponte/HS20) para vários vãos em papel de probabilidade normal (Nowak e Hong, 1991)

A escala vertical corresponde ao inverso da distribuição normal padrão acumulada, enquanto a escala horizontal corresponde ao viés² (momento dos veículos pesados/

² Termo em português empregado por Ferreira (2006), por sugestão do Prof. João Alexandre Widmer, na sua defesa.

momento do HS20). A figura 6.5 mostra os gráficos correspondentes à força cortante, para diversos vãos.

Figura 6.5 –Viés (força cortante de caminhão na ponte/HS20) para vários vãos em papel de probabilidade normal (Nowak e Hong, 1991)

Os momentos fletores e forças cortantes máximas são extrapolados das figuras 6.4 e 6.5 da seguinte forma: Seja N o número total de veículos no período de tempo T . Pressupõe-se que os veículos medidos correspondem a duas semanas de tráfego pesado em uma rodovia interestadual. Portanto, com $N=75$ anos, o número de caminhões N será aproximadamente 1.500 vezes maior que nas observações. Assim tem-se 15.000.000 de caminhões (N). A probabilidade correspondente a este N é $1/N = 7 \times 10^{-8}$, que corresponde, na escala vertical, a $\Phi^{-1}=5,26$.

O número de caminhões (N), as probabilidades $1/N$ e as inversas das distribuições normais (z) estão mostradas na tabela 6.5. Já os máximos momentos e forças cortantes médios para vários períodos de retorno são mostrados nas figuras 6.6a e b.

Tabela 6.5 – Período de retorno, caminhões e probabilidades (Nowak e Hong, 1991)

Período de retorno	Número de caminhões (N)	Probabilidade ($1/N$)	Inverso da probabilidade normal
75 anos	15.000.000	7×10^{-8}	5,26
50 anos	10.000.000	1×10^{-7}	5,19
7,5 anos	1.500.000	7×10^{-7}	4,82
1,5 anos	300.000	3×10^{-6}	4,53
9 meses	150.000	7×10^{-6}	4,34
3 meses	50.000	2×10^{-5}	4,11
1,5 meses	25.000	4×10^{-5}	3,94
2 semanas	10.000	1×10^{-4}	3,71
1 dia	1.000	1×10^{-3}	3,09

Figura 6.6 (a) e (b)- Relação Esforço Médio / esforço do HS20 para diversos períodos (de cima para baixo, respectivamente 75 anos, 50 anos, 7,5 anos, 1,5 anos, 9 meses, 3 meses, 1,5 meses, 2 semanas e 1 dia) (Nowak e Hong, 1991)

6.2.3.1 Esforços para uma faixa de tráfego

Segundo Nowak e Hong (1991), o máximo efeito será causado por um caminhão isolado ou dois ou mais caminhões, um atrás do outro. As figuras apresentam os momentos e forças cortantes médios máximos devido a um único caminhão. Para mais de um caminhão, os resultados dependem da distância entre eles e do grau de correlação entre os seus pesos. No caso de dois caminhões as seguintes hipóteses são consideradas:

- a cada 10 caminhões um é seguido por outro com distância menor que 15 metros;
- a cada 50 caminhões, um é seguido por um caminhão relativamente correlacionado a este;
- a cada 100 caminhões, um é seguido por outro idêntico.

Os coeficientes de correlação (ρ) adotados são:

- $\rho = 0$, nenhuma correlação entre dois caminhões subsequentes, sendo um o máximo de 7,5 anos e o outro o caminhão médio;
- $\rho = 0,5$, correlação parcial entre dois caminhões subsequentes, sendo um o máximo de 1,5 anos e o outro o máximo diário;
- $\rho = 1$, correlação total entre dois caminhões subsequentes, sendo ambos os máximos de 9 meses.

Para determinar o afastamento entre os veículos, considerou-se a distância entre o eixo traseiro de um veículo e o eixo dianteiro do próximo veículo. Em sua análise, Nowak e Hong (1991) consideraram dois casos, respectivamente, 4,5 metros e 9 metros. O caminhão único é mais crítico para os momentos, em vãos até 30 a 40 metros e para forças cortantes, em vão de até 27 metros. Para vãos maiores, o caso de mais de um caminhão é o mais crítico.

6.2.3.4 Esforços para duas faixas de tráfego

A análise de Nowak e Hong (1991) engloba a determinação da carga em cada faixa e a distribuição das cargas entre as vigas longitudinais. Os fatores de distribuição foram determinados através de modelos resolvidos pelo método dos elementos finitos. Os modelos consideram comportamento elástico das vigas e lajes. A comparação foi efetuada com os coeficientes calculados pela *AASHTO Standard Specifications 1989*, em vigor à época do estudo. Para momentos em vigas internas de grelhas, o fator é dado por $s/7$ para uma faixa e $s/5,5$ para duas faixas, onde s é o espaçamento entre as longarinas.

Foi observado que na média, a cada 50 a 100 caminhões, um caminhão está na ponte lado a lado com outro. No caso de dois caminhões lado a lado, os coeficientes de correlação adotados são:

- $\rho = 0$, nenhuma correlação entre dois caminhões subsequentes, sendo um o máximo de 1,5 anos e o outro o caminhão médio;
- $\rho = 0,5$, correlação parcial entre dois caminhões subsequentes, sendo um o máximo de 3 meses e o outro o máximo diário;
- $\rho = 1$, correlação total entre dois caminhões subsequentes, sendo ambos os máximos de 1,5 meses.

Os resultados de Nowak e Hong (1991) mostram que o caso de dois caminhões lado-a-lado perfeitamente correlacionados, é o mais crítico. A razão entre o caminhão de 1,5 meses e o caminhão máximo de 75 anos é igual a 0,85.

Em Nowak (1993), o autor, utilizando-se novamente dos dados de 1975 em Ontario, volta a analisar as obras isostáticas, mas inclui em seus estudos a análise dos momentos negativos em vigas contínuas. Aparentemente utiliza dados um

pouco mais refinados, que levam a conclusões parecidas ao estudo anterior. Os coeficientes de correlação entre os veículos adotados são os mesmos do estudo anterior.

O autor conclui que o caminhão isolado na ponte é o pior caso para momento fletor, até vão de 40 metros, e para força cortante, até vão de 35 metros. Já no caso do momento negativo no apoio central de pontes contínuas, o caminhão isolado é determinante para vãos de até 15 metros. No caso de pontes com duas faixas de tráfego, o máximo efeito em 75 anos é causado por dois caminhões com cargas totalmente correlatas. Estes caminhões têm carga aproximadamente de 85% do caminhão máximo em 75 anos. Nestes casos, o fator de distribuição entre as vigas é muito importante. O autor considera que os valores do *AASHTO Specifications 1989*, em vigor à época, são muito conservadores.

Em seus trabalhos seguintes, Nowak utiliza os modelos de carga móvel acima referidos na aplicação da teoria da Confiabilidade para a calibração da norma americana *LRFD Specifications*.

6.2.4 O Modelo de Calibração do *Eurocode*

As primeiras verificações para calibração do *Eurocode* foram efetuadas com dados provenientes de tráfego, obtidos por pesagem em movimento em Auxerre, França em 1986. As simulações foram feitas para tráfego livre e congestionado, e subsequente extrapolação para obtenção dos valores característicos.

O'Connor et. al. (2001) fazem uma recalibração do modelo de carga, com preocupação no aumento do tráfego registrado nos anos posteriores à primeira calibração e aproveitando-se da maior disponibilização de dados de pesagem em movimento.

Inicialmente, são refeitas as simulações efetuadas em estudos anteriores para reproduzir os resultados já encontrados e, posteriormente, são feitas novas análises com dados obtidos entre 1996 e 1997, também em rodovias francesas.

Na situação de tráfego congestionado, a distância entre o eixo traseiro e o eixo dianteiro do veículo subsequente foi considerada como sendo de 5 metros. As situações de tráfego normal foram consideradas conforme os dados reais obtidos nas rodovias.

Um programa computacional desenvolvido no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* faz as simulações devidas, no qual os esforços solicitantes são calculados através das linhas de influência, com os veículos se deslocando sobre a ponte. Foram consideradas as linhas de influência para força normal, momento fletor no meio do vão de vigas isostáticas, momento negativo no apoio de vigas contínuas e momento positivo no vão, força cortante nos apoios e momento torsor.

Os tipos de veículos considerados são apresentados em O'Connor e O'Brien (2005) e reproduzidos na figura 6.7. A figura 6.8 mostra a diferença entre os pesos brutos totais de um mesmo tipo de veículo, nas medições de 1986 e 1997.

Figura 6.7 – Tipos de veículos considerados (O'Connor e O'Brien, 2005)

Figura 6.8 – Histogramas dos pesos brutos em rodovias europeias – 1986 e 1997
(O'Connor et. al., 2001)

Para as extrapolações foi utilizada a fórmula de Rice (equação 6.9). A sua utilização é baseada no princípio das ultrapassagens de nível, onde é contado quantas vezes os esforços ultrapassam um valor de referência pré-determinado. O'Connor e O'Brien (2005) fazem uma descrição da extrapolação para os esforços característicos descrevendo os fatores que influenciam a precisão dos extremos previstos nestas simulações.

Segundo Getachew (2003), o período de retorno correspondente ao *Eurocode* é de 1.000 anos, que corresponde a 10% de probabilidade de ocorrência em 100 anos. São consideradas 50 semanas por ano nas análises.

As diferenças entre as antigas e as novas simulações são, em alguns casos, consideráveis. Apesar de serem esperadas diferenças de até 10% nos resultados, principalmente para força cortante, aparecem diferenças de até 40%. O autor não explica o porquê destas diferenças, mas diz que nos documentos anteriores não se descreve muito bem o modelo matemático. De qualquer modo, conclui-se que, se algumas aproximações forem feitas, pode-se chegar a resultados mais próximos.

Já para os dados da década de 1990, O'Connor et. al. (2001) conclui que o modelo do *Eurocode* é apropriado para as cargas e veículos considerados.

O'Connor e O'Brien (2005) aproveitam alguns dados da calibração do *Eurocode* para analisar a extrapolação destes dados. Os dados de tráfego utilizados são os obtidos em pesagem-em-movimento em 7 dias medições em 1997 em dois trechos de uma importante rodovia européia, que liga Paris e Lille, na França. Durante este período, medições contínuas de peso-em-movimento foram obtidas em quatro faixas de tráfego, duas em cada direção. Um total de 86.455 veículos pesados foram gravados, considerando-se veículos pesados todos os que possuíssem PBTC maior que 35 kN. O autor afirma que normalmente as distribuições de probabilidade de Peso Bruto Total dos veículos obedece a uma distribuição normal bimodal, com dois picos, como mostra a figura 6.9.

O autor simula diretamente as cargas de tráfego utilizando os dados disponíveis em medições e as compara com dados obtidos pelo Método de Monte Carlo, validando a sua aplicação.

Figura 6.9 – Histograma de peso total – veículo A113 (O'Connor e O'Brien, 2005)

Em sua análise, O'Connor e O'Brien (2005) utilizam cenários de tráfego que considerem tráfego fluindo em todas as faixas num primeiro instante, e algumas faixas interrompidas e outras em movimento, numa segunda análise. Segundo o autor, não se justifica a consideração de casos de tráfego congestionado para vãos menores que 30 metros.

Os resultados das simulações são extrapolados estatisticamente para que sejam determinados os valores extremos dos efeitos das cargas na estrutura em análise. Três distribuições estatísticas são consideradas para se determinar a sensibilidade do valor extremo previsto para o esforço (Rice, Gumbel e Weibull).

O autor propõe a utilização da fórmula de Rice para a obtenção do valor característico. É uma fórmula que determina o número médio de ocorrências por unidade de tempo da ultrapassagem de um valor pré-determinado, em um processo gaussiano. A distribuição de Rice expressa a taxa média de ultrapassagens do limite x e do nível $x > 0$ e do nível $x < 0$, para um certo período de referência. Assim, constroem-se histogramas de ultrapassagens de um certo limite, no caso das cargas em estruturas, superior. (Getachew, 2003)

Figura 6.10 – Ultrapassagens de nível – x1 ultrapassa para maior, nove vezes e x2 ultrapassa para menor, 5 vezes (Getachew, 2003)

Segundo O'Connor e O'Brien (2005), tal distribuição não é normal, mas possui a cauda da distribuição normal.

$$v(x) = \frac{1}{2\pi} \frac{\dot{\sigma}_x}{\sigma} \exp \left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (6.9)$$

Inicialmente, o autor apresenta o histograma de ultrapassagens de nível com os resultados do momento fletor considerando os dados obtidos nas medições “in loco” em comparação com os dados obtidos através de simulação pelo Método de Monte Carlo, utilizando-se as características do tráfego real.

Figura 6.11 – Histograma de ultrapassagens de nível para o momento fletor – Dados do peso em movimento (WIM) e por Monte Carlo (MC) (O'Connor; O'Brien, 2005)

Para que se tenha comparação com os valores obtidos com a distribuição de Rice, o autor utiliza também a família de distribuições de Gumbel. Quando os valores máximos são coletados de uma distribuição de frequências com um limite máximo finito, se utiliza a distribuição de Weibull, apresentada abaixo.

$$F(x) = \exp\left\{-\left[(\lambda - x)/\delta\right]^\beta\right\} \quad -\infty < x < \lambda \quad (6.8)$$

Quando este limite não existe ou é composto por curvas assintóticas, se utiliza a distribuição de extremos de Gumbel tipo I.

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\alpha(x - \mu)\right]\right\} \quad -\infty < x < \infty, \quad \alpha > 0 \quad (6.9)$$

Os parâmetros das distribuições foram obtidos conforme o método de máxima verossimilhança³. A aplicabilidade das distribuições foi testada através de papel de probabilidade.

Para pequenos vãos (menores que 20 metros), a distribuição de Weibull é considerada a mais apropriada, implicitamente mostrando que existe um limite superior físico para o máximo efeito nestes vãos, função dos grupos de eixos máximos possíveis.

Para vãos maiores que 20 metros, os autores mostram que ambas as distribuições são apropriadas. No entanto, de vãos médios a longos (acima de 50 metros), uma tendência de aproximação do eixo horizontal é observada na distribuição de Weibull, o que torna a distribuição de Gumbel, assintótica, mais apropriada. Os autores afirmam, no entanto, que a distribuição mais apropriada depende muito mais do esforço que está se estudando do que do vão em si.

³ Para detalhes do método, consultar Castillo (1988).

Na figura 6.12, apresentam-se os resultados comparados entre os valores característicos obtidos por O'Connor e O'Brien (2005) para cada vão analisado e as distribuições de probabilidade utilizadas. Nota-se que, para vãos de 50 metros, a diferença entre os resultados obtidos pela distribuição de Rice (utilizando dados reais) e Gumbel (utilizando dados simulados por Monte Carlo) são próximos a 5%. Esta diferença varia de acordo com o vão, como se observa na tabela.

Figura 6.12 – Comparação dos valores característicos obtidos por diferentes métodos e para diferentes vãos (O'Connor e O'Brien, 2005)

Tabela 6.6 – Diferenças percentuais entre os resultados –
Rice e Gumbel e entre parênteses Rice e Weibull
(O'Connor e O'Brien, 2005)

Vão (m)	Diferença percentual para vários períodos de retorno		
	1 ano	20 anos	100 anos
5	-11,1 (-14,6)	-11,0 (-12,6)	-11,1 (-10,7)
10	10,1 (-1,1)	12,4 (1,1)	14,1 (2,9)
20	-9,1 (-5,9)	-9,1 (-3,7)	-9,1 (-1,7)
50	3,5 (6,9)	4,1 (9,1)	4,5 (10,9)
100	10,1 (13,7)	10,8 (15,9)	11,3 (17,7)
200	4,4 (10,4)	4,2 (12,2)	4,0 (13,7)

6.2.5 Modelo de Bailey e Bez

Bailey e Bez (1994) propõem desenvolver um método simples para a obtenção do modelo de carga móvel em pontes através das características do tráfego no local em estudo.

São utilizados dados do tráfego Suíço, onde são observados 14 diferentes tipos de veículos de carga, que cobrem 99% dos caminhões e combinações no país. Esta classificação está ilustrada na figura 6.13.

Figura 6.13 – classificação dos veículos suíços (Bailey e Bez, 1994)

Os autores afirmam que, após estudos de dados obtidos em pesagens, podem representar a natureza aleatória das cargas por eixo e das distâncias entre eixos pela distribuição normal padronizada.

O tráfego fluindo normalmente é modelado como um processo de Poisson, e as distâncias entre os veículos são portanto representadas por distribuições exponenciais, que variam em função do volume de tráfego. Para o tráfego congestionado, as distâncias entre os veículos são representadas por uma função log-normal de probabilidade, dependendo da velocidade do fluxo.

Os grupos de eixos são considerados nos cálculos como uma carga única, a fim de garantir maior agilidade nos processamentos. O autor afirma que tal simplificação não traz maiores problemas para vãos acima de 30 metros.

A carga por veículo é modelada com base no grupo de eixos mais carregado por tipo de veículo, que é determinante no seu efeito total. Esta carga é considerada aleatória por uma função densidade de probabilidade e as cargas restantes são obtidas em função da primeira. Os autores utilizam a função beta bimodal (figura 6.14) e afirmam que esta se aplica bem em todas as cargas analisadas.

Figura 6.14 – Histograma e função densidade de probabilidade para o conjunto traseiro de eixos (Bailey e Bez, 1994)

Deste modo, o autor simula o tráfego, que passa pela obra de arte, através de programa computacional. Em tal programa, é necessária a entrada de dados determinísticos, como, por exemplo, a quantidade de veículos leves e pesados, carregados ou não, para os seus cálculos e a velocidade de tráfego (considerada constante em cada análise) dos veículos.

Foram analisadas pontes com 2 faixas de tráfego, sendo isostáticas ou contínuas com três vãos. Os vãos analisados foram de 32,8 m, 50 m, 70 m e 100 metros. Os esforços considerados foram os momentos fletores no meio do vão, nos apoios e as forças cortantes nas faces dos apoios. Os sistemas estruturais transversais analisados foram pontes em duas vigas e em seções celulares.

Após 500 simulações, os autores mostram que a distribuição de máximos equivalente obedece à função do tipo III de Gumbel, na qual a probabilidade de que se exceda um valor de referência s^* é dada por:

$$F_s^*(s^*) = \exp \left[-n \cdot \left(\frac{W - s}{\alpha \cdot W} \right)^k \right] \quad (6.10)$$

Os autores comparam, então, os resultados obtidos com parâmetros de tráfego e valores normativos de carga da Norma Suíça. O percentil considerado como valor característico é de 95% e foi calculado considerando-se 10 anos de tráfego. Os efeitos dinâmicos não foram considerados na análise. Os valores de viés (momento correspondente ao percentil 95% / momento da norma suíça) são baixos, todos menores que 1,0. Isto mostra que os valores de carga da referida norma são muito conservadores em relação às cargas de tráfego reais. Mostra-se também que o viés varia lentamente com o aumento do vão e de forma mais aguda com o tipo de efeito considerado (momento ou força cortante), conforme a figura 6.15.

Figura 6.15 – Comparação entre os efeitos das simulações e os efeitos da carga normativa suíça (Bailey e Bez, 1994)

6.2.6 O Modelo de Miao e Chan

Em estudos para obtenção de modelos de cargas para pontes com vãos de 5 a 40 metros, Miao e Chan (2002) utilizam dados obtidos durante 10 anos (1986 a 1995) em 5 estradas diferentes, através de sistemas de peso-em-movimento em Hong Kong.

Calculam-se os momentos fletores e forças cortantes para pontes biapoiadas utilizando eventos extremos diários, obtidos da totalidade dos dados de pesagem observados. Três tipos de veículos são utilizados, veículos curtos com até 12 metros de comprimento, veículos combinados médios (comprimentos entre 12 e 15 metros), e veículos combinados longos, com comprimentos de mais de 15 metros. São utilizados os valores extremos médios diários para momentos fletores e forças cortantes.

Os espaçamentos entre os eixos dos veículos foram modelados como distribuições lognormais de probabilidade, com função de distribuição acumulada dada por:

$$F(x) = \frac{1}{1,03x} \exp\left[-\frac{(\ln(x) - 1,04)^2}{0,81}\right] \quad (6.11)$$

Estes espaçamentos são subdivididos em espaçamentos entre eixos internos (3,8 a 4,85 m) e espaçamentos entre eixos tandem (1,3 e 1,75 m).

Em relação às cargas por eixo, foi adotada a distribuição gaussiana inversa, cuja função de distribuição acumulada é dada por:

$$F(x) = 0,822x^{-3/2} \exp\left[-0,301\left(\frac{x}{7,05} - 2,0 + \frac{7,05}{x}\right)\right] \quad (6.12)$$

O valor máximo da carga por eixo em uma ponte em sua vida útil também é dada pela distribuição de extremos Tipo I no caso de tráfego normal e a distribuição de Weibull no caso de tráfego denso. As funções de probabilidade acumulada são dadas, respectivamente, por:

$$F(x) = \exp\{-\exp[-(x - 75,003)/19,359]\} \quad (6.13)$$

$$F(x) = 1 - \exp[-(x / 225,356)^{12,34}] \quad (6.14)$$

Os grupos de eixos em Hong Kong são divididos em eixos triplos e eixos duplos. A carga máxima de um grupo de dois eixos com probabilidade de 95% de ocorrência é de 193,6 kN e a carga máxima para um grupo de três eixos é de 230 kN. O valor máximo para a carga de um eixo isolado em toda a vida útil de uma ponte é de 124 kN.

Os pesos brutos totais dos veículos foram modelados pela distribuição gaussiana inversa, com função de probabilidade acumulada:

$$F(x) = 1,786x^{-3/2} \exp\left[-0,354\left(\frac{x}{28,3} - 2,0 + \frac{28,3}{x}\right)\right] \quad (6.15)$$

Assim como em relação às cargas por eixo, a distribuição dos valores máximos para os pesos brutos, obedecem à distribuição de extremos Tipo I no caso de tráfego normal e a distribuição de Weibull no caso de tráfego denso. As funções de probabilidade acumulada são dadas, respectivamente, por:

$$F(x) = \exp\{-\exp[-(x - 137,682)/41,784]\} \quad (6.16)$$

$$F(x) = 1 - \exp[-(x/358,275)^{22,229}] \quad (6.17)$$

O peso bruto máximo dos veículos para a vida útil da ponte é de 418 kN para 95% de probabilidade e 600 kN para 98% de probabilidade de ocorrência.

Em seguida, o autor obtém uma Equação comprimento-peso admissível⁴ através da Equivalência de Comprimento-Base de Ontário, que diz que N cargas concentradas ao longo da ponte com somatória W podem ser substituídas por uma carga distribuída com resultante W e com comprimento B_m , de forma que o diagrama de momentos devido às cargas concentradas seja coberto pelo diagrama da carga distribuída. A fórmula de Equivalência é dada por:

$$B_m = \frac{4}{W} \sum_{i=1}^N |P_i x_i| - \frac{2(N-1)}{b.N.W^2} \left\{ \sum_{i=1}^N (P_i x_i)^2 \right\} \quad (6.18)$$

onde:

⁴ Termo em português utilizado por Ferreira (2006).

N é o número total de cargas concentradas

W é a somatória das cargas concentradas

P_i é o módulo da carga concentrada i

x_i é a distância entre a carga concentrada i e o centro de gravidade das cargas

Determinam-se então os grupos de eixos correspondentes à probabilidade de ocorrência de 98% pelas cargas observadas nas medições, considerando como variáveis o peso bruto, o peso por eixo e as distâncias entre eixos. Tais modelos estão representados na figura 6.16. Observa-se que os modelos 3 a 5 não são modelos de caminhões reais, mas combinações de mais de um veículo.

Figura 6.16 - Modelos obtidos para o quantil de 98% do tráfego de Hong Kong

6.2.7 O Modelo de Oestlund e Sundquist

Em seu trabalho, Oestlund e Sundquist (2001) desenvolvem um modelo para calibração do *Eurocode 1* para as cargas de tráfego na Suécia. São utilizados dados coletados em rodovias suecas entre 1991 e 1994, através do sistema peso em movimento. Os resultados deste estudo foram utilizados na obtenção de modelo de carga de projeto das pontes Höga Kusten e Uddevalla, na Suécia.

Ao contrário dos outros autores estudados, os suecos trabalham com a carga aplicada, e não com os seus efeitos. Assume-se que a situação crítica de carga é a de congestionamento, ou seja, vários veículos em fila e muito próximos. Através dos dados obtidos nas pesagens (peso por eixo, tipo de veículo e comprimento do veículo), são geradas filas de veículos com espaçamento de 2 metros entre eles, seguindo-se a sequência medida em campo. São escolhidos diversos comprimentos para as filas, de 200 a 1800 metros.

Os dados obtidos nas medições de campo são:

Q_i – peso total de cada veículo i ;

d_i – comprimento total de cada veículo i ;

a ordem dos veículos;

ponto no tempo de passagem do primeiro e do último veículo da fila.

Para cada veículo o espaço necessário e a carga uniformemente distribuída fictícia são dados, respectivamente, por:

$$a_i = d_i + 2 \quad e$$

$$q_i = Q_i / a_i \quad (6.19)$$

Para cada fila, o número n de veículos são tais que $\sum_{i=1}^{n-1} a_i < L_0 < \sum_{i=1}^n a_i$ e o comprimento real $L = \sum_{i=1}^n a_i$. O peso total de todos os veículos em uma fila W , a intensidade média da carga, $\mu_q = W / L$, o peso médio de cada veículo $\mu_Q = W / n$, o desvio padrão, σ_q para q_i e σ_Q para Q_i são calculados. A seguir, W é substituída por $w = W / L$, que foi aproximada por $w = W / L_0$. O comprimento L de uma fila é então dividido em n intervalos iguais ($i=1,2,\dots, n$), cada um com o comprimento a ($a=L/n$). Este comprimento é escolhido de tal modo que seja aproximadamente

igual ao comprimento médio necessário para cada veículo pesado, sendo o comprimento necessário para os carros tomado como $a/2$. A carga de tráfego, q_i , é assumida como uniformemente distribuída em cada um dos intervalos.

Segundo Oestlund e Sundquist (2001), a carga móvel é descrita por um processo estocástico estacionário, que é considerado como uma sequência de variáveis aleatórias independentes $a.q_i$. Como consequência de ser considerado estacionário, as funções densidade de probabilidade são as mesmas para todas as variáveis $a.q_i$. Então, também as médias, $a.\mu_q$ e os desvios padrão $a.\sigma_q$ serão os mesmos para todos os intervalos.

A carga da fila é descrita como um processo estocástico que pode ser considerado como uma sequência de variáveis aleatórias independentes w . O processo como um todo não pode ser tratado como estacionário, mas por aproximação as partes do processo são tratadas como tal. Então a variável w é dividida em grupos, onde cada grupo w_j é associado a uma certa população de filas. Para cada grupo j tem-se uma função densidade de probabilidade, que é assumida como sendo Gaussiana com média μ_{wj} e desvio padrão σ_{wj} . Para todo o processo com alguns dias, a função densidade de probabilidade para w pode ser escrita como:

$$F_w(w) = \sum p_j F\left(\frac{w - \mu_{wj}}{\sigma_{wj}}\right); \quad \sum p_j = 1 \quad (6.20)$$

onde

p_j é a proporção de filas no grupo j ;

μ_{wj} é a média de w para o grupo j ;

σ_{wj} é o desvio padrão de w para o grupo j .

Assim, a média e o desvio padrão de toda a população podem ser calculados. As funções densidade de probabilidade são obtidas através das frequências obtidas

preliminarmente, que também fornece as médias μ_w e desvios padrão σ_w . Além disso, para cada local de teste todas as frequências são adicionadas de tal modo que as somas forneçam os valores de frequência para toda a população, que represente todos os resultados para cada local considerado. Exemplos de função densidade de probabilidade e comparação entre diversos comprimentos de fila são dados nas figuras 6.17 e 6.18.

Figura 6.17 – Função de probabilidade para $L_o = 400$ metros
(Oestlund e Sundquist, 2001)

Figura 6.18 – Comparação entre o valor característico ($F_w(w_k)=0,98$) um valor intermediário e o valor de cálculo ($F_w(w_d)=0,9996$) (Oestlund e Sundquist, 2001)

6.3 A EXPERIÊNCIA BRASILEIRA

O estudo das cargas provenientes de veículos atuantes nas obras de arte brasileiras é ainda bastante escasso. Observam-se algumas pesquisas na área de pavimentos, onde muitas vezes se está preocupado com a carga por roda e não com as diversas rodas atuando no trecho estudado.

Segundo Widmer (2005), no Brasil a pressão por CVCs de maior porte tem partido dos segmentos de transporte de cargas a granel líquido e sólido, que pretendem reduzir seus custos de transporte nos casos em que o transporte agrega uma importante parcela nos custos de produção e distribuição, dado o valor relativamente baixo por tonelada dos produtos transportados. Segundo o mesmo autor, nos EUA, Canadá e Austrália, onde ocorreu um avanço muito mais significativo na certificação de tráfego de CVCs de maior comprimento e maior PBTC, a pressão maior veio do segmento de transporte de cargas fracionadas, ou seja, buscava-se CVCs com maior capacidade volumétrica. Ainda segundo o mesmo autor, o principal fator que inibiu o avanço no uso de CVC de maior comprimento no Brasil foi o fato de o antigo DNER e muitos DERs terem imposto critérios de restrição ao tráfego noturno de CVCs com comprimento maior que o limite de 19,8 metros contido na legislação.

Em um trabalho que tem por objetivo estudar a fadiga em pontes, Chamon (1989) demonstra preocupação com a variabilidade dos tipos de veículos que trafegam nas rodovias. Inicialmente, o autor discute a distribuição de cargas em diversos tipos de veículos com dados obtidos de pesagens na Rodovia Presidente Dutra, apresentando histogramas de cargas por eixo, por tipo de veículo. No entanto, para a análise da fadiga, acaba por adotar a média das cargas por eixo do veículo 2S3, considerando ainda o tráfego de uma carga distribuída de 5 kN/m^2 , representando os outros veículos pesados sobre o tabuleiro.

El Debs et. al. (2001) elaborou um relatório para o DER-SP que trata da análise de passagens de CVCs em obras de arte, no qual são feitas verificações de diversas pontes, com vários tipos de seções transversais. As CVCs analisadas são os Rodotrens RT74/20 e RT74/25, Bi-trem BT74/25 e um caminhão basculante de areia ou pedra BB 48/14 (pela classificação do DER-SP, 3S3), apresentados na figura 6.19. Em suas análises, utilizou cargas nominais contendo as tolerâncias permitidas pela resolução nº. 104, do CONTRAN.

Neste estudo, foi considerada a CVC como substituta do veículo-tipo, ou seja, manteve-se a carga fictícia de multidão de 5 kN/m^2 em todo o trecho desfavorável do tabuleiro. Aparentemente, esta análise é válida no caso dos esforços obtidos serem menores que para o trem-tipo 45, com a obra estando apta a receber a CVC, mas, do contrário, não se pode afirmar que a obra de arte estaria condenada para a passagem do veículo analisado.

Outro ponto que devemos salientar é que, para vãos muito grandes e tabuleiros largos, o momento fletor depende muito mais da carga distribuída de multidão que propriamente do veículo-tipo escolhido. Assim, o aumento no momento não estaria tão ligado à escolha da CVC.

O estudo do DER-SP adota as cargas de projeto como cargas-limite das pontes e conclui que a compatibilidade de tráfego é um problema que depende da carga por comprimento da CVC, ou seja, que maiores PBTC deverão estar associados a maiores comprimentos de veículos, de modo a reduzir os esforços solicitantes impostos às estruturas.

Em algumas situações, a CVC RT74/20 apresentou solicitações ligeiramente superiores às da classe 45, com diferenças da ordem de 10%. Os estudos mostram também que o veículo BB48/14, classificado como 3S3, com peso bruto total de

450 kN e usualmente utilizado para transporte de areia mostrou-se mais desfavorável que as CVCs RT74/25 e BT74/25 na maioria dos casos, e, em alguns casos até mais desfavorável que a CVC RT 74/20.

Figura 6.19 - Veículos utilizados no relatório do DER-SP (El Debs et. al., 2001)

Em um estudo de grande relevância, Ferreira (2006) desenvolve fórmulas para aprovação da passagem de veículos em obras de arte existentes no Brasil através do método de Nowak (1999), chamadas de Equações de Comprimento e Peso

Admissíveis. É utilizada a teoria da Confiabilidade, sendo necessário obter a carga variável na sua forma estatística, ou seja, por uma distribuição de probabilidades. São considerados diversos casos de passagens de veículos de carga, com veículos isolados ou em conjunto. São analisadas diversas estruturas existentes no estado de São Paulo, com várias seções transversais, em caixão, grelha e em duas vigas.

Ferreira (2006) utiliza dados de balanças de pesagem móvel entre 2001 e 2002 nas rodovias SP 310 e SP 225, sob concessão da Centrovias Sistemas Rodoviários S/A, que realiza as pesagens. O autor ressalta a dificuldade de obtenção de dados detalhados, dificuldade também observada para a elaboração deste trabalho.

São utilizados somente os caminhões que aparecem com maior carga e em maior número nas planilhas de pesagem. Portanto, utiliza-se os veículos 2I3, 2S3, 3S3, 3S2 e 3D4 (bitrem).

Inicialmente são feitas extrapolações através de papel de probabilidade normal das cargas brutas totais para alguns veículos. Para a extrapolação, efetuada conforme Nowak (1999), são considerados somente os 100 caminhões mais pesados. O autor assume que a cauda superior das distribuições obedecem à distribuição normal.

Figura 6.20 – Extrapolação para o caminhão 3S3 curto (Ferreira, 2006)

As situações analisadas são as de caminhão isolado, e a presença simultânea de dois ou três caminhões na ponte.

No caso de caminhão isolado, Ferreira (2006) considera o veículo 3S3 curto como sendo o caso mais crítico. O autor considera o peso bruto máximo em 50 anos como a média da distribuição de máximos de cargas no caso de um veículo isolado. Já o desvio padrão, é obtido pela inclinação da regressão linear no papel de probabilidade. Assim, obtém-se uma distribuição normal com média dada pela figura 6.21 e coeficiente de variação de 22%.

Figura 6.21 – Caminhão 3S3 curto para momento fletor positivo – PBT 1008,8 kN
(Ferreira, 2006)

Considera-se o caso de dois caminhões simultaneamente sobre a ponte, e o autor leva em conta a probabilidade de ocorrência simultânea de caminhões conforme o procedimento de Hwang e Koh (2000) e Nowak (1999). Assim, são definidas as probabilidades apresentadas na tabela 6.7, para pontes com tabuleiro estreito (2 faixas de 3 metros e acostamento de 2 metros) e para tabuleiro largo (4 faixas de 3 metros).

Tabela 6.7 – Probabilidades de ocorrência simultânea (Ferreira, 2006)

Hipótese	Caminhões em fila		Caminhões lado a lado	
	TE	TL	TE	TL
1	1/75	1/75	1/50	1/75
2	1/500	1/500	1/500	1/500

No caso de caminhões em fila, o autor analisa dois casos:

- a) distância entre os caminhões igual a 5 ou 10 metros, sem a consideração de coeficiente de impacto;
- b) a distância entre os caminhões de 15 a 30 metros, adicionando-se posteriormente a parcela dinâmica da carga.

O caminhão principal é o 3S3 curto. No caso de presença simultânea, considera-se o segundo caminhão sendo um 2S3 curto, por este representar cerca de 30% do tráfego pesado observado. Os coeficientes de variação foram calculados de maneira análoga ao caso do caminhão isolado, ou seja, obteve-se o desvio-padrão de cada caminhão através do papel de probabilidades e o peso máximo em 50 anos, que será a média da distribuição de máximos de carga. Em seguida, foi calculado o momento fletor na ponte para a posição crítica de cada caminhão, sendo o coeficiente de variação da distribuição de momentos obtido pela equação:

$$CV = \sqrt{\frac{[(M_1 \cdot CV_1)^2 + (M_2 \cdot CV_2)^2]}{M_1 + M_2}} \quad (6.21)$$

onde

M_1 : parcela de momento fletor devido ao caminhão principal

M_2 : parcela de momento fletor devido ao caminhão secundário

CV_1 : coeficiente de variação do peso do caminhão principal

CV_2 : coeficiente de variação do peso do caminhão secundário

Tabela 6.8 – Peso por eixo (kN) e coeficiente de variação dos caminhões para análise de presença simultânea (Ferreira, 2006)

	Caminhão principal	Caminhão secundário
Em fila	3S3: PBTC = 686,4 kN - CV = 0,327	2S3: PBTC = 560,1 kN - CV = 0,185
	3S3: PBTC = 796,0 kN - CV = 0,281	2S3: PBTC = 413,0 kN - CV = 0,052
Lado a lado	3S3: PBTC = 686,4 kN - CV = 0,327	2S3: PBTC = 560,1 kN - CV = 0,185
	3S3: PBTC = 818,8 kN - CV = 0,274 (TE)	2S3: PBTC = 413,0 kN - CV = 0,052
	3S3: PBTC = 796,0 kN - CV = 0,281 (TL)	

Seguindo o procedimento de Nowak (1999), Ferreira (2006) não considera o efeito dinâmico das cargas móveis quando a distância entre caminhões é menor que 15 metros. No caso do caminhão isolado, a parcela dinâmica é tomada como sendo 15% do momento fletor estático e, para 2 caminhões, como sendo 10% do momento fletor no caso estático.

Analisa-se também o caso de três caminhões simultaneamente na ponte, considerando-se o veículo 2S2 médio, na terceira faixa, com mais dois caminhões lado-a-lado. As cargas por eixo desse veículo é mostrado na figura 6.22.

Figura 6.22 – Cargas por eixo no caminhão 2S2 (Ferreira, 2006)

Os casos de mais de dois veículos em fila não são analisados em seu trabalho. Isto é justificável por se analisarem apenas pontes de até 40 metros de vão.

Em seguida, Ferreira (2006) determina as relações para os diversos sistemas estruturais entre os momentos calculados com o modelo acima descrito e o momento devido ao trem-tipo 45 (viés). São considerados sempre os casos mais críticos entre um caminhão, 2 caminhões lado-a-lado e 2 caminhões em fila. O coeficiente de impacto considerado é de 1,15, para caminhões isolados. Nos casos de caminhões em fila com distância inferior a 15 metros, a parcela dinâmica não é considerada. O resumo dos resultados para cada tipo de seção transversal estão apresentados na tabela 6.9.

Tabela 6.9– Viés (momento de caminhão/momento TT45) – vãos de 20 a 40 m

Viés	Pontes em Laje		Pontes em 2 vigas		Pontes em Grelha (5 vigas)		Pontes em Seção Celular	
	Momento Positivo	Momento Negativo	Momento Positivo	Momento Negativo	Momento Positivo	Momento Negativo	Momento Positivo	Momento Negativo
Mínimo	0,97	0,92	1,03	0,76	0,94	0,68	0,69	0,49
Máximo	1,18	1,27	1,26	1,42	1,33	0,85	1,25	0,68
Médio	1,08	1,11	1,17	1,02	1,14	0,74	0,95	0,59

Nota-se que os vieses possuem grande variabilidade, de 0,49 a 1,42. Segundo Ferreira (2006) isto se justifica pela diversidade de sistemas estruturais analisados. Verifica-se também que o carregamento proposto para representar o real é, em uma série de casos, contra a segurança em relação ao trem-tipo 45. Com o aumento do vão esse valor tende a diminuir, já que aumenta-se a importância da carga distribuída de multidão.

Na verdade, para a maioria das pontes modernas em grelhas ou seção celular com vãos acima de 30 metros, o resultado só é contra a segurança para momento positivo.

Para a obtenção das Equações Comprimento-peso Admissíveis, as cargas móveis são sobrepostas às cargas permanentes e o total comparado à resistência dos elementos estruturais, em modelos para a análise da confiabilidade do sistema. Este tema foge do escopo deste trabalho, por isso não serão efetuados maiores comentários.

Com base na teoria da confiabilidade, o autor determina equações para verificação da compatibilidade de veículos críticos com as obras de arte analisadas. Em seus estudos conclui-se que o veículo mais incompatível com as obras de arte existentes é o Rodotrem de 19,8 metros de comprimento e 740 kN de carga total.

No estudo do coeficiente de impacto em pontes de concreto, Penner (2001) desenvolve ensaios de monitoração e provas de carga dinâmicas em obras localizadas na rodovia Anhanguera (SP) e na rodovia Presidente Dutra, entre o Rio de Janeiro e São Paulo, entre 1998 e 2000. Foram medidas as respostas dinâmicas das pontes, devido a diversas passagens de um veículo de prova instrumentado. A tabela 6.10 apresenta os valores para o coeficiente de amplificação dinâmico obtido na instrumentação, comparado com valores das normas americanas e com Yang et al (1995) *apud* Penner (2001), que apresenta equações para a sua determinação, baseadas na velocidade de passagem do veículo e na frequência natural da ponte.

Tabela 6.10– Comparação entre resultados de coeficientes de impacto por diversos métodos (Penner, 2001)

Vão (m)	Yang et al (1995)	AASHTO STD	AASHTO LRFD	NBR 7187	Análise Experimental (Penner, 2001)
21	1,12	1,26	1,33	1,25	1,25
25	1,13	1,24	1,33	1,23	1,38
40	1,08	1,19	1,33	1,12	1,43
42	1,10	1,19	1,33	1,10	-
44	1,10	1,18	1,33	1,09	-
44	1,10	1,18	1,33	1,09	-
48	1,09	1,18	1,33	1,06	-

Os resultados obtidos por Penner (2001) demonstram que ainda existe muito a avançar neste estudo, sendo que provavelmente a NBR 7187 mereça uma atualização na sua formulação para determinação do coeficiente de impacto.

6.4 CONCLUSÕES

Este é um assunto que vem sendo estudado há algum tempo no exterior, onde a preocupação com a calibração dos modelos de cargas móveis é muito grande, já que os veículos que trafegam nas rodovias estão em constante evolução, sempre buscando a otimização do transporte rodoviário.

Após se observar os trabalhos disponíveis, nota-se que, no Brasil, a preocupação com a análise da segurança nas cargas consideradas no projeto das obras de arte especiais só produziu trabalhos mais recentemente e encontra-se em estágio ainda inicial. As pesquisas disponíveis até então concentravam-se na área de pavimentos.

Na busca de um modelo que se adeque à realidade brasileira, ao contrário do que é desenvolvido em outros países, é necessário que se dê especial atenção à situação de congestionamento. Por isso, em seguida, será desenvolvido um modelo para a análise da compatibilidade das cargas móveis reais inclusive na condição de congestionamento com o trem-tipo normativo.

CAPÍTULO 7

MODELO PARA AVALIAÇÃO DO TREM-TIPO

7.1 INTRODUÇÃO

Segundo a NBR 8681 (ABNT, 2003), definem-se Estados Limites Últimos como estados que pela sua simples ocorrência determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção. Normalmente, em vigas de pontes, o estado limite último predominante é o de ruptura por flexão.

Como a preocupação é com o Estado Limite Último, torna-se necessária a análise do máximo de carga possível sobre a obra. Devido às condições das estradas e vias urbanas brasileiras, efetuou-se a análise da condição de congestionamentos sobre as

obras de arte. A seguir, apresentam-se os dados de campo obtidos, o modelo e as ferramentas desenvolvidas para a calibração do trem-tipo realizadas neste trabalho.

7.2 DESCRIÇÃO INICIAL DOS DADOS DE CAMPO

Obtiveram-se dados de pesagem e tráfego na SP-310, rodovia Washington Luís, sob concessão da *Centrovias Sistemas Rodoviários S.A.*, dentro do programa de concessões rodoviárias do Estado de São Paulo. Trata-se de uma rodovia importante para o escoamento de produtos agropecuários, que liga São José do Rio Preto à rodovia Anhanguera, passando pelas cidades de São Carlos e Araraquara, no interior paulista. Os dados de pesagem referem-se ao ano de 2005, obtidos de balanças móveis, montadas sobre bases fixas na rodovia. Trata-se de uma rodovia em pista dupla, predominantemente com duas faixas de tráfego por pista, e, em alguns trechos, três faixas de tráfego. Ao todo, foram pesados 121.078 veículos ao longo do ano, em 204 dias de pesagem. As pesagens são efetuadas em turnos de duração variável, entre as 7 e 21 horas, nos dias de semana.

As planilhas de pesagem fornecem dados como a placa do veículo pesado, o peso por eixo do veículo e o peso bruto total do veículo, o dia e a hora de pesagem. Normalmente, os veículos são classificados conforme os códigos já apresentados no capítulo 2. Cerca de 12% dos veículos não estão classificados nas planilhas, o que foi efetuado manualmente em cada caso, através da quantidade de eixos pesados. Desses, o Bitrem (3D4) representa cerca de 69% dos veículos. Após a reclassificação, a porcentagem de veículos não classificados cai para 1%. Na figura 7.1 são mostradas as porcentagens dos diversos tipos de veículos comerciais e sua classificação.

Foram eliminados da amostra os veículos do tipo 3S1, 2C2, 3C2, 3C3, 3I3, pois cada um deles representa menos que 0,1% do total de caminhões.

Figura 7.1 – Percentual de cada tipo de caminhão

7.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

O modelo proposto consiste em, através das distribuições de probabilidade de passagem e de pesos para cada uma das categorias de veículos, gerar, por simulações de Monte Carlo, carregamentos aleatórios que podem ocorrer ao longo da vida útil da estrutura. Os esforços solicitantes característicos são obtidos da extrapolação da distribuição de máximos anuais.

Existem, no problema analisado, diversas variáveis aleatórias. Além da probabilidade de passagem diária de veículos e da probabilidade de pesos brutos dos veículos, podemos listar as seguintes:

- distância entre os eixos dos veículos, variável para cada tipo de veículo e muitas vezes para um mesmo tipo de veículo;
- proporção de carga sustentada por cada eixo;
- distância entre os veículos.

As três variáveis citadas acima serão consideradas neste estudo como valores determinísticos.

Além disso, foram utilizadas as seguintes considerações:

- as distâncias entre eixos foram consideradas com base na média dos veículos reais para cada tipo;
- as medidas de comprimento utilizadas foram múltiplas de 0,5 metro, conforme tabela 5;
- os eixos adjacentes foram agrupados;
- na largura, cada caminhão ocupa uma faixa de tráfego de 3,5 metros.

7.3.1 Determinação das distribuições de quantidades

Como os períodos de tempo de pesagem são variáveis em cada dia, fez-se uma uniformização dos dados de quantidades de veículos padronizando-se o tempo de pesagem. Foram eliminados da amostra 15 dias de pesagem, totalizando 189 dias, por conterem pouco tempo de pesagem ou dados aparentemente errados. Assim, tem-se, para um tempo de pesagem padronizado de 745 minutos (tempo máximo das pesagens diárias), a distribuição de quantidades de veículos pesados dados pela figura 7.2. Essa distribuição possui média 1.221 e desvio padrão 175.

Figura 7.2 – Histograma de quantidade de veículos que passaram pela pesagem

Os veículos leves também foram considerados no problema. O Volume Diário Médio relativo ao ano de 2005, fornecido pela *Centrovias S.A.*, foi de 5.493 veículos de passeio e 3.083 veículos comerciais (incluídos ônibus e caminhões). Como os dados de pesagem contemplam apenas caminhões, fez-se uma simplificação, considerando-se os ônibus equivalentes a caminhões leves que tenham sido pesados.

Neste problema, interessa a proporção de veículos entre leves e pesados, e não a quantidade diária. Deste modo, foi necessária uma mudança de base para as quantidades de veículos a partir da média das pesagens efetuadas. Com isso, a quantidade de veículos leves equivalentes aos 1.221 veículos comerciais que foram pesados passa a ser de 2.175.

Em relação aos veículos leves, estes foram considerados como um tipo único, e a distribuição da sua passagem diária foi assumida como normal, com média de 2.175 e coeficiente de variação de 12%, conforme os dados de VDM fornecidos pela concessionária.

Já para os veículos pesados, construiu-se o histograma de quantidades para cada um dos tipos, conforme exemplificado na figura 7.3 para o tipo 2C.

Figura 7.3 – Histograma de quantidade de veículos – 2C

Em seguida, os dados de quantidades foram plotados em papel de probabilidade para a obtenção empírica dos parâmetros da distribuição, através da equação das retas ajustadas aos pontos plotados (conforme Ang e Tang, 1975 e Schneider, 1997).

Figura 7.4 – Dados plotados em Papel de Probabilidade Normal - passagens de veículos 2C

Assim, obteve-se a distribuição contínua com função densidade de probabilidade e função de probabilidade acumulada apresentadas nas figuras 7.5 e 7.6.

Figura 7.5 – Função densidade de Probabilidade Normal – passagens de veículos 2C

Figura 7.6 – Função de Distribuição Acumulada Normal – passagens de veículos 2C

Para as quantidades de cada um dos diversos tipos de veículo, utilizou-se as distribuições de probabilidades apresentadas na tabela 7.1. Os histogramas e gráficos das distribuições ajustadas estão no Anexo A.

Tabela 7.1 – Distribuições contínuas obtidas para quantidades de veículos

TIPO DE VEÍCULO	DISTRIBUIÇÃO	PARÂMETROS	
		Média	Coef. de Variação
2C	Normal	318,2	18%
3C	Normal	62,9	20%
2S1	Lognormal	22,3	75%
4C	Exponencial	2,52	-
2S2	Lognormal	39	64%
2I2	Exponencial	5,8	-
2S3	Normal	310,8	24%
2C3	Exponencial	5,4	-
3S2	Exponencial	3,5	-
3I2	Exponencial	3,5	-
3S3	Normal	62	30%
2I3	Exponencial	23,4	-
3D4	Normal	98,6	32%
3T6	Exponencial	4,0	-

7.3.2 Determinação das distribuições de pesos brutos totais e por eixo

No caso dos veículos leves, efetuou-se a média ponderada dos pesos dos veículos vendidos no Brasil ao longo do ano de 2005 (Fenabrave, 2006). Considerou-se os veículos com seu peso próprio mais metade da carga útil, resultando em um peso médio total de 12,95 kN, sendo 6,47 kN por eixo. Esse valor médio foi, portanto, considerado fixo nos cálculos.

Já no caso dos veículos pesados, utilizou-se os dados obtidos nas pesagens para cada um dos tipos de veículos. Novamente, montou-se o histograma de pesos brutos para cada um dos tipos de veículo. Em seguida, através de papel de probabilidade apropriado, obtiveram-se os parâmetros das distribuições contínuas. Finalmente, obteve-se a função densidade de probabilidades e a função de probabilidade acumulada para cada um dos tipos de veículo. Algumas distribuições, no entanto, não possuem papel de probabilidade, como a distribuição bimodal normal (O'Connor e O'Brien, 2005), que aparece, por exemplo, nos veículos 3S2. Nesses casos, foi feito o teste de Kolmogorov-Smirnov, que busca uma função de distribuição acumulada aproximada à distribuição discreta acumulada.

Figura 7.7 – Função de Probabilidade Acumulada Contínua e Discreta

Figura 7.8 – Função Densidade de Probabilidade Bimodal e Distribuição Discreta

Com isso, os tipos de distribuições encontradas para o peso bruto total dos veículos e seus parâmetros estão mostrados na tabela 7.2.

Para a divisão das cargas por eixo, obteve-se a divisão média para cada um dos tipos de veículos, considerando-se os veículos que foram pesados. Os eixos adjacentes foram agrupados em eixos únicos. As proporções de pesos entre os eixos e conjuntos de eixos encontram-se na tabela 7.3. Considera-se que as cargas extremas por eixo são importantes apenas para as lajes, que devem ser estudadas separadamente.

Tabela 7.2 – Distribuições contínuas obtidas para peso bruto total dos veículos

TIPO DE VEÍCULO	DISTRIBUIÇÃO	PARÂMETROS		
		Média		Coeficiente de Variação
2C	Lognormal	74,7		66%
3C	Normal Bimodal	$\rho_1=0,4$	$\mu_1 = 220,4$	7%
		$\rho_2=0,6$	$\mu_2 = 137,3$	21%
2S1	Normal	158,5		22%
4C	Normal Bimodal	$\rho_1=0,92$	$\mu_1 = 311,4$	17%
		$\rho_2=0,08$	$\mu_2 = 120$	17%
2S2	Lognormal	213		63%
2I2	Normal Bimodal	$\rho_1=0,10$	$\mu_1 = 570,0$	5%
		$\rho_2=0,90$	$\mu_2 = 203,1$	12%
2S3	Normal Bimodal	$\rho_1=0,76$	$\mu_1 = 420$	5%
		$\rho_2=0,24$	$\mu_2 = 229$	39%
2C3	Normal Bimodal	$\rho_1=0,90$	$\mu_1 = 452,5$	3%
		$\rho_2=0,10$	$\mu_2 = 203,2$	29%
3S2	Normal Bimodal	$\rho_1=0,49$	$\mu_1 = 388$	8%
		$\rho_2=0,51$	$\mu_2 = 248,5$	16%
3I2	Normal Bimodal	$\rho_1=0,56$	$\mu_1 = 402,3$	11%
		$\rho_2=0,44$	$\mu_2 = 216$	18%
3S3	Normal Bimodal	$\rho_1=0,78$	$\mu_1 = 461,8$	2%
		$\rho_2=0,22$	$\mu_2 = 393,6$	15%
2I3	Normal Bimodal	$\rho_1=0,96$	$\mu_1 = 458,1$	2%
		$\rho_2=0,04$	$\mu_2 = 317,3$	37%
3D4	Normal	578,7		4%
3T6	Normal Bimodal	$\rho_1=0,95$	$\mu_1 = 752,4$	3%
		$\rho_2=0,05$	$\mu_2 = 400$	18%

Tabela 7.3 – Proporção de Cargas entre os eixos e conjuntos de eixos

TIPO DE VEÍCULO	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4	Eixo 5
2C	42%	58%	-	-	-
3C	27%	73%	-	-	-
2S1	27%	33%	39%	-	-
4C	34%	66%	-	-	-
2S2	23%	32%	45%	-	-
2I2	20%	34%	24%	22%	-
2S3	15%	26%	59%	-	-
2C3	13%	24%	21%	42%	-
3S2	18%	40%	42%	-	-
3I2	18%	42%	20%	20%	-
3S3	12%	34%	54%	-	-
2I3	12%	23%	21%	22%	22%
3D4	11%	31%	30%	28%	-
3T6	8%	23%	24%	22%	23%

7.3.3 Dimensões dos veículos

As dimensões dos veículos leves foram consideradas da mesma forma que na obtenção dos seus pesos brutos, ou seja, através de média ponderada das dimensões dos automóveis e caminhonetes vendidos ao longo do ano de 2005 no Brasil (Fenabreve, 2006). A dimensão do veículo médio obtida foi de 4 metros, tendo sido considerado 1 metro da face dianteira ao primeiro eixo e 2,5 metros entre os eixos.

Em relação aos veículos comerciais, nota-se que as planilhas de pesagem não apresentam as dimensões dos veículos pesados. Sabe-se que, dentro de cada classificação, as dimensões possuem variabilidade, de acordo com o fabricante. Portanto, adotaram-se medidas entre eixos e de comprimento para os veículos, através de inspeção efetuada em abril de 2006 na rodovia em estudo e com base em Ferreira (2006) e Chamon (1989). Para que a análise fosse feita de forma sistemática e prática, algumas simplificações foram adotadas em relação aos veículos, listados a seguir:

- as medidas de comprimento utilizadas foram múltiplas de 0,5 metro, conforme tabela 7.4;
- como já apresentado no item 7.3.2, os eixos adjacentes foram agrupados;
- na largura, cada caminhão ou veículo leve ocupa uma faixa de tráfego de 3,5 metros de largura.

Os veículos 2S3 e 3S3 possuem duas configurações típicas possíveis. Uma curta, como caminhão basculante, destinada ao transporte de areia e brita e outra mais longa, destinada a mercadorias com menor densidade. Após inspeção na rodovia estudada, em abril de 2006, e segundo Ferreira (2006), adotou-se que 20% dos

caminhões correspondem ao caso curto e 80% ao caso longo nos tipos 2S3 e 3S3. A tabela 7.4 apresenta os comprimentos adotados.

Tabela 7.4 – Distâncias entre eixos consideradas

CLASSE	CONFIGURAÇÃO	DISTÂNCIAS ENTRE EIXOS (m)						
		d1	d2	d3	d4	d5	d6	Compr.
2C		0,5	4,5	2,0	-	-	-	7,0
3C		1,0	6,0	3,5	-	-	-	10,5
2S1		1,0	4,5	7,5	4,5	-	-	17,5
4C		1,0	5,0	2,5	-	-	-	8,5
2S2		1,5	4,5	7,0	3,5	-	-	16,5
2I2		1,0	4,5	6,0	2,5	1,5	-	15,5
2S3C (curto)		1,5	4,5	4,0	2,5	-	-	12,5
2S3L (longo)		1,5	4,5	6,5	4,0	-	-	16,5

2C3		1,5	6,0	4,0	4,5	1,5	-	17,5
3S2		1,5	5,0	7,0	2,0	-	-	15,5
3I2		1,5	5,0	7,0	2,5	1,0	-	17,0
3S3C (curto)		1,5	5,0	4,5	2,5	-	-	13,5
3S3L (longo)		1,5	5,0	7,0	3,5	-	-	17,0
2I3		1,5	4,5	4,0	2,5	2,5	1,5	16,5
3D4		1,5	4,0	6,5	4,5	2,5	-	19,0
3T6		1,5	5,0	6,5	4,5	6,5	2,5	26,5

7.4 SEQUÊNCIA DE CÁLCULOS

7.4.1 Descrição dos cálculos

Com a distribuição de quantidades de cada tipo de veículo, a primeira etapa dos cálculos consiste em gerar tráfegos fictícios diários, no qual, para cada um dos dias, é gerada a quantidade para cada tipo de veículo, através de simulações de Monte Carlo.

É necessário que se tenha uma função de distribuição acumulada de quantidades para cada tipo de veículo. Através de um gerador de números aleatórios, obtém-se número n entre 0 e 1. Sendo $F(x)$ a função de distribuição acumulada de quantidades de veículos por dia, $F^{-1}(n)$ será a igual à quantidade q de passagens desse veículo. Gerando diversos números aleatórios, cada um para um tipo de veículo, tem-se uma quantidade fictícia de veículos em um dia. Repetindo-se o procedimento várias vezes, pode-se obter o tráfego para qualquer quantidade de dias. Para um dia qualquer, a figura 7.10 mostra o resultado obtido.

Figura 7.9 - Determinação por simulações de Monte Carlo da quantidade de veículos de um tipo em 1 dia

Figura 7.10 – Tráfego gerado para 1 dia

Em seguida, para atribuir o tráfego à ponte, o primeiro passo é gerar as filas de veículos. Mais uma vez, utiliza-se o princípio das simulações de Monte Carlo. Todos os veículos que compõem o tráfego diário são numerados. Geram-se, então, números aleatórios inteiros de 1 até N (número total de veículos diário). Para cada número gerado, tem-se um tipo de veículo correspondente, que será o veículo gerado. Repete-se o procedimento até que se tenham veículos suficientes para preencher uma faixa de tráfego da ponte. Em seguida e da mesma forma, geram-se as demais faixas do tabuleiro. Para cada um dos dias, foram gerados diversos cenários de congestionamento, representando as suas possíveis ocorrências diárias.

Por exemplo, para um dado dia com tráfego mostrado na figura 7.11, temos N veículos compondo o tráfego total diário. Se o gerador de números aleatórios forneceu, na seqüência, os números 33, 12 e 25, significa que o primeiro veículo será do Tipo 4, o segundo do Tipo 3 e o terceiro novamente do Tipo 4.

Figura 7.11 – Obtenção da fila de veículos

No caso de rodovia com mais de uma faixa de tráfego, normalmente a faixa da direita encontra-se mais carregada, contendo mais veículos pesados e menos veículos de passeio. É possível simular as modificações nos tráfegos conforme a condição da faixa, reduzindo-se a quantidade possível de caminhões ou automóveis para aquela faixa. A figura 7.12 ilustra esse procedimento.

Figura 7.12 – Alteração do tráfego em faixas lentas ou expressas

Já com as filas de veículos definidas, deve-se agora atribuir as cargas a cada um dos veículos. Novamente utilizando simulações de Monte Carlo, com base nas funções inversas de distribuição acumuladas para peso bruto total de cada um dos tipos de veículos, obtém-se a carga total por veículo. A divisão das cargas por eixo é efetuada conforme já discutido no item 7.3.2. Nos casos de distribuições bimodais, faz-se necessário a geração de 2 números aleatórios para cada veículo, conforme já mostrado no capítulo 5.

Figura 7.13 - Determinação por Monte Carlo do Peso Bruto Total de um veículo

Em seguida, calculam-se os esforços solicitantes desejados para as cargas dos eixos dos veículos em seções críticas através de linhas de influência, conforme mostrado na figura 7.14. Neste trabalho, analisam-se os momentos fletores no meio do vão e as forças cortantes na seção adjacente ao apoio, para vigas biapoiadas, e o momento no apoio central em vigas contínuas de 2 vãos, cujas linhas de influência estão apresentadas na figura 7.15.

De acordo com a Norma NBR 8681 (ABNT, 2003), os valores característicos devem ser considerados em distribuições de extremos correspondentes a um período convencional de referência de 50 anos, admitindo como independentes entre si os valores extremos que agem nos diferentes anos de vida da obra. Além disso, os valores característicos correspondem a valores que têm de 25% a 35% de probabilidade de serem ultrapassados no sentido desfavorável, durante um período

de 50 anos. Portanto, corresponde à probabilidade de 0,57% a 0,86% de serem ultrapassados em 1 ano.

Figura 7.14 – Cálculo do esforço solicitante através da soma dos efeitos das faixas de tráfego

Figura 7.15 – Linhas de influência utilizadas

Foram considerados 200 dias anuais para efeito de análise, tomando-se 2.000 casos como total, e, portanto, serão 10 cenários diários de tabuleiros congestionados. Deste modo, calcula-se o esforço desejado para cada um dos cenários de tabuleiro, obtendo-se, após as análises, o máximo esforço anual. É importante salientar que a quantidade de cenários de análise poderia ser aumentada, mantendo-se o procedimento descrito, para rodovias mais congestionadas, em estudos futuros.

Para a obtenção da distribuição de máximos anuais, foram adotados 50 pontos de máximos, que correspondem a 50 anos. A distribuição de máximos é ajustada a uma distribuição de Gumbel tipo I com o auxílio de papel de probabilidade adequado, e assim, são obtidos os parâmetros da distribuição. Já com esses parâmetros, considerando-se análise linear, é possível obter-se a carga característica conforme a definição da NBR 8681 (ABNT, 2003) e compará-la com o efeito do trem-tipo 45. Um exemplo de cálculo completo do esforço solicitante característico é apresentado no apêndice C.

Figura 7.16 – Distribuição de máximos anuais típica

7.4.2 Planilhas desenvolvidas

Para a efetivação dos cálculos foram desenvolvidos aplicativos em *Microsoft Excel*. Os programas consistem de planilhas e macros elaboradas através das ferramentas do *Visual Basic*. As planilhas foram organizadas conforme apresentado na figura 7.17 e as listagens das macros estão apresentadas no Anexo A. As figuras 7.18 a 7.21 mostram a interface gráfica das planilhas. As distribuições de quantidades e de

pesos totais, bem como as linhas de influência estão contidas nas macros. No entanto, são de fácil manipulação, permitindo a alteração de todos os dados de entrada.

Figura 7.17 – Sequência de cálculo através das planilhas

As listagens das macros estão apresentadas no apêndice B, para 2 faixas de tráfego. Deve-se ter cuidado especial com as limitações do *Microsoft Excel* (máximo de linhas por planilha), e pequenas alterações são necessárias para análise de mais de 2 faixas de tráfego. No caso de 3 faixas, cada planilha do arquivo conterà 3 anos de análise; já para 4 faixas, cada planilha comportará somente 2 anos de análise.

7.4.2.1 Planilha Montagem Dias

A macro desta planilha contém todas as funções de probabilidade acumuladas inversas de quantidades de cada um dos tipos de veículos. São gerados tantos números aleatórios quantos forem os tipos de veículos para cada dia, e assim, é obtida a quantidade total de cada um dos tipos para cada dia (figura 7.18).

Figura 7.18 – Planilha para montagem dos tráfegos diários – *Monta Dias*

7.4.2.2 Planilha Monta Cenários

A macro contida nesta planilha tem a função de gerar que tipo de veículo estará em cada faixa em seqüência. Ela lê a planilha Monta Dias, e para cada dia, gera tantos cenários quantos forem necessários para a análise. Neste ponto, pode ser modificado o tráfego em cada faixa, simulando as faixas lentas e expressas (figura 7.19).

Figura 7.19 – Planilha para montagem das filas de veículos – *Monta cenários*

7.4.2.3 Planilha Monta Trem de Carga

Esta planilha possui macro que contém todas as funções de probabilidade acumuladas inversas de pesos brutos totais, para cada tipo de veículo. Ela faz a leitura da planilha Monta Cenários, e, para cada tipo de veículo lido, determina o peso total por Monte Carlo e distribui as cargas para cada conjunto de eixos conforme divisão pré-determinada. Essa planilha possui como dados de entrada o vão da ponte e a distância entre os veículos (figura 7.20).

Figura 7.20 – Planilha para atribuição das cargas para cada veículo – *Monta Trem de Carga*

7.4.2.4 Planilha Calcula Esforço

Esta macro lê a planilha Monta Trem de Carga e calcula os esforços nas seções transversais cujas linhas de influência foram implementadas (figura 7.15). A figura 7.21 mostra a planilha e a caixa de entrada de dados da macro.

Figura 7.21 – Planilha para cálculo de momento fletor no meio do vão – *Calcula Esforço*

CAPÍTULO 8

ANÁLISES E RESULTADOS

8.1 ANÁLISES EFETUADAS

De acordo com o modelo descrito anteriormente, foram efetuadas diversas análises de esforços solicitantes globais para alguns vãos, mostrados a seguir. Os vãos estudados foram de 30, 40, 60, 80 e 200 metros, por representarem vãos usuais de obras de arte projetadas e construídas nos dias de hoje. Para cada um dos vãos, foram analisados os casos de pontes com duas, três e quatro faixas de tráfego.

A disposição do tráfego por faixa pode depender de vários fatores, como a composição do tráfego, a velocidade, o volume, o número e localização dos pontos de acesso, a origem e destino das viagens, o meio ambiente e o hábito de dirigir dos motoristas (Gomes, 2003). Não existe, portanto, uma distribuição padrão de

veículos por faixas, sendo que os veículos pesados trafegam usualmente pelas faixas à direita da via, particularmente pela sua baixa velocidade e devido às regras de circulação que possam proibir o seu tráfego nas faixas à esquerda.

No caso das pontes com duas faixas de tráfego, foi efetuada a análise de três situações. A primeira delas (tráfego PS) compreende as pontes situadas em rodovias de pista simples, com cada uma das faixas correspondendo ao tráfego em uma direção. Para o caso das rodovias de pista dupla, foram alterados os tráfegos das duas faixas, para representar o tráfego da faixa lenta - direita (com predominância de caminhões) e da faixa expressa - esquerda (com predominância de automóveis). A fim de aumentar a probabilidade de caminhões na faixa da direita, a quantidade de automóveis possíveis nesta faixa foi reduzida em 20%. Em relação à faixa da esquerda, em uma primeira situação (tráfego A), que representa uma rodovia com tráfego mais carregado, considerou-se uma quantidade de caminhões possíveis nesta faixa, de 50%. Já para representar uma rodovia com tráfego usual (tráfego B), e utilizando parâmetro de Ferreira (2006), considerou-se a quantidade de caminhões possíveis na esquerda de 20% do total de caminhões.

No caso de 3 faixas, foi considerada uma redução no tráfego da faixa mais à esquerda, de 95% dos caminhões. Foi efetuada também a análise de quatro faixas, com redução de 90% dos caminhões na terceira, e 95% na quarta faixa.

Tabela 8.1 – Situações de tráfego analisadas

Tráfego	Faixa 1		Faixa 2		Faixa 3		Faixa 4	
	autos	caminh	autos	caminh	autos	caminh	autos	caminh
PS	100%	100%	100%	100%	-	-	-	-
PD A	80%	100%	100%	50%	-	-	-	-
PD B	80%	100%	100%	20%	-	-	-	-
PT	80%	100%	100%	20%	100%	5%	-	-
PQ	80%	100%	100%	20%	100%	10%	100%	5%

Os esforços determinados pelo modelo de verificação são comparados com os esforços provenientes do trem-tipo da norma brasileira. Para esta comparação, considerou-se faixas de tráfego de 3,5 metros de largura, seguindo as especificações do DER-SP (2006) e do DNIT (1996).

De acordo com o modelo, pode-se variar as distâncias entre os veículos nas diversas análises, porém, para uma mesma análise, esta distância é considerada constante.

Conforme apresentado anteriormente, a NBR 8681 (ABNT, 2003) não determina precisamente o quantil correspondente ao esforço característico na distribuição de máximos. A probabilidade de ocorrência deve estar entre 0,57% e 0,86% ao ano, de acordo com a mesma norma, que correspondem, respectivamente, aos quantis 99,43% e 99,14%.

Após a obtenção dos máximos anuais e conforme o modelo proposto, a determinação da distribuição de máximos foi feita através de papel de probabilidade de Gumbel-Tipo I. Ang e Tang (1984) e Schneider (1997) propõem diferentes maneiras de se plotar os pontos no papel de probabilidade. Os dois métodos foram utilizados, sendo que o método de Schneider (1997), que é apresentado especificamente para determinação dos valores extremos, fornece valores ligeiramente maiores para o esforço característico. Os resultados a seguir são obtidos através deste método. Um exemplo de cálculo completo é mostrado no anexo C.

Inicialmente são consideradas pontes celulares, tal que os efeitos globais possam ser considerados sem a preocupação de distribuição transversal de esforços. Esta hipótese é válida porque as seções celulares possuem grande rigidez à torção, por serem seções fechadas, e assim podem ser analisadas como vigas únicas.

8.2 PONTE BIAPOIADA COM 2 FAIXAS DE TRÁFEGO

Para o caso PS (2 faixas de tráfego e pista simples), apresentam-se, nas tabelas 8.2 e 8.3, os resultados de momento fletor no meio do vão e força cortante na seção do apoio de pontes biapoiadas, para as probabilidades de ocorrência de 0,57% e 0,86% ao ano. Observa-se que os valores de esforço, para cada caso de espaçamento, são sempre muito próximos, com diferenças de, no máximo, 1,7% entre si.

Tabela 8.2 – Momentos Fletores característicos (kN.m) no meio do vão em pontes celulares isostáticas – 2 faixas de tráfego (Pista Simples)

Espaçamento entre veículos	Probabilidade de ocorrência	Vão				
		30 m	40 m	60 m	80 m	200 m
1 m	0,57% a.a.	7446	12543	25757	44916	236458
	0,86% a.a.	7364	12380	25467	44327	233366
2 m	0,57% a.a.	7084	12097	24403	43221	216402
	0,86% a.a.	7011	11948	24121	42596	213663
5 m	0,57% a.a.	6776	10927	21786	38198	186466
	0,86% a.a.	6694	10788	21510	37662	183954
10 m	0,57% a.a.	6863	10116	19705	31884	155759
	0,86% a.a.	6742	9957	19430	31404	153185

Tabela 8.3 – Forças Cortantes características (kN) na seção do apoio em pontes celulares isostáticas – 2 faixas de tráfego (Pista Simples)

Espaçamento entre veículos	Probabilidade de ocorrência	Vão				
		30 m	40 m	60 m	80 m	200 m
1 m	0,57% a.a.	936	1249	1718	2178	4591
	0,86% a.a.	926	1231	1695	2149	4539
2 m	0,57% a.a.	946	1175	1712	2025	4335
	0,86% a.a.	935	1163	1684	2002	4278
5 m	0,57% a.a.	913	1153	1554	1989	3741
	0,86% a.a.	901	1137	1529	1956	3689
10 m	0,57% a.a.	917	1064	1513	1831	3161
	0,86% a.a.	904	1052	1487	1795	3108

Como os valores para as duas probabilidades são muito próximos, não há a necessidade de se fazer todos os cálculos para os dois casos. Assim, optou-se pela apresentação dos resultados para a probabilidade de ocorrência média de 0,7% ao ano, que corresponde a um período de retorno de 140 anos.

Os gráficos das figuras 8.1, 8.2 e 8.3 apresentam, respectivamente, a variação do viés (esforço característico obtido pelo modelo/esforço máximo na seção obtido pelo TT45), para os momentos fletores no meio do vão para duas faixas de tráfego nas situações PS, PD-A e PD-B, em uma ponte celular biapoiada.

Figura 8.1 – Variação do viés de momento fletor para o caso PS – ponte biapoiada

Figura 8.2 – Variação do viés de momento fletor para o caso PD-A – ponte biapoiada

Figura 8.3 – Variação do viés de momento fletor para o caso PD-B – ponte biapoiada

Observa-se que, para 1 metro de espaçamento entre veículos, no caso do vão de 30 metros, o viés está entre 1,14 (PS), e 1,08 (PD-B). À medida em que se aumenta o vão, esse viés sofre aumento, atingindo o seu máximo entre 60 e 80 metros, com valores de até 1,30. Para o vão de 200 metros, tem-se um declínio desses valores, estabilizando-se em 1,22 na situação PS, e 1,08 para a situação PD-B.

Modificando-se o espaçamento para 2 metros, a variação do viés segue a curva para espaçamento de 1 metro, porém com valores ligeiramente menores. Para 200 metros de vão, os valores oscilam entre 1,10 (PS e PD-A) e 1,0 (PD-B).

No caso do espaçamento de 5 metros, o viés está sempre em torno de 1,10, excetuando-se para 200 metros de vão, quando este cai a valores menores que a unidade.

A análise do espaçamento de 10 metros entre os veículos mostra que para todos os vãos, excetuando-se em 30 metros, o viés é sempre menor que 1. Isso significa que, no caso de 2 faixas com pista simples ou dupla, para distâncias maiores que 10 metros entre os veículos, o coeficiente de impacto que cobriria o trem-tipo poderia ser 1.

Para vãos pequenos, é esperado que os vieses apresentem valores próximos, independentemente da situação de tráfego ou do espaçamento entre os veículos. Isto decorre da proximidade entre os comprimentos da ponte e dos veículos mais longos e carregados.

Figura 8.4 – Variação do viés de força cortante para o caso PS – ponte biapoiada

Figura 8.5 – Variação do viés de força cortante para o caso PD-A – ponte biapoiada

Figura 8.6 – Variação do viés de força cortante para o caso PD-B – ponte biapoiada

Já o caso de força cortante na seção do apoio está apresentado nas figuras de 8.4 a 8.6. Para 1 metro de espaçamento entre veículos, no caso do vão de 30 metros, o viés fica próximo de 1,05 em todos os casos. À medida em que se aumenta o vão, esse viés sofre aumento, atingindo o seu máximo para 80 metros de vão, alcançando 1,22. Para o vão de 200 metros, tem-se um declínio desses valores, estabilizando-se em 1,18 na situação PS, e 1,04 para a situação PD-B.

Para 2 metros de espaçamento, o viés tem máximo de 1,19 para 60 metros (PS), chegando, para 200 metros de vão e situação PD-B, a 0,96.

No caso de 5 metros de espaçamento, o viés máximo é de 1,11, para PS e PD-A, e mínimo de 0,83, para vão de 200 metros e PD-B.

Assim como no caso dos momentos fletores, o viés, para 10 metros de espaçamento entre os veículos, tem a maioria dos seus valores menores que 1, excetuando-se para 30 metros de vão, onde atinge 1,04. O mínimo é, para 200 metros e PD-B, de 0,75.

Os gráficos das figuras 8.7 a 8.9 apresentam as variações do viés para momento fletor comparadas com a força cortante, para 1 metro e 10 metros de espaçamento entre veículos. Observa-se que, em todos os casos de tráfego, para 1 metro, o viés de força cortante é sempre desfavorável, enquanto que, para 10 metros, o viés de momento fletor é o mais crítico.

Figura 8.7 – Variação comparativa do viés de momento fletor e força cortante para o caso PS ponte biapoiada

Figura 8.8 – Variação comparativa do viés de momento fletor e força cortante para o caso PD-A – ponte biapoiada

Figura 8.9 – Variação comparativa do viés de momento fletor e força cortante para o caso PD-B – ponte biapoiada

8.3 PONTE CONTÍNUA DE 2 VÃOS IGUAIS (2 FAIXAS)

Em seguida, foi efetuada a análise de dois casos de pontes contínuas com 2 vãos iguais. As pontes estudadas possuem 2 vãos de 40 metros e 2 vãos de 100 metros, e

a variação do viés (esforço obtido pelo modelo/esforço do TT45), para os momentos fletores no apoio central, para duas faixas de tráfego nas situações PS, PD-A e PD-B estão apresentados nas figuras 8.10 a 8.12.

Para o caso PS e vãos de 40 metros, o viés é de 1,23 para 1 metro de espaçamento e 0,9 para 10 metros de espaçamento entre os veículos. Para 5 metros de espaçamento, o viés está sempre próximo da unidade. Já no caso dos vãos de 100 metros, calculou-se viés entre 0,82 e 1,21.

Na situação PD-A, o viés é de 1,15 tanto para os vãos de 40 m como de 100 metros, considerando o espaçamento entre os veículos de 1 metro. Novamente, o viés de 1,0 corresponde ao espaçamento de 5 metros. Os valores mínimos são, respectivamente para 40 e 100 m, 0,90 e 0,76.

Obviamente, na situação PD-B, os vieses são menores, com máximo de 1,10 (vão de 40 metros – espaçamento 1 metro) e mínimo de 0,73 (vão de 100 metros e espaçamento de 10 metros entre veículos). Neste caso, o espaçamento entre veículos correspondente ao viés unitário foi de 2 metros.

Figura 8.10 – Variação do viés de momento fletor no apoio central para o caso PS – ponte contínua com dois vãos iguais

Figura 8.11 – Variação do viés de momento fletor no apoio central para o caso PD-A –
ponte contínua com dois vãos iguais

Figura 8.12 – Variação do viés de momento fletor no apoio central para o caso PD-B –
ponte contínua com dois vãos iguais

8.4 PONTE BIAPOIADA COM 3 FAIXAS DE TRÁFEGO

As figuras 8.13 e 8.14 apresentam, respectivamente, a variação do viés para momento fletor e força cortante, para a situação de pista tripla, com três faixas no mesmo sentido de direção. Foram analisados os vãos de 40, 80 e 200 metros. Observa-se que somente para 40 metros de vão o viés é maior que 1. Para momento fletor no meio do vão de 80 metros, o viés é igual a 1 para espaçamento de 1 metro entre veículos. Nos demais casos, o viés é sempre menor que a unidade. Isto ocorre, provavelmente, porque o trem-tipo da NBR 7187 não prevê redução na carga de multidão para três faixas de tráfego no mesmo sentido, diferentemente do *Eurocode* e das normas da *AASHTO*, que reduzem a carga para mais de três faixas.

Figura 8.13 – Variação do viés de momento fletor para o caso de pista tripla – ponte biapoiada

Figura 8.14 – Variação do viés de força cortante para o caso de pista tripla – ponte biapoiada

8.5 PONTE BIAPOIADA COM 4 FAIXAS DE TRÁFEGO

As figuras 8.15 e 8.16 apresentam, respectivamente, a variação do viés para momento fletor e força cortante, para a situação de pista com quatro faixas no mesmo sentido de direção. Foram analisados os vãos de 40, 80 e 200 metros, com os veículos espaçados de 1, 5 e 10 metros. Para força cortante o viés é sempre menor que 1, reduzindo-se à medida em que se aumenta o vão. Para momento fletor e 40 metros de vão, o viés atinge 1,07, mas para os outros vãos os valores são sempre menores que a unidade. Assim como no caso de 3 faixas de tráfego, nota-se que os baixos resultados são decorrentes da não-redução do valor da carga de multidão para múltiplas faixas.

Figura 8.15 – Variação do viés de momento fletor para o caso de com 4 faixas com tráfego no mesmo sentido – ponte biapoiada

Figura 8.16 – Variação do viés de força cortante para o caso de com 4 faixas com tráfego no mesmo sentido – ponte biapoiada

8.6 PONTE EM GRELHA

Para a ampliação da análise às pontes em grelha, faz-se necessário o estudo da distribuição transversal de esforços. Tal distribuição pode ser efetuada por diversos métodos simplificados analíticos, ou ainda pela utilização de modelos resolvidos pelo Método dos Elementos Finitos. Neste estudo será utilizado o método de Fauchart (1972), que é adequado às pontes sem transversinas intermediárias.

Foi utilizada como referência a ponte sobre o rio Sapucaí, que está localizada no km 372 da rodovia SP-334 – Cândido Portinari, no estado de São Paulo, cujo projeto é de autoria da *EGT Engenharia Ltda.*, para a *Autovias S.A.*, concessionária da rodovia. Tal estrutura possui 4 vãos isostáticos, sendo 3 de 32 metros e 1 de 7 metros de extensão. A seção transversal compõe-se de 5 longarinas pré-moldadas, espaçadas de 2,65 metros, cada uma com 1,60 metro de altura, e de laje superior de 20 cm de altura, executada em duas etapas, através de pré-lajes e em concretagem posterior. Tem-se transversinas somente nos apoios. As figuras 8.17 e 8.18 ilustram a longarina e a seção transversal da ponte, que foi projetada para uma via de pista dupla, com duas faixas de 3,50 m, acostamento de 3,0 m e refúgio central de 1,0 m. Para efeito deste estudo, o vão foi aproximado para 30 metros.

Figura 8.17 – Seção transversal da viga pré-moldada (medidas em cm)

Figura 8.18 – Seção transversal da superestrutura da ponte (medidas em cm)

As linhas de influência transversais de carga nas longarinas, obtidas pelo método de Fauchart (1972), estão apresentadas nas figuras 8.19 a 8.21. De forma aproximada, pode-se considerar a distribuição transversal de esforços como constante ao longo do vão da obra.

Figura 8.19 – Linha de Influência de carga na longarina V1 – de extremidade

Figura 8.20 – Linha de Influência de carga na longarina V2 - intermediária

Figura 8.21 – Linha de Influência de carga na longarina V3 - central

Foram consideradas as seguintes situações de posições para os veículos em tráfego: sentido único (situação atual), com refúgio à esquerda e sem refúgio, e três faixas de tráfego (situação futura possível), sem acostamento e refúgio.

Para a primeira situação, são considerados os casos de tráfego PD-B e PS, definidos anteriormente, com espaçamento longitudinal de 1 metro entre os veículos. Já para a situação futura, de 3 faixas, considera-se o tráfego em somente uma direção, PT, como já descrito, e também uma situação de dois sentidos de direção, sendo duas faixas para um dos lados, caso comum em rodovias de pista simples em trechos onde há a 3ª. Faixa (será chamado de PS-3F). Nesta última, existirão 2 faixas como PD-B e 1 faixa com 100% do tráfego. Em todos os casos, os veículos foram considerados centralizados na faixa e, a distância transversal entre rodas, de 2,0 metros.

Foi aplicado, sobre a linha de influência, os trens de carga com maior efeito longitudinal, obtidos entre os máximos anuais em cada caso.

Figura 8.22 – Situação de carregamento 1 – com refúgio de 1,0 m

Figura 8.23 – Situação de carregamento 2 – sem refúgio de 1,0 m

Figura 8.24 – Situação de carregamento 3 – três faixas de tráfego

As tabelas 8.4 e 8.5 apresentam os trens de carga críticos obtidos, respectivamente, para as situações PD-A e PS. A primeira linha indica a coordenada da carga em metros, a segunda linha, o valor da carga em kN, e, a terceira linha, o tipo de veículo e o conjunto de eixos respectivo.

Tabela 8.4 - Trem-tipo de $M_{\max}$ – PD-B

FAIXA 1		1,50	6,50	13,50	19,00	24,00	28,50	
		55,13	156,21	248,10	125,68	243,97	58,65	
		3S3LE1	3S3LE2	3S3LE3	4CE1	4CE2	3CE1	
FAIXA 2	1,00	3,50	6,50	10,50	17,00	21,50	26,00	28,50
	6,48	6,48	66,09	186,26	180,25	168,23	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2

Tabela 8.5 - Trem-tipo de $M_{\max}$ – PS

FAIXA 1	1,50	6,00	10,00	15,00	19,50	23,50	27,50	
	69,11	119,79	271,84	69,46	120,40	273,22	48,60	
	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	2CE1	
FAIXA 2	1,00	3,50	6,50	10,50	17,00	21,50	26,00	28,50
	6,48	6,48	65,77	185,35	179,37	167,41	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2

Para os casos de 2 faixas, os momentos fletores para o trem de carga e o momento fletor máximo do trem-tipo 45, no meio do vão, são dados na tabela 8.6. Observa-se que, para a ponte em grelha com 2 faixas de tráfego, a situação mais crítica é na longarina V2. Apesar disto, o momento fletor obtido para esta viga não atinge o máximo do TT45 na grelha, calculado na viga V1.

Já a tabela 8.7 apresenta as relações entre estes esforços. As relações calculadas para a seção em grelha são a favor da segurança, comparando-se com as relações obtidas na ponte celular, com redução mínima de cerca de 10%.

Tabela 8.6 - Momentos fletores nas longarinas – casos 1 e 2 (kN)

Seção transversal	M _{máx} TT45	PD-B		PS	
<i>Celular</i>	<i>6480</i>	<i>6803</i>		<i>6969</i>	
Grelha	-	(1)	(2)	(1)	(2)
V1	2340	1956	1404	2022	1462
V2	2220	2073	1881	2136	1940
V3	2184	1634	1800	1663	1833

Tabela 8.7 – Relação entre o momento fletor do trem de carga (2 faixas) e o momento máximo do TT45, no meio do vão – entre parênteses a diferença entre as relações para a longarina e para a ponte celular

Seção transversal	PD-B	PS
<i>Celular</i>	<i>1,05</i>	<i>1,08</i>
Grelha		
V1	0,84 (-20,4%)	0,86 (-19,6%)
V2	0,93 (-11,1%)	0,96 (-10,5%)
V3	0,82 (-21,5%)	0,83 (-23,3%)

As tabelas 8.8 e 8.9 apresentam os trens de carga críticos obtidos, respectivamente, para as situações PS-3F e PT. A primeira linha indica a coordenada da carga em metros, a segunda linha, o valor da carga em kN, e, a terceira linha, o tipo de veículo e o conjunto de eixos respectivo.

Tabela 8.8 - Trem-tipo de $M_{\max}$ – caso PS-3F

FAIXA 1		1,50	5,50	12,00	16,50	21,50	25,50		
		62,98	177,50	171,77	160,32	66,27	186,77		
		3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3D4E1	3D4E2		
FAIXA 2		1,00	3,50	6,50	10,50	17,00	21,50	26,50	
		6,48	6,48	64,10	180,64	174,81	163,16	69,87	
		autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2S3LE1	
FAIXA 3		1,00	3,50	6,00	8,50	11,50	15,50	22,00	26,50
		6,48	6,48	6,48	6,48	65,09	183,44	177,52	165,68
		autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4

Tabela 8.9 - Trem-tipo de $M_{\max}$ – caso PT

FAIXA 1		1,50	6,50	11,00	15,50	20,50	25,00	27,50	
		55,88	158,31	251,44	119,90	232,75	6,48	6,48	
		3S3CE1	3S3CE2	3S3CE3	4CE1	4CE2	autoE1	autoE2	
FAIXA 2		1,00	3,50	6,50	10,50	17,00	21,50	26,00	28,50
		6,48	6,48	62,91	177,29	171,57	160,13	6,48	6,48
		autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2
FAIXA 3	1,00	3,50	6,50	11,00	15,00	19,50	25,50		
	6,48	6,48	53,54	92,81	210,61	35,82	96,86		
	autoE1	autoE2	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	3CE1	3CE2		

Para os casos de 3 faixas, os momentos fletores para o trem de carga e o momento fletor máximo do trem-tipo 45, no meio do vão, são dados na tabela 8.6, enquanto a tabela 8.11 apresenta as relações entre estes esforços.

Tabela 8.10 - Momentos fletores nas longarinas – três faixas de tráfego (kN)

Seção transversal	$M_{\max}$ TT45	PS-3F	PT
<i>Celular</i>	8449	9586	9239
Grelha			
V1	2340	2034	1790
V2	2220	2337	2179
V3	2184	2153	2151

Tabela 8.11 – Relação entre o momento fletor do trem de carga (3 faixas) e o momento máximo do TT45, no meio do vão – entre parênteses a diferença entre as relações para a longarina e para a ponte celular

Seção transversal	PS-3F	PT
<i>Celular</i>	<i>1,13</i>	<i>1,09</i>
Grelha		
V1	0,87 (-30%)	0,77 (-23,4%)
V2	1,05 (-10,3%)	0,98 (-7,2%)
V3	0,99 (-9,9%)	0,98 (-13,1%)

Observa-se que, para a ponte em grelha com 3 faixas de tráfego, novamente a situação mais desfavorável é o momento fletor na longarina V2, que, por sua vez, não atinge o máximo para o TT45, obtido na viga V1. Nota-se também que as relações entre os esforços não atingem os valores obtidos para a ponte celular, com a redução mínima sendo de 7,2%.

Assim, se pode concluir que, se fosse efetuado o estudo estatístico para as pontes em grelha, os valores obtidos para o viés seriam, em geral, menores que os obtidos nas pontes celulares.

CAPÍTULO 9

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

9.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho avaliou a adequação do trem-tipo 45, dado pela norma de cargas em pontes rodoviárias, a NBR 7188 (ABNT, 1984), aos preceitos da norma de ações e segurança, NBR 8681 (ABNT, 2003), considerando-se o tráfego de veículos reais, com base em dados obtidos da concessionária *Centrovias Sistemas Rodoviários S. A.*, no interior de São Paulo.

Para permitir a correta comparação da norma brasileira com os dados de tráfego, foi necessário e possível a aproximação de distribuições teóricas aos histogramas de

quantidades de veículos e de peso total bruto, através de papel de probabilidade, quando disponível, e confirmação pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

A maioria dos tipos de veículos pesquisados obedece, em relação aos pesos brutos totais, à distribuição bimodal de probabilidades. Os dois picos mostram duas populações de veículos, carregados e descarregados.

A NBR 8681 (ABNT, 2003) define, como valores característicos das ações variáveis, aqueles que tenham 25% a 35% de probabilidade de serem ultrapassados, no sentido desfavorável, durante um período de 50 anos. Isso corresponde à probabilidade de ocorrência de 0,57% a 0,86% ao ano, ou a um período de retorno entre 116 e 174 anos. No caso específico das cargas móveis em pontes, as normas internacionais divergem bastante a respeito da probabilidade a ser considerada. Enquanto o *Eurocode* utiliza período de retorno de 1000 anos, as normas americanas adotam 75 anos. Propõe-se que a norma brasileira defina os valores característicos das cargas variáveis em pontes, como aqueles com probabilidade de ocorrência de 0,7% ao ano (ou 30% em 50 anos), que corresponde a um período de retorno de 140 anos. Futuramente e com maior aprofundamento nas pesquisas, este número poderia ser reduzido até para 100 anos.

Foram consideradas, nas análises, cenários de congestionamento com diversas distâncias entre os veículos, de 1 a 10 metros. Na situação real, a distância de 1 metro só é possível para veículos estacionados com esse propósito. Para vãos pequenos e médios, até 40 metros, é razoável supor que na condição de congestionamento se tenham veículos mantendo distâncias mínimas de 2 metros entre si, sem efeito dinâmico considerável. Nos casos de vãos maiores, esta distância mínima tende a aumentar, dado que o volume de veículos possível também aumenta. Assim, para distâncias pequenas entre os veículos, ou seja, com tráfego congestionado em repouso ou em baixas velocidades, é possível interpretar

o coeficiente de impacto aplicado ao trem-tipo 45 como um coeficiente adicional de segurança, já que o efeito dinâmico não seria considerável nestes casos. Esta discussão é tão relevante que, em estudos estatísticos para a calibração da norma americana, Nowak (1999) só considera a parcela dinâmica quando a distância entre os veículos atinge 15 metros.

O coeficiente de impacto, por sua vez, deve merecer maior atenção, sendo possível que seu valor deva ser alterado, considerando-se uma majoração, medida em monitoração, de cerca de 40% até vãos de 40 metros, podendo ser reduzido a partir deste valor, atingindo a unidade somente para vãos maiores, por exemplo, entre 100 e 200 metros. Vale lembrar que Penner (2001) apresenta relações carga dinâmica / carga estática da ordem de 1,4 para ponte com 40 metros de vão e que a norma americana especifica fator de impacto de 1,33 para quaisquer dimensões de vão.

A verificação e avaliação das cargas variáveis nas estruturas, especificamente das cargas móveis nas pontes, deve ser feita de maneira sistemática e de forma periódica, a fim de acompanhar a evolução da frota e modernização do transporte. Obviamente, neste trabalho, fez-se uma aproximação ao gerar-se os diversos anos fictícios. É desejável que se tenha séries anuais de dados para que, de tempos em tempos, seja refeita esta verificação e que, se necessário, façam-se correções no trem-tipo e adequações a rodovias com cargas específicas predominantes. É necessário que seja retomada a utilização de balanças em todas as rodovias e que se disponibilize os dados de pesagem de veículos das concessionárias de rodovias e da ANTT através de boletins, para que sejam possíveis para o meio técnico a elaboração de trabalhos como este, que visam a segurança da população e a preservação do patrimônio público.

9.2 CONCLUSÕES

A comparação direta das normas, sem a consideração dos dados de tráfego, mostra que o trem-tipo da norma brasileira fornece resultados para estado limite último compatíveis com o *Eurocode* e maiores que os das normas da *AASHTO*.

A principal contribuição deste trabalho foi a elaboração de procedimentos sistematizados de simulação de passagens de veículos em pontes. Dentro da realidade das rodovias brasileiras, priorizaram-se os cenários que representam congestionamentos, que são bastante freqüentes, tanto em vias urbanas quanto em auto-estradas.

Os resultados das análises de rodovias em pista dupla em um cenário bastante realista, no qual se consideram 2000 congestionamentos por ano, e a probabilidade de tráfego de caminhões na segunda faixa reduzida em 80%, mostraram que, em média, o viés (relação esforço característico/esforço máximo devido ao trem-tipo 45) atinge a unidade para 5 metros de espaçamento entre os veículos, e vãos maiores que 30 metros. Conclui-se que, nas condições consideradas, o trem-tipo é adequado às cargas ocorridas no período estudado.

Algumas vezes, o viés foi maior no caso da força cortante na seção do apoio que no caso do momento fletor no meio do vão. Este fato ocorreu principalmente nas situações nas quais o espaçamento entre os veículos era o mínimo. Isso mostra que, ao contrário do afirmado por diversos autores, o estudo da força cortante também é importante na verificação das cargas móveis.

Diante dos resultados obtidos, a existência do acostamento, ou de qualquer espaço adicional onde não haja tráfego regular, é de fundamental importância. Isto porque,

na fase de projeto, a carga é aplicada em todos os trechos do tabuleiro em que a sua presença seja desfavorável para o efeito estudado. Assim, especialmente nas pontes celulares, toda a largura do tabuleiro é carregada para a determinação dos esforços solicitantes globais, o que não ocorre, na realidade, nos trechos de acostamento ou refúgio. Com isso, é sempre necessário que exista o acostamento na obra-de-arte para que se tenha esse aumento na margem de segurança.

Nesse contexto, os resultados para três e quatro faixas de tráfego no mesmo sentido podem ser considerados como extensão da situação de pista dupla, como se houvesse tráfego no acostamento. Desta forma, ainda mostram-se favoráveis, podendo-se inclusive estudar uma redução da carga de multidão para faixas múltiplas de tráfego, a exemplo do que ocorre em outras normas.

Em rodovias somente com duas faixas de tráfego, em pista simples, sem acostamento ou refúgio, onde o tráfego é livre nos dois sentidos, não havendo faixa preferencial para veículos mais leves, encontram-se as pontes com menor margem de segurança. Os estudos mostraram que o viés só é menor que a unidade para espaçamentos no mínimo de 10 metros entre os veículos, onde algum efeito dinâmico já deve ser considerado. Este é um caso que deve ser melhor estudado, principalmente por estar presente em rodovias mais antigas, em geral em má conservação, porém com tráfego importante, como as rodovias federais. Existem, além disso, situações críticas também em vias urbanas, onde normalmente já não há acostamento, que recebem grandes proporções de veículos pesados em relação ao tráfego total. Como exemplo, citam-se os acessos às Marginais dos rios Tietê e Pinheiros, em São Paulo.

Apesar de não ter sido efetuado neste trabalho o estudo estatístico das pontes em grelha, fez-se um estudo comparativo, através do qual se concluiu que, para momento fletor no meio do vão em pontes biapoiadas, os valores do viés serão

sempre menores que nas seções celulares. É importante ressaltar que, na análise estatística, consideraram-se os veículos em sua posição de tráfego normal, ou seja, de forma centrada nas faixas. Por outro lado, em projeto, sempre se considera a posição mais desfavorável das cargas. Ou seja, o aparente excesso de segurança decorre principalmente do zelo no posicionamento transversal das cargas do veículo, que é correto do ponto de vista teórico, mas não deve ser considerado nas condições normais de tráfego. Vale observar que isso não ocorre nas pontes celulares.

9.3 TEMAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o prosseguimento da pesquisa nesta área podemos citar como possíveis temas:

- Avaliação da variabilidade das distâncias entre os veículos, podendo estas serem governadas por uma distribuição de probabilidades. Aparentemente, isto modificaria pouco os resultados e tenderia para os resultados com pequenas distâncias, já que somente os máximos anuais são utilizados na distribuição de extremos.
- Estudo do Estado Limite Último de Fadiga, no qual seria necessário o estabelecimento de um intervalo de tempo entre as passagens de veículos, que pode ser estimado através da quantidade de veículos diária. Para a distribuição do intervalo de tempo médio, poderia ser ajustada uma curva normal. Neste caso, é necessário o dimensionamento e detalhamento das peças para que se avalie a variação de tensão nas armaduras e no concreto.
- Aprimoramento das ferramentas computacionais, com vistas a automatizar ainda mais o processo.

- Utilização de outras distribuições, com o intuito de afinar a aproximação tanto das funções de entrada do problema, quanto das distribuições de máximos, na sua saída.
- Comparação de resultados entre dados de outras rodovias, com características diversas de tráfego.
- Consideração da possibilidade de aumento da carga média transportada pelos veículos, e de novos tipos de veículos, decorrentes do avanço tecnológico.
- Estudo estatístico completo dos esforços em pontes em grelha.
- Estudo de pontes e viadutos próximos a terminais intermodais de carga, com grande predominância de caminhões pesados.
- Estudo das patologias nas pontes associadas ao excesso de peso nos caminhões que nelas trafegam.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications**. Washington DC, 1998 and the Interim revisions dated 1999, 2000, 2001, 2002 and 2003.

American Association of State Highway and Transportation Officials. **Standard Specifications for Highway Bridges**. Washington DC, 2002. 17th Edition.

ALBANO, J. F.; LINDAU, L. A.; SENNA, L. A. Sistemas de pesagem para veículos rodoviários de carga: necessidade de implantação. **Revista Estradas**, Porto Alegre, n. 1, 2002.

ANG, A. H-S; TANG, W. H. **Probability concepts in engineering planning and design**. New York: John Wiley & Sons, 1975. v. 1. Basic principles.

_____. **Probability concepts in engineering planning and design**. New York: John Wiley & Sons, 1984. v.2. Decision, Risk and Reliability.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187**: projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7188**: carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestres. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NB6**: cargas móveis em pontes rodoviárias. Rio de Janeiro, 1960.

BAILEY, S.; BEZ, R. A parametric study of traffic load effects in medium span bridges. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SHORT AND MEDIUM SPAN BRIDGES, 4., 1994, Halifax, Canada. **Anais...** Halifax: CSCE, 1994.

BRASIL. Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. **Estatística dos veículos vendidos em 2005**. Disponível em: <www.fenabreve.org.br>. Acesso em: 05 abr. 2006.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de projeto de obras-de-arte especiais**. Rio de Janeiro, 1996. Disponível em: <www1.dnit.gov.br/ipr_new/download_manuais.htm>. Acesso em: 02 maio 2006.

CASTILLO, E. **Extreme value theory in engineering**. Boston: Academic Press, c1988. 389p. (Statistical modeling and decision science).

CAVALCANTI, P. S. P. **Pontes: trens tipo de projeto AP-02**. Sorocaba: Facens, 2004. Disponível em: <www.facens.br/alunos/material/PauloscC010TNC1/AP-02_TRENS_TIPO_ABNT_R0.pdf>. Acesso em: 19 set. 2005.

CHAMON, R. **Contribuição para análise de fadiga em vigas de pontes de concreto armado**. 1989. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1989.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Boletim estatístico da CNT**. Brasília, DF, 2005. Disponível em: <www.cnt.org.br/cnt/downloads/becnt/becnt_092005.pdf>. Acesso em: 25 out. 2005.

CRESPO-MINGUILLON, C.; CASAS, J. R. Comprehensive traffic load model for bridge safety checking. **Structural safety**, Amsterdam, v. 19, n. 4, p. 339-359, 1997.

EL DEBS, M.K.; MALITE, M.; TAKEYA, T.; MUNAIAR NETO, J.; HANAI, J. B. **Análise das conseqüências do tráfego de CVCs sobre as obras de arte especiais da rede viária do DER-SP**. São Carlos: Relatório Técnico EESC-USP, 2001. 50 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 1 : Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges**. PrEN 1991-2. Brussels: CEN, 2002.

FAUCHART, J. **Béton Précontraint**. Centre de Hautes Études de la Construction. Paris: CHEC, 1972. v. 2.

FERREIRA, L. M. **Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto**. 273 p. 2006. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FU, G.; HAG-ELSAFI, O. Vehicular overloads: load model, bridge safety, and permit checking. **Journal of Bridge Engineering**, New York, v.5, n.1, p. 49-57, 2000.

FUSCO, P. B. **Estruturas de Concreto**. São Paulo: EDUSP, 1977. v. 2. Fundamentos Estatísticos da Segurança das Estruturas.

GETACHEW, A. **Traffic load effects on bridges**: statistical analysis of collected and Monte Carlo simulated vehicle data. 2003. 138 p. Tese (Doutorado). – Structural Engineering, Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia, 2003.

GETACHEW, A.; KAROUMI, R. Generating site-specific vehicle data using Monte Carlo. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SAFETY, RISK AND RELIABILITY - Trends in Engineering, 2001. **Proceedings of IABSE**. Malta: IABSE, 2001. p. 167-172.

GOMES, M. J. T. L. **Volume horário de projeto para as rodovias estaduais do Ceará**: análise e contribuição. 2004. 160 p. Dissertação (Mestrado). – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

GUMBEL, E. J. **Statistics of extremes**. New York : Columbia University Press, 1958.

HWANG, E.; KOH, H. Simulation of bridge live load effects. In: CONGRESS OF IABSE, 16. 2000. **Anais...** Lucerna: IABSE, 2000.

JACOBSON, R. **Microsoft excel 97 visual basic**: passo a passo. São Paulo: Makron Books, 1998.

KARADENIZ, H.; VROUWENVELDER, T. **Saferelnet**: task 5.1: overview reliability methods. Version apr. 2003. TU-Delft, Netherlands, 2003. 81 p.

MIAO, T. J.; CHAN, T. H. T. Bridge live load models from WIM data. **Engineering Structures**, Guildford, v. 24, p. 1071-1084, 2002.

MOSES, F.; GHOSN, M. A comprehensive study of bridge loads and reliability. **Report No. FHWA/OH-85/005**. Ohio Department of civil engineering, Columbus, Ohio, 1985.

NOWAK, A. S.; LIND, N. C. Practical bridge code calibration. **Journal of the Structural Division**, New York, v. 105, n. ST12, p. 2497-2510, 1979.

NOWAK, A. S. Bridge live-load models. **Journal of Structural Engineering**. New York, v. 117, n. 9, p. 2757-2767, 1991.

_____. Calibration of LRFD bridge code. **Journal of Structural Engineering**, New York, v. 121, n. 8, p. 1245-1251, 1995.

_____. Calibration of LRFD bridge design code. **Transportation Research Board. NCHRP Report 368**, Washington, 1999.

_____. Live load model for highway bridges. **Structural Safety**, Amsterdam, v. 13, p. 53-66, 1993.

O'BRIEN, E. J.; CAPRANI, C. C. Headway modelling for traffic load assessment of short to medium span bridges. **Structural Engineer**, London, v.83, n.16, p. 33-36, 2005.

O'CONNOR, A.; JACOB, B.; O'BRIEN, E. J.; PRAT, M. Report of current studies performed on normal load model of EC1-traffic loads on bridges. **Revue Française du Génie Civil**, Hermes Science Publications, v. 5, n.4, p. 411-434, 2001.

_____; O'BRIEN, E. J. Traffic load modelling and factors influencing the accuracy of predicted extremes. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, CA, v.32, n.1, p. 270-277, 2005.

OESTLUND, L.; SUNDQUIST, H. Calibration of traffic design loads for long-span bridges. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SAFETY, RISK AND RELIABILITY - Trends in Engineering, 2001. **Proceedings of IABSE**. Malta: IABSE, 2001. p. 173-178.

PENNER, E. **Avaliação de desempenho de sistemas estruturais de pontes de concreto**. 2001. 256 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PRAT, M. Traffic load models for bridge design: recent developments and research. **Progress on Structural and Engineering Materials**, v. 3, n. 4, p. 326-334, 2002.

PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **Precast prestressed concrete bridge design manual**. 2nd ed. Chicago: PCI, 2003.

SANTOS, M. F. **Contribuição ao estudo do efeito de combinação de veículos de carga sobre pontes rodoviárias de concreto**. 2003. 152 p. Dissertação (Mestrado). – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

_____.; EL DEBS, M. K. Análise das conseqüências do tráfego de combinações de veículos de carga sobre pontes rodoviárias através da verificação da capacidade portante de um projeto típico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45., 2003, Vitória. **Anais...** Vitória: IBRACON, 2003.

SÃO PAULO (ESTADO). Departamento de Estradas de Rodagem. **DE 99/OAE-001**: projeto de obras-de-arte. Disponível em: <www.der.sp.gov.br/_informativos/normas_projetos_conteudo/normas_tecnicas.asp>. Acesso em: 02 maio 2006.

SCHNEIDER, J. **Introduction to Safety and Reliability of Structures**. Zürich: IABSE, 1997. Structural Engineering Documents, v. 5.

WIDMER, J. A. **Compatibilidade de tráfego de bitrens de 25m com a infraestrutura viária brasileira**. Disponível em: www.ntc.org.br/Download/Compatibilidade%20Bitrem.pdf. Acesso em: 14 set. 2005.

_____. Proposta de nomenclatura para caminhões, ônibus, CVCs - combinações de veículos de carga e CVPs - combinações de veículos de passageiros. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 18., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANPET, 2004. v. 1. p. 624-635.

ZELLERER, E. **Durchlaufträger - einflußlinien und momentenlinien**. Berlim, Munique: Verlag von Wilhelm Ernst e Sohn, 1967.

ANEXO A

GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES CONTÍNUAS AJUSTADAS

A.1 QUANTIDADES DE VEÍCULOS

Figura A.1 – Histograma de quantidades – veículo 2C

Figura A.2 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2C

Figura A.3 – Histograma de quantidades – veículo 3C

Figura A.4 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3C

Figura A.5 – Histograma de quantidades – veículo 2S1

Figura A.6 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2S1

Figura A.7 – Histograma de quantidades – veículo 4C

Figura A.8 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 4C

Figura A.9 – Histograma de quantidades – veículo 2S2

Figura A.10 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2S2

Figura A.11 – Histograma de quantidades – veículo 2I2

Figura A.12 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2I2

Figura A.13 – Histograma de quantidades – veículo 2S3

Figura A14 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2S3

Figura A.15 – Histograma de quantidades – veículo 2C3

Figura A.16 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 2C3

Figura A.17 – Histograma de quantidades – veículo 3S2

Figura A.18 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3S2

Figura A.19 – Histograma de quantidades – veículo 3I2

Figura A.20 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3I2

Figura A.21 – Histograma de quantidades – veículo 3S3

Figura A.22 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3S3

Figura A.23 – Histograma de quantidades – veículo 2I3

Figura A.24 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades.– veículo 2I3

Figura A.25 – Histograma de quantidades – veículo 3D4

Figura A.26 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3D4

Figura A.27 – Histograma de quantidades – veículo 3T6

Figura A.28 – Função de Distribuição Acumulada de quantidades – veículo 3T6

A.2 PESO BRUTO TOTAL

Figura A.29 – Histograma de peso bruto total – veículo 2C

Figura A.30 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2C

Figura A.31 – Histograma de peso bruto total – veículo 3C

Figura A.32 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 3C

Figura A.33 – Histograma de peso bruto total – veículo 2S1

Figura A.34 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2S1

Figura A.35 – Histograma de peso bruto total – veículo 4C

Figura A.36 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 4C

Figura A.37 – Histograma de peso bruto total – veículo 2S2

Figura A.38 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2S2

Figura A.39 – Histograma de peso bruto total – veículo 2I2

Figura A.40 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2I2

Figura A.41 – Histograma de peso bruto total – veículo 2S3

Figura A.42 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2S3

Figura A.43 - Histograma de peso bruto total – veículo 2C3

Figura A.44 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2C3

Figura A.45 – Histograma de peso bruto total – veículo 3S2

Figura A.46 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 3S2

Figura A.47 – Histograma de peso bruto total – veículo 3I2

Figura A.48 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 3I2

Figura A.49 – Histograma de peso bruto total – veículo 3S3

Figura A.50 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 3S3

Figura A.51 – Histograma de peso bruto total – veículo 2I3

Figura A.52 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 2I3

Figura A.53 – Histograma de peso bruto total – veículo 3D4

Figura A.54 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 3D4

Figura A.55 – Histograma de peso bruto total – veículo 3T6

Figura A.56 – Função de Distribuição Acumulada de peso bruto total – veículo 3T6

ANEXO B

LISTAGEM DAS MACROS

DESENVOLVIDAS

B.1 PLANILHA *Monta Dias*

Private Sub UserForm_Initialize()

QuantDias.Value = 1000

End Sub

Private Sub Gera_Click()

contaplan = 1

Do While contaplan <= 5

Select Case contaplan

Case Is = 1

Sheets("Ano1a5").Activate

Case Is = 2

Sheets("Ano6a10").Activate

Case Is = 3

Sheets("Ano11a15").Activate

Case Is = 4

Sheets("Ano16a20").Activate

Case Is = 5

Sheets("Ano21a25").Activate

End Select

Dim linha As Range

Cells(1, 1).Select

ActiveCell.Value = "dia"

ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "auto"

ActiveCell.Offset(0, 2).Value = "2C"

ActiveCell.Offset(0, 3).Value = "3C"

ActiveCell.Offset(0, 4).Value = "2S1"

ActiveCell.Offset(0, 5).Value = "4C"

ActiveCell.Offset(0, 6).Value = "2S2"

ActiveCell.Offset(0, 7).Value = "2I2"

ActiveCell.Offset(0, 8).Value = "3S1"

ActiveCell.Offset(0, 9).Value = "2C2"

ActiveCell.Offset(0, 10).Value = "2S3"

ActiveCell.Offset(0, 11).Value = "2C3"

ActiveCell.Offset(0, 12).Value = "3C2"

ActiveCell.Offset(0, 13).Value = "3S2"

ActiveCell.Offset(0, 14).Value = "3I2"

ActiveCell.Offset(0, 15).Value = "3S3"

```

ActiveCell.Offset(0, 16).Value = "3C3"
ActiveCell.Offset(0, 17).Value = "2I3"
ActiveCell.Offset(0, 18).Value = "3I3"
ActiveCell.Offset(0, 19).Value = "3D4"
ActiveCell.Offset(0, 20).Value = "3T6"
ActiveCell.Offset(0, 21).Value = "SOMA"
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
dia = 1
Randomize
Do Until ActiveCell.Row = QuantDias.Value + 2
    ActiveCell.Value = dia
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = CLng(Application.WorksheetFunction.NormInv(Rnd, 2175,
267)) 'auto
    ActiveCell.Offset(0, 2).Value = CLng(Application.WorksheetFunction.NormInv(Rnd, 318.2,
56.5)) '2C
    ActiveCell.Offset(0, 3).Value = CLng(Application.WorksheetFunction.NormInv(Rnd, 319.4,
62.9)) '3C
    ActiveCell.Offset(0, 4).Value = CLng(Application.WorksheetFunction.LogInv(Rnd, 2.89,
0.66)) '2S1
    ActiveCell.Offset(0, 5).Value = CLng(-Log(1 - Rnd) / 0.3966) '4C
    ActiveCell.Offset(0, 6).Value = CLng(Application.WorksheetFunction.LogInv(Rnd, 3.6,
0.34)) '2S2
    ActiveCell.Offset(0, 7).Value = CLng(-Log(1 - Rnd) / 0.1733) '2I2
    ActiveCell.Offset(0, 8).Value = 0 '3S1
    ActiveCell.Offset(0, 9).Value = 0 '2C2
    ActiveCell.Offset(0, 10).Value = CLng(Application.WorksheetFunction.NormInv(Rnd,
310.8, 75.2)) '2S3
    ActiveCell.Offset(0, 11).Value = CLng(-Log(1 - Rnd) / 0.1839) '2C3
    ActiveCell.Offset(0, 12).Value = 0 '3C2
    ActiveCell.Offset(0, 13).Value = CLng(-Log(1 - Rnd) / 0.2839) '3S2
    ActiveCell.Offset(0, 14).Value = CLng(-Log(1 - Rnd) / 0.2857) '3I2
    ActiveCell.Offset(0, 15).Value = CLng(Application.WorksheetFunction.NormInv(Rnd, 62,
18.5)) '3S3
    ActiveCell.Offset(0, 16).Value = 0 '3C3
    ActiveCell.Offset(0, 17).Value = CLng(-Log(1 - Rnd) / 0.0428) '2I3
    ActiveCell.Offset(0, 18).Value = 0 '3I3
    ActiveCell.Offset(0, 19).Value = CLng(Application.WorksheetFunction.NormInv(Rnd, 98.6,
31.7)) '3D4
    ActiveCell.Offset(0, 20).Value = CLng(-Log(1 - Rnd) / 0.25) '3T6
    Set linha = Range(Cells(dia + 1, 2), Cells(dia + 1, 21))
    ActiveCell.Offset(0, 21).Value = Application.WorksheetFunction.Sum(linha)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    dia = dia + 1
Loop
Cells(1, 1).Select
contaplan = contaplan + 1
Loop
Sheets("Ano1a5").Activate
End Sub

```

B.2 PLANILHA *Monta Cenários*

Private Sub UserForm_Initialize()

```
NomeArquivo.Text = "1_Monta dias.xls"  
QuantVeic.Value = 26  
QuantTabuleiros.Value = 20  
QuantDias.Value = 1000  
pass1.Value = 100  
comerc1.Value = 100  
pass2.Value = 100  
comerc2.Value = 100  
pass3.Value = 0  
comerc3.Value = 0  
pass4.Value = 0  
comerc4.Value = 0  
numfaixas.Value = 2
```

End Sub**Private Sub Gera_Click()**

```
auto1 = pass1.Value / 100 'porcentagem de autos na primeira faixa  
com1 = comerc1.Value / 100 'porcentagem de caminhões na primeira faixa  
auto2 = pass2.Value / 100 'porcentagem de autos na segunda faixa  
com2 = comerc2.Value / 100 'porcentagem de caminhões na segunda faixa  
auto3 = pass3.Value / 100 'porcentagem de autos na terceira faixa  
com3 = comerc3.Value / 100 'porcentagem de caminhões na terceira faixa  
auto4 = pass4.Value / 100 'porcentagem de autos na quarta faixa  
com4 = comerc4.Value / 100 'porcentagem de caminhões na quarta faixa  
contaplan = 1
```

Do While contaplan <= 5**Select Case** contaplan**Case Is** = 1

```
Sheets("Ano1a5").Activate
```

Case Is = 2

```
Sheets("Ano6a10").Activate
```

Case Is = 3

```
Sheets("Ano11a15").Activate
```

Case Is = 4

```
Sheets("Ano16a20").Activate
```

Case Is = 5

```
Sheets("Ano21a25").Activate
```

End Select

```
contadias = 1
```

```
nfaixa = numfaixas.Value + 0
```

```
Cells(1, 1).Select
```

```
PlanPesquisa = ActiveCell.Worksheet.Name
```

Select Case nfaixa**Case Is** = 2 '2 faixas

```
Do Until contadias = QuantDias.Value + 1
```

```
contatab = 1
```

```
Do Until contatab = QuantTabuleiros.Value + 1
```

```
If (contatab / 2) <> Application.WorksheetFunction.Round(contatab / 2, 0) Then
```

```
Cells(contadias * QuantTabuleiros.Value - QuantTabuleiros.Value + contatab, 1).Select
```

```
ActiveCell.Value = "dia " & contadias
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Select
ActiveCell.Value = "cenário " & contatab
'ActiveCell.Offset(0, 1).Select '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo (2 linhas)
tipo1 =
Application.WorksheetFunction.Round(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesqui
sa).Cells(contadias + 1, 2).Value * auto1, 0)
tipo2 = tipo1 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 3).Value *
com1)
tipo3 = tipo2 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 4).Value *
com1)
tipo4 = tipo3 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 5).Value *
com1)
tipo5 = tipo4 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 6).Value *
com1)
tipo6 = tipo5 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 7).Value *
com1)
tipo7 = tipo6 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 8).Value *
com1)
tipo8 = tipo7 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 9).Value *
com1)
tipo9 = tipo8 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 10).Value
* com1)
tipo10 = tipo9 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 11).Value
* com1)
tipo11 = tipo10 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 12).Value
* com1)
tipo12 = tipo11 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 13).Value
* com1)
tipo13 = tipo12 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 14).Value
* com1)
tipo14 = tipo13 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 15).Value
* com1)
tipo15 = tipo14 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 16).Value
* com1)
tipo16 = tipo15 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 17).Value
* com1)
```

```
tipo17 = tipo16 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 18).Value  
* com1)  
tipo18 = tipo17 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 19).Value  
* com1)  
tipo19 = tipo18 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 20).Value  
* com1)  
tipo20 = tipo19 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 21).Value  
* com1)  
total1faixa = tipo20 'tipo1 + tipo2 + tipo3 + tipo4 + tipo5 + tipo6 + tipo7 + tipo8 +  
tipo9 + tipo10 + tipo11 + tipo12 + tipo13 + tipo14 + tipo15 + tipo16 + tipo17 + tipo18 +  
tipo19 + tipo20  
contador = 1  
Randomize  
Do Until contador = QuantVeic.Value + 1  
numero = CLng(Rnd * (total1faixa - 1) + 1)  
'ActiveCell.Value = numero ' - ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo  
Select Case numero  
Case Is <= tipo1  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "auto"  
Case Is <= tipo2  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C"  
Case Is <= tipo3  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C"  
Case Is <= tipo4  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S1"  
Case Is <= tipo5  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "4C"  
Case Is <= tipo6  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S2"  
Case Is <= tipo7  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I2"  
Case Is <= tipo8  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S1"  
Case Is <= tipo9  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C2"  
Case Is <= tipo10  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S3"  
Case Is <= tipo11  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C3"  
Case Is <= tipo12  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C2"  
Case Is <= tipo13  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S2"  
Case Is <= tipo14  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I2"  
Case Is <= tipo15  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S3"
```

```
Case Is <= tipo16
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C3"
Case Is <= tipo17
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I3"
Case Is <= tipo18
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I3"
Case Is <= tipo19
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3D4"
Case Is <= tipo20
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3T6"
End Select
contador = contador + 1
ActiveCell.Offset(0, 1).Select 'se quiser incluir no. aleatório, tem que mudar para (0,2)
Loop
Else
    Cells(contadias * QuantTabuleiros.Value - QuantTabuleiros.Value + contatab, 1).Select
    ActiveCell.Value = "dia " & contadias
    ActiveCell.Offset(0, 1).Select
    ActiveCell.Value = "cenário " & contatab
    'ActiveCell.Offset(0, 1).Select '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo (2 linhas)
    tipo1 =
Application.WorksheetFunction.Round(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesqui
sa).Cells(contadias + 1, 2).Value * auto2, 0)
    tipo2 = tipo1 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 3).Value *
com2)
    tipo3 = tipo2 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 4).Value *
com2)
    tipo4 = tipo3 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 5).Value *
com2)
    tipo5 = tipo4 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 6).Value *
com2)
    tipo6 = tipo5 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 7).Value *
com2)
    tipo7 = tipo6 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 8).Value *
com2)
    tipo8 = tipo7 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 9).Value *
com2)
    tipo9 = tipo8 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 10).Value
* com2)
    tipo10 = tipo9 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 11).Value
* com2)
```

```
tipo11 = tipo10 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 12).Value
* com2)
tipo12 = tipo11 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 13).Value
* com2)
tipo13 = tipo12 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 14).Value
* com2)
tipo14 = tipo13 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 15).Value
* com2)
tipo15 = tipo14 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 16).Value
* com2)
tipo16 = tipo15 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 17).Value
* com2)
tipo17 = tipo16 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 18).Value
* com2)
tipo18 = tipo17 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 19).Value
* com2)
tipo19 = tipo18 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 20).Value
* com2)
tipo20 = tipo19 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 21).Value
* com2)
total2faixa = tipo20 'tipo1 + tipo2 + tipo3 + tipo4 + tipo5 + tipo6 + tipo7 + tipo8 +
tipo9 + tipo10 + tipo11 + tipo12 + tipo13 + tipo14 + tipo15 + tipo16 + tipo17 + tipo18 +
tipo19 + tipo20
contador = 1
Randomize
Do Until contador = QuantVeic.Value + 1
    numero = CLng(Rnd * (total2faixa - 1) + 1)
    'ActiveCell.Value = numero '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo
Select Case numero
    Case Is <= tipo1
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "auto"
    Case Is <= tipo2
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C"
    Case Is <= tipo3
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C"
    Case Is <= tipo4
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S1"
    Case Is <= tipo5
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "4C"
    Case Is <= tipo6
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S2"
```

```
Case Is <= tipo7
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I2"
Case Is <= tipo8
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S1"
Case Is <= tipo9
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C2"
Case Is <= tipo10
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S3"
Case Is <= tipo11
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C3"
Case Is <= tipo12
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C2"
Case Is <= tipo13
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S2"
Case Is <= tipo14
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I2"
Case Is <= tipo15
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S3"
Case Is <= tipo16
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C3"
Case Is <= tipo17
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I3"
Case Is <= tipo18
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I3"
Case Is <= tipo19
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3D4"
Case Is <= tipo20
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3T6"
End Select
contador = contador + 1
ActiveCell.Offset(0, 1).Select 'se quiser incluir no. aleatório, tem que mudar para (0,2)
Loop
End If
contatab = contatab + 1
Loop
contadias = contadias + 1
Loop

Case Is = 3 '3 faixas
Do Until contadias = QuantDias.Value + 1
    contatab = 1
    Do Until contatab = QuantTabuleiros.Value + 1
        Cells(contadias * QuantTabuleiros.Value - QuantTabuleiros.Value + contatab, 1).Select
        ActiveCell.Value = "dia " & contadias
        ActiveCell.Offset(0, 1).Select
```



```
ActiveCell.Value = "cenário " & contatab
'ActiveCell.Offset(0, 1).Select '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo (2 linhas)
tipo1 =
Application.WorksheetFunction.Round(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesqui
sa).Cells(contadias + 1, 2).Value * auto1, 0)
tipo2 = tipo1 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 3).Value *
com1)
tipo3 = tipo2 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 4).Value *
com1)
tipo4 = tipo3 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 5).Value *
com1)
tipo5 = tipo4 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 6).Value *
com1)
tipo6 = tipo5 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 7).Value *
com1)
tipo7 = tipo6 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 8).Value *
com1)
tipo8 = tipo7 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 9).Value *
com1)
tipo9 = tipo8 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 10).Value
* com1)
tipo10 = tipo9 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 11).Value
* com1)
tipo11 = tipo10 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 12).Value
* com1)
tipo12 = tipo11 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 13).Value
* com1)
tipo13 = tipo12 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 14).Value
* com1)
tipo14 = tipo13 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 15).Value
* com1)
tipo15 = tipo14 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 16).Value
* com1)
tipo16 = tipo15 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 17).Value
* com1)
```

```
    tipo17 = tipo16 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 18).Value  
    * com1)  
    tipo18 = tipo17 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 19).Value  
    * com1)  
    tipo19 = tipo18 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 20).Value  
    * com1)  
    tipo20 = tipo19 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 21).Value  
    * com1)  
    total1faixa = tipo20 'tipo1 + tipo2 + tipo3 + tipo4 + tipo5 + tipo6 + tipo7 + tipo8 +  
    tipo9 + tipo10 + tipo11 + tipo12 + tipo13 + tipo14 + tipo15 + tipo16 + tipo17 + tipo18 +  
    tipo19 + tipo20  
    contador = 1  
    Randomize  
    Do Until contador = QuantVeic.Value + 1  
        numero = CLng(Rnd * (total1faixa - 1) + 1)  
        'ActiveCell.Value = numero ' - ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo  
        Select Case numero  
            Case Is <= tipo1  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "auto"  
            Case Is <= tipo2  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C"  
            Case Is <= tipo3  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C"  
            Case Is <= tipo4  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S1"  
            Case Is <= tipo5  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "4C"  
            Case Is <= tipo6  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S2"  
            Case Is <= tipo7  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I2"  
            Case Is <= tipo8  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S1"  
            Case Is <= tipo9  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C2"  
            Case Is <= tipo10  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S3"  
            Case Is <= tipo11  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C3"  
            Case Is <= tipo12  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C2"  
            Case Is <= tipo13  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S2"  
            Case Is <= tipo14  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I2"  
            Case Is <= tipo15  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S3"
```

```
Case Is <= tipo16
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C3"
Case Is <= tipo17
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I3"
Case Is <= tipo18
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I3"
Case Is <= tipo19
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3D4"
Case Is <= tipo20
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3T6"
End Select
contador = contador + 1
ActiveCell.Offset(0, 1).Select 'se quiser incluir no. aleatório, tem que mudar para (0,2)
Loop
contatab = contatab + 1
'faixa2
Cells(contadias * QuantTabuleiros.Value - QuantTabuleiros.Value + contatab, 1).Select
ActiveCell.Value = "dia " & contadias
ActiveCell.Offset(0, 1).Select
ActiveCell.Value = "cenário " & contatab
'ActiveCell.Offset(0, 1).Select ' - ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo (2 linhas)
tipo1 =
Application.WorksheetFunction.Round(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesqui
sa).Cells(contadias + 1, 2).Value * auto2, 0)
tipo2 = tipo1 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 3).Value *
com2)
tipo3 = tipo2 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 4).Value *
com2)
tipo4 = tipo3 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 5).Value *
com2)
tipo5 = tipo4 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 6).Value *
com2)
tipo6 = tipo5 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 7).Value *
com2)
tipo7 = tipo6 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 8).Value *
com2)
tipo8 = tipo7 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 9).Value *
com2)
tipo9 = tipo8 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 10).Value
* com2)
tipo10 = tipo9 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 11).Value
* com2)
```

```
    tipo11 = tipo10 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 12).Value  
    * com2)  
    tipo12 = tipo11 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 13).Value  
    * com2)  
    tipo13 = tipo12 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 14).Value  
    * com2)  
    tipo14 = tipo13 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 15).Value  
    * com2)  
    tipo15 = tipo14 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 16).Value  
    * com2)  
    tipo16 = tipo15 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 17).Value  
    * com2)  
    tipo17 = tipo16 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 18).Value  
    * com2)  
    tipo18 = tipo17 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 19).Value  
    * com2)  
    tipo19 = tipo18 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 20).Value  
    * com2)  
    tipo20 = tipo19 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 21).Value  
    * com2)  
    total2faixa = tipo20 'tipo1 + tipo2 + tipo3 + tipo4 + tipo5 + tipo6 + tipo7 + tipo8 +  
    tipo9 + tipo10 + tipo11 + tipo12 + tipo13 + tipo14 + tipo15 + tipo16 + tipo17 + tipo18 +  
    tipo19 + tipo20  
    contador = 1  
    Randomize  
    Do Until contador = QuantVeic.Value + 1  
        numero = CLng(Rnd * (total2faixa - 1) + 1)  
        'ActiveCell.Value = numero '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo  
        Select Case numero  
            Case Is <= tipo1  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "auto"  
            Case Is <= tipo2  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C"  
            Case Is <= tipo3  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C"  
            Case Is <= tipo4  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S1"  
            Case Is <= tipo5  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "4C"  
            Case Is <= tipo6  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S2"
```

```
Case Is <= tipo7
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I2"
Case Is <= tipo8
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S1"
Case Is <= tipo9
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C2"
Case Is <= tipo10
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S3"
Case Is <= tipo11
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C3"
Case Is <= tipo12
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C2"
Case Is <= tipo13
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S2"
Case Is <= tipo14
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I2"
Case Is <= tipo15
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S3"
Case Is <= tipo16
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C3"
Case Is <= tipo17
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I3"
Case Is <= tipo18
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I3"
Case Is <= tipo19
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3D4"
Case Is <= tipo20
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3T6"
End Select
contador = contador + 1
ActiveCell.Offset(0, 1).Select 'se quiser incluir no. aleatório, tem que mudar para (0,2)
Loop
contatab = contatab + 1
'faixa3
Cells(contadias * QuantTabuleiros.Value - QuantTabuleiros.Value + contatab, 1).Select
ActiveCell.Value = "dia " & contadias
ActiveCell.Offset(0, 1).Select
ActiveCell.Value = "cenário " & contatab
'ActiveCell.Offset(0, 1).Select '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo (2 linhas)
tipo1 =
Application.WorksheetFunction.Round(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesqui
sa).Cells(contadias + 1, 2).Value * auto3, 0)
tipo2 = tipo1 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 3).Value *
com3)
tipo3 = tipo2 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 4).Value *
com3)
tipo4 = tipo3 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 5).Value *
com3)
```

```
tipo5 = tipo4 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 6).Value *
com3)
tipo6 = tipo5 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 7).Value *
com3)
tipo7 = tipo6 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 8).Value *
com3)
tipo8 = tipo7 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 9).Value *
com3)
tipo9 = tipo8 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 10).Value
* com3)
tipo10 = tipo9 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 11).Value
* com3)
tipo11 = tipo10 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 12).Value
* com3)
tipo12 = tipo11 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 13).Value
* com3)
tipo13 = tipo12 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 14).Value
* com3)
tipo14 = tipo13 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 15).Value
* com3)
tipo15 = tipo14 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 16).Value
* com3)
tipo16 = tipo15 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 17).Value
* com3)
tipo17 = tipo16 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 18).Value
* com3)
tipo18 = tipo17 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 19).Value
* com3)
tipo19 = tipo18 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 20).Value
* com3)
tipo20 = tipo19 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 21).Value
* com3)
total3faixa = tipo20 'tipo1 + tipo2 + tipo3 + tipo4 + tipo5 + tipo6 + tipo7 + tipo8 +
tipo9 + tipo10 + tipo11 + tipo12 + tipo13 + tipo14 + tipo15 + tipo16 + tipo17 + tipo18 +
tipo19 + tipo20
```

```
contador = 1
Randomize
Do Until contador = QuantVeic.Value + 1
    numero = CLng(Rnd * (total2faixa - 1) + 1)
    'ActiveCell.Value = numero '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo
    Select Case numero
        Case Is <= tipo1
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "auto"
        Case Is <= tipo2
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C"
        Case Is <= tipo3
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C"
        Case Is <= tipo4
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S1"
        Case Is <= tipo5
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "4C"
        Case Is <= tipo6
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S2"
        Case Is <= tipo7
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I2"
        Case Is <= tipo8
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S1"
        Case Is <= tipo9
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C2"
        Case Is <= tipo10
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S3"
        Case Is <= tipo11
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C3"
        Case Is <= tipo12
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C2"
        Case Is <= tipo13
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S2"
        Case Is <= tipo14
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I2"
        Case Is <= tipo15
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S3"
        Case Is <= tipo16
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C3"
        Case Is <= tipo17
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I3"
        Case Is <= tipo18
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I3"
        Case Is <= tipo19
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3D4"
        Case Is <= tipo20
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3T6"
    End Select
    contador = contador + 1
    ActiveCell.Offset(0, 1).Select 'se quiser incluir no. aleatório, tem que mudar para (0,2)
Loop
```

```
    contatab = contatab + 1
Loop
    contadias = contadias + 1
Loop

Case Is = 4 '4 faixas
Do Until contadias = QuantDias.Value + 1
    contatab = 1
    Do Until contatab = QuantTabuleiros.Value + 1
        Cells(contadias * QuantTabuleiros.Value - QuantTabuleiros.Value + contatab, 1).Select
        ActiveCell.Value = "dia " & contadias
        ActiveCell.Offset(0, 1).Select
        ActiveCell.Value = "cenário " & contatab
        'ActiveCell.Offset(0, 1).Select '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo (2 linhas)
        tipo1 =
Application.WorksheetFunction.Round(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesqui
sa).Cells(contadias + 1, 2).Value * auto1, 0)
        tipo2 = tipo1 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 3).Value *
com1)
        tipo3 = tipo2 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 4).Value *
com1)
        tipo4 = tipo3 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 5).Value *
com1)
        tipo5 = tipo4 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 6).Value *
com1)
        tipo6 = tipo5 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 7).Value *
com1)
        tipo7 = tipo6 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 8).Value *
com1)
        tipo8 = tipo7 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 9).Value *
com1)
        tipo9 = tipo8 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 10).Value
* com1)
        tipo10 = tipo9 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 11).Value
* com1)
        tipo11 = tipo10 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 12).Value
* com1)
        tipo12 = tipo11 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 13).Value
* com1)
```



```
    tipo13 = tipo12 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 14).Value
* com1)
    tipo14 = tipo13 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 15).Value
* com1)
    tipo15 = tipo14 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 16).Value
* com1)
    tipo16 = tipo15 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 17).Value
* com1)
    tipo17 = tipo16 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 18).Value
* com1)
    tipo18 = tipo17 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 19).Value
* com1)
    tipo19 = tipo18 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 20).Value
* com1)
    tipo20 = tipo19 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 21).Value
* com1)
    total1faixa = tipo20 'tipo1 + tipo2 + tipo3 + tipo4 + tipo5 + tipo6 + tipo7 + tipo8 +
tipo9 + tipo10 + tipo11 + tipo12 + tipo13 + tipo14 + tipo15 + tipo16 + tipo17 + tipo18 +
tipo19 + tipo20
    contador = 1
Randomize
Do Until contador = QuantVeic.Value + 1
    numero = CLng(Rnd * (total1faixa - 1) + 1)
    'ActiveCell.Value = numero '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo
Select Case numero
    Case Is <= tipo1
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "auto"
    Case Is <= tipo2
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C"
    Case Is <= tipo3
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C"
    Case Is <= tipo4
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S1"
    Case Is <= tipo5
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "4C"
    Case Is <= tipo6
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S2"
    Case Is <= tipo7
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I2"
    Case Is <= tipo8
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S1"
    Case Is <= tipo9
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C2"
```

```
Case Is <= tipo10
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S3"
Case Is <= tipo11
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C3"
Case Is <= tipo12
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C2"
Case Is <= tipo13
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S2"
Case Is <= tipo14
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I2"
Case Is <= tipo15
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S3"
Case Is <= tipo16
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C3"
Case Is <= tipo17
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I3"
Case Is <= tipo18
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I3"
Case Is <= tipo19
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3D4"
Case Is <= tipo20
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3T6"
End Select
contador = contador + 1
ActiveCell.Offset(0, 1).Select 'se quiser incluir no. aleatório, tem que mudar para (0,2)
Loop
contatab = contatab + 1
'faixa 2
Cells(contadias * QuantTabuleiros.Value - QuantTabuleiros.Value + contatab, 1).Select
ActiveCell.Value = "dia " & contadias
ActiveCell.Offset(0, 1).Select
ActiveCell.Value = "cenário " & contatab
'ActiveCell.Offset(0, 1).Select '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo (2 linhas)
tipo1 =
Application.WorksheetFunction.Round(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesqui
sa).Cells(contadias + 1, 2).Value * auto2, 0)
tipo2 = tipo1 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 3).Value *
com2)
tipo3 = tipo2 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 4).Value *
com2)
tipo4 = tipo3 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 5).Value *
com2)
tipo5 = tipo4 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 6).Value *
com2)
tipo6 = tipo5 +
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 7).Value *
com2)
```

```
    tipo7 = tipo6 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 8).Value *  
    com2)  
    tipo8 = tipo7 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 9).Value *  
    com2)  
    tipo9 = tipo8 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 10).Value  
    * com2)  
    tipo10 = tipo9 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 11).Value  
    * com2)  
    tipo11 = tipo10 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 12).Value  
    * com2)  
    tipo12 = tipo11 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 13).Value  
    * com2)  
    tipo13 = tipo12 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 14).Value  
    * com2)  
    tipo14 = tipo13 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 15).Value  
    * com2)  
    tipo15 = tipo14 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 16).Value  
    * com2)  
    tipo16 = tipo15 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 17).Value  
    * com2)  
    tipo17 = tipo16 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 18).Value  
    * com2)  
    tipo18 = tipo17 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 19).Value  
    * com2)  
    tipo19 = tipo18 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 20).Value  
    * com2)  
    tipo20 = tipo19 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 21).Value  
    * com2)  
    total2faixa = tipo20 'tipo1 + tipo2 + tipo3 + tipo4 + tipo5 + tipo6 + tipo7 + tipo8 +  
    tipo9 + tipo10 + tipo11 + tipo12 + tipo13 + tipo14 + tipo15 + tipo16 + tipo17 + tipo18 +  
    tipo19 + tipo20  
    contador = 1  
    Randomize  
    Do Until contador = QuantVeic.Value + 1  
        numero = CLng(Rnd * (total2faixa - 1) + 1)  
        'ActiveCell.Value = numero '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo  
    Select Case numero
```

```
Case Is <= tipo1
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "auto"
Case Is <= tipo2
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C"
Case Is <= tipo3
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C"
Case Is <= tipo4
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S1"
Case Is <= tipo5
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "4C"
Case Is <= tipo6
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S2"
Case Is <= tipo7
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I2"
Case Is <= tipo8
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S1"
Case Is <= tipo9
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C2"
Case Is <= tipo10
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S3"
Case Is <= tipo11
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C3"
Case Is <= tipo12
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C2"
Case Is <= tipo13
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S2"
Case Is <= tipo14
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I2"
Case Is <= tipo15
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S3"
Case Is <= tipo16
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C3"
Case Is <= tipo17
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I3"
Case Is <= tipo18
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I3"
Case Is <= tipo19
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3D4"
Case Is <= tipo20
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3T6"
End Select
contador = contador + 1
ActiveCell.Offset(0, 1).Select 'se quiser incluir no. aleatório, tem que mudar para (0,2)
Loop
contatab = contatab + 1
'faixa 3
Cells(contadias * QuantTabuleiros.Value - QuantTabuleiros.Value + contatab, 1).Select
ActiveCell.Value = "dia " & contadias
ActiveCell.Offset(0, 1).Select
ActiveCell.Value = "cenário " & contatab
'ActiveCell.Offset(0, 1).Select '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo (2 linhas)
```

```
tipo1 =  
Application.WorksheetFunction.Round(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesqui  
sa).Cells(contadias + 1, 2).Value * auto3, 0)  
tipo2 = tipo1 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 3).Value *  
com3)  
tipo3 = tipo2 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 4).Value *  
com3)  
tipo4 = tipo3 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 5).Value *  
com3)  
tipo5 = tipo4 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 6).Value *  
com3)  
tipo6 = tipo5 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 7).Value *  
com3)  
tipo7 = tipo6 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 8).Value *  
com3)  
tipo8 = tipo7 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 9).Value *  
com3)  
tipo9 = tipo8 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 10).Value  
* com3)  
tipo10 = tipo9 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 11).Value  
* com3)  
tipo11 = tipo10 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 12).Value  
* com3)  
tipo12 = tipo11 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 13).Value  
* com3)  
tipo13 = tipo12 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 14).Value  
* com3)  
tipo14 = tipo13 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 15).Value  
* com3)  
tipo15 = tipo14 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 16).Value  
* com3)  
tipo16 = tipo15 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 17).Value  
* com3)  
tipo17 = tipo16 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 18).Value  
* com3)
```

```
    tipo18 = tipo17 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 19).Value  
    * com3)  
    tipo19 = tipo18 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 20).Value  
    * com3)  
    tipo20 = tipo19 +  
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 21).Value  
    * com3)  
    total3faixa = tipo20 'tipo1 + tipo2 + tipo3 + tipo4 + tipo5 + tipo6 + tipo7 + tipo8 +  
    tipo9 + tipo10 + tipo11 + tipo12 + tipo13 + tipo14 + tipo15 + tipo16 + tipo17 + tipo18 +  
    tipo19 + tipo20  
    contador = 1  
    Randomize  
    Do Until contador = QuantVeic.Value + 1  
        numero = CLng(Rnd * (total2faixa - 1) + 1)  
        'ActiveCell.Value = numero '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo  
        Select Case numero  
            Case Is <= tipo1  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "auto"  
            Case Is <= tipo2  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C"  
            Case Is <= tipo3  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C"  
            Case Is <= tipo4  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S1"  
            Case Is <= tipo5  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "4C"  
            Case Is <= tipo6  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S2"  
            Case Is <= tipo7  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I2"  
            Case Is <= tipo8  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S1"  
            Case Is <= tipo9  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C2"  
            Case Is <= tipo10  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S3"  
            Case Is <= tipo11  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C3"  
            Case Is <= tipo12  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C2"  
            Case Is <= tipo13  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S2"  
            Case Is <= tipo14  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I2"  
            Case Is <= tipo15  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S3"  
            Case Is <= tipo16  
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C3"  
            Case Is <= tipo17
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I3"  
Case Is <= tipo18  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I3"  
Case Is <= tipo19  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3D4"  
Case Is <= tipo20  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3T6"  
End Select  
contador = contador + 1  
ActiveCell.Offset(0, 1).Select 'se quiser incluir no. aleatório, tem que mudar para (0,2)  
Loop  
contatab = contatab + 1  
'faixa 4  
Cells(contadias * QuantTabuleiros.Value - QuantTabuleiros.Value + contatab, 1).Select  
ActiveCell.Value = "dia " & contadias  
ActiveCell.Offset(0, 1).Select  
ActiveCell.Value = "cenário " & contatab  
'ActiveCell.Offset(0, 1).Select '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo (2 linhas)  
tipo1 =  
Application.WorksheetFunction.Round(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesqui  
sa).Cells(contadias + 1, 2).Value * auto4, 0)  
tipo2 = tipo1 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 3).Value *  
com4)  
tipo3 = tipo2 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 4).Value *  
com4)  
tipo4 = tipo3 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 5).Value *  
com4)  
tipo5 = tipo4 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 6).Value *  
com4)  
tipo6 = tipo5 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 7).Value *  
com4)  
tipo7 = tipo6 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 8).Value *  
com4)  
tipo8 = tipo7 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 9).Value *  
com4)  
tipo9 = tipo8 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 10).Value  
* com4)  
tipo10 = tipo9 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 11).Value  
* com4)  
tipo11 = tipo10 +  
CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 12).Value  
* com4)
```

```
    tipo12 = tipo11 +
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 13).Value
    * com4)
    tipo13 = tipo12 +
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 14).Value
    * com4)
    tipo14 = tipo13 +
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 15).Value
    * com4)
    tipo15 = tipo14 +
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 16).Value
    * com4)
    tipo16 = tipo15 +
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 17).Value
    * com4)
    tipo17 = tipo16 +
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 18).Value
    * com4)
    tipo18 = tipo17 +
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 19).Value
    * com4)
    tipo19 = tipo18 +
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 20).Value
    * com4)
    tipo20 = tipo19 +
    CLng(Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(contadias + 1, 21).Value
    * com4)
    total3faixa = tipo20 'tipo1 + tipo2 + tipo3 + tipo4 + tipo5 + tipo6 + tipo7 + tipo8 +
    tipo9 + tipo10 + tipo11 + tipo12 + tipo13 + tipo14 + tipo15 + tipo16 + tipo17 + tipo18 +
    tipo19 + tipo20
    contador = 1
Randomize
Do Until contador = QuantVeic.Value + 1
    numero = CLng(Rnd * (total2faixa - 1) + 1)
    'ActiveCell.Value = numero '- ativar se quiser no. aleatório - ver abaixo
Select Case numero
    Case Is <= tipo1
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "auto"
    Case Is <= tipo2
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C"
    Case Is <= tipo3
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C"
    Case Is <= tipo4
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S1"
    Case Is <= tipo5
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "4C"
    Case Is <= tipo6
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S2"
    Case Is <= tipo7
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I2"
    Case Is <= tipo8
```



```
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S1"
Case Is <= tipo9
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C2"
Case Is <= tipo10
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2S3"
Case Is <= tipo11
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2C3"
Case Is <= tipo12
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C2"
Case Is <= tipo13
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S2"
Case Is <= tipo14
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I2"
Case Is <= tipo15
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3S3"
Case Is <= tipo16
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3C3"
Case Is <= tipo17
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "2I3"
Case Is <= tipo18
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3I3"
Case Is <= tipo19
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3D4"
Case Is <= tipo20
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "3T6"
End Select
contador = contador + 1
ActiveCell.Offset(0, 1).Select 'se quiser incluir no. aleatório, tem que mudar para (0,2)
Loop
contatab = contatab + 1
Loop
contadias = contadias + 1
Loop
End Select
Cells(1, 1).Select
contaplan = contaplan + 1
Loop
Sheets("Ano1a5").Activate
End Sub
```

B.3 PLANILHA *Monta Trem de Carga*

```
Private Sub UserForm_Initialize()
NomeArquivo.Text = "2_Monta cenários.xls"
QuantTabuleiros.Value = 20000
Vao.Value = 200
Espacamento.Value = 5
```

End Sub

Private Sub Gera_Click()

contaplan = 1

Do While contaplan <= 5

Select Case contaplan

Case Is = 1

Sheets("Ano1a5").Activate

Case Is = 2

Sheets("Ano6a10").Activate

Case Is = 3

Sheets("Ano11a15").Activate

Case Is = 4

Sheets("Ano16a20").Activate

Case Is = 5

Sheets("Ano21a25").Activate

End Select

espac = Espacamento.Value + 0

linha = 1

Cells(1, 1).Select

PlanPesquisa = ActiveCell.Worksheet.Name

Randomize

Do Until linha = QuantTabuleiros.Value + 1

ActiveCell.Value = "tabuleiro " & linha

ActiveCell.Offset(0, 1).Select

contador = 0

coluna = 3

Do Until contador = Vao.Value

tipo = Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(linha, coluna).Value

Select Case tipo

Case Is = "auto" 'AUTOMÓVEL

contador = contador + 1

If contador >= Vao.Value + 0 **Then**

Exit Do

End If

ActiveCell.Value = contador

pesototauto = 12.95

ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.5 * pesototauto

ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "autoE1"

contador = contador + 2.5

If contador >= Vao.Value + 0 **Then**

Exit Do

End If

ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador

ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.5 * pesototauto

ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "autoE2"

ActiveCell.Offset(0, 2).Select

contador = contador + 0.5 + espac

Case Is = "2C"

contador = contador + 0.5 'd1

```
If contador >= Vao.Value + 0 Then
  Exit Do
End If
ActiveCell.Value = contador
pesotot2C = Application.WorksheetFunction.LogInv(Rnd, 4.223, 0.423)
ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.42 * pesotot2C
ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "2CE1"
contador = contador + 4.5 'd2
If contador >= Vao.Value + 0 Then
  Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.58 * pesotot2C
ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "2CE2"
ActiveCell.Offset(0, 2).Select
contador = contador + 2 + espac 'd3
Case Is = "3C" 'BIMODAL
  contador = contador + 1 'd1
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
  End If
  ActiveCell.Value = contador
  u1 = Rnd
  u2 = Rnd
  If u1 < 0.4 Then
    pesotot3C = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 220.36, 14.41)
  Else
    pesotot3C = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 137.27, 37.99)
  End If
  ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.27 * pesotot3C
  ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "3CE1"
  contador = contador + 6 'd2
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
  End If
  ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
  ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.73 * pesotot3C
  ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "3CE2"
  ActiveCell.Offset(0, 2).Select
  contador = contador + 3.5 + espac 'd3
Case Is = "2S1"
  contador = contador + 1 'd1
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
  End If
  ActiveCell.Value = contador
  pesotot2S1 = Application.WorksheetFunction.NormInv(Rnd, 158.52, 34.84)
  ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.27 * pesotot2S1
  ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "2S1E1"
  contador = contador + 4.5 'd2
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
```

```
Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.33 * pesotot2S1
ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "2S1E2"
contador = contador + 7.5 'd3
If contador >= Vao.Value + 0 Then
Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.4 * pesotot2S1
ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "2S1E3"
ActiveCell.Offset(0, 3).Select
contador = contador + 4.5 + spac 'd4+spac
Case Is = "4C"
contador = contador + 1 'd1
If contador >= Vao.Value + 0 Then
Exit Do
End If
ActiveCell.Value = contador
u1 = Rnd
u2 = Rnd
If u1 < 0.92 Then
pesotot4C = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 311.36, 52.31)
Else
pesotot4C = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 120, 19.99)
End If
ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.34 * pesotot4C
ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "4CE1"
contador = contador + 5 'd2
If contador >= Vao.Value + 0 Then
Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.66 * pesotot4C
ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "4CE2"
ActiveCell.Offset(0, 2).Select
contador = contador + 2.5 + spac 'd3+spac
Case Is = "2S2"
contador = contador + 1.5 'd1
If contador >= Vao.Value + 0 Then
Exit Do
End If
ActiveCell.Value = contador
pesotot2S2 = Application.WorksheetFunction.LogInv(Rnd, 5.321, 0.284)
ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.23 * pesotot2S2
ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "2S2E1"
contador = contador + 4.5 'd2
If contador >= Vao.Value + 0 Then
Exit Do
End If
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.32 * pesotot2S2
ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "2S2E2"
contador = contador + 7 'd3
If contador >= Vao.Value + 0 Then
  Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.45 * pesotot2S2
ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "2S2E3"
ActiveCell.Offset(0, 3).Select
contador = contador + 3.5 + espac 'd4+espac
Case Is = "2I2" 'BIMODAL
  contador = contador + 1 'd1
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
  End If
  ActiveCell.Value = contador
  u1 = Rnd
  u2 = Rnd
  If u1 < 0.1 Then
    pesotot2I2 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 570, 30)
  Else
    pesotot2I2 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 203.1, 24.7)
  End If
  ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.2 * pesotot2I2
  ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "2I2E1"
  contador = contador + 4.5 'd2
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
  End If
  ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
  ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.34 * pesotot2I2
  ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "2I2E2"
  contador = contador + 6 'd3
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
  End If
  ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
  ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.24 * pesotot2I2
  ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "2I2E3"
  contador = contador + 2.5 'd4
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
  End If
  ActiveCell.Offset(0, 3).Value = contador
  ActiveCell.Offset(1, 3).Value = 0.22 * pesotot2I2
  ActiveCell.Offset(2, 3).Value = "2I2E4"
  ActiveCell.Offset(0, 4).Select
  contador = contador + 1.5 + espac 'd5+espac
Case Is = "2S3"
```

```
escolha2S3 = Rnd
If escolha2S3 <= 0.2 Then '2S3 curto
    contador = contador + 1.5 'd1
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Value = contador
    u1 = Rnd
    u2 = Rnd
    If u1 < 0.76 Then
        pesotot2S3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 420.05, 21.53)
    Else
        pesotot2S3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 229.04, 89.08)
    End If
    ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.15 * pesotot2S3
    ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "2S3CE1"
    contador = contador + 4.5 'd2
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
    ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.26 * pesotot2S3
    ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "2S3CE2"
    contador = contador + 4 'd3
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
    ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.59 * pesotot2S3
    ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "2S3CE3"
    ActiveCell.Offset(0, 3).Select
    contador = contador + 2.5 + spac 'd4+spac
Else '2S3 longo
    contador = contador + 1.5 'd1
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Value = contador
    u1 = Rnd
    u2 = Rnd
    If u1 < 0.76 Then
        pesotot2S3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 420.05, 21.53)
    Else
        pesotot2S3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 229.04, 89.08)
    End If
    ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.15 * pesotot2S3
    ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "2S3LE1"
    contador = contador + 4.5 'd2
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.26 * pesotot2S3
ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "2S3LE2"
contador = contador + 6.5 'd3
If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.59 * pesotot2S3
ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "2S3LE3"
ActiveCell.Offset(0, 3).Select
contador = contador + 4 + espac 'd4+espac
End If
Case Is = "2C3" 'BIMODAL
    contador = contador + 1.5 'd1
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Value = contador
    u1 = Rnd
    u2 = Rnd
    If u1 < 0.9 Then
        pesotot2C3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 452.53, 13.71)
    Else
        pesotot2C3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 203.24, 58.27)
    End If
    ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.13 * pesotot2C3
    ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "2C3E1"
    contador = contador + 5.5 'd2
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
    ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.24 * pesotot2C3
    ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "2C3E2"
    contador = contador + 5 'd3
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
    ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.21 * pesotot2C3
    ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "2C3E3"
    contador = contador + 5.5 'd3
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Offset(0, 3).Value = contador
    ActiveCell.Offset(1, 3).Value = 0.42 * pesotot2C3
    ActiveCell.Offset(2, 3).Value = "2C3E4"
    ActiveCell.Offset(0, 4).Select
    contador = contador + 1.5 + espac 'd4+espac
```

Case Is = "3S2"

contador = contador + 1.5 'd1

If contador >= Vao.Value + 0 **Then**

Exit Do

End If

ActiveCell.Value = contador

u1 = Rnd

u2 = Rnd

If u1 < 0.49 **Then**

 pesotot3S2 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 387.97, 29.97)

Else

 pesotot3S2 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 248.5, 40.02)

End If

ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.18 * pesotot3S2

ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "3S2E1"

Contador = contador + 5 'd2

If contador >= Vao.Value + 0 **Then**

Exit Do

End If

ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador

ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.4 * pesotot3S2

ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "3S2E2"

contador = contador + 7 'd3

If contador >= Vao.Value + 0 **Then**

Exit Do

End If

ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador

ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.42 * pesotot3S2

ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "3S2E3"

ActiveCell.Offset(0, 3).Select

contador = contador + 2 + espac 'd4+espac

Case Is = "3I2" 'BIMODAL

contador = contador + 1.5 'd1

If contador >= Vao.Value + 0 **Then**

Exit Do

End If

ActiveCell.Value = contador

u1 = Rnd

u2 = Rnd

If u1 < 0.56 **Then**

 pesotot3I2 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 402.31, 42.59)

Else

 pesotot3I2 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 215.94, 38.04)

End If

ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.18 * pesotot3I2

ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "3I2E1"

contador = contador + 5 'd2

If contador >= Vao.Value + 0 **Then**

Exit Do

End If

ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador


```

ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.42 * pesotot3I2
ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "3I2E2"
contador = contador + 7 'd3
If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.2 * pesotot3I2
ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "3I2E3"
contador = contador + 2.5 'd4
If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 3).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 3).Value = 0.2 * pesotot3I2
ActiveCell.Offset(2, 3).Value = "3I2E4"
ActiveCell.Offset(0, 4).Select
contador = contador + 1 + espac 'd5+espac
Case Is = "3S3"
    escolha3S3 = Rnd
    If escolha3S3 <= 0.2 Then '3S3 curto
        contador = contador + 1.5 'd1
        If contador >= Vao.Value + 0 Then
            Exit Do
        End If
        ActiveCell.Value = contador
        u1 = Rnd
        u2 = Rnd
        If u1 < 0.78 Then
            pesotot3S3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 461.8, 10)
        Else
            pesotot3S3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 393.6, 60)
        End If
        ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.12 * pesotot3S3
        ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "3S3CE1"
        contador = contador + 5 'd2
        If contador >= Vao.Value + 0 Then
            Exit Do
        End If
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
        ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.34 * pesotot3S3
        ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "3S3CE2"
        contador = contador + 4.5 'd3
        If contador >= Vao.Value + 0 Then
            Exit Do
        End If
        ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
        ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.54 * pesotot3S3
        ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "3S3CE3"
        ActiveCell.Offset(0, 3).Select
        contador = contador + 2.5 + espac 'd4+espac

```

```
Else '3S3 longo
    contador = contador + 1.5 'd1
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Value = contador
    u1 = Rnd
    u2 = Rnd
    If u1 < 0.78 Then
        pesotot3S3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 461.8, 10)
    Else
        pesotot3S3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 393.6, 60)
    End If
    ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.12 * pesotot3S3
    ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "3S3LE1"
    contador = contador + 5 'd2
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
    ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.34 * pesotot3S3
    ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "3S3LE2"
    contador = contador + 7 'd3
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
    ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.54 * pesotot3S3
    ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "3S3LE3"
    ActiveCell.Offset(0, 3).Select
    contador = contador + 3.5 + spac 'd4+spac
End If
Case Is = "2I3" 'BIMODAL
    contador = contador + 1.5 'd1
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Value = contador
    u1 = Rnd
    u2 = Rnd
    If u1 < 0.96 Then
        pesotot2I3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 458.1, 11.16)
    Else
        pesotot2I3 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 317.32, 115.85)
    End If
    ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.12 * pesotot2I3
    ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "2I3E1"
    contador = contador + 4.5 'd2
    If contador >= Vao.Value + 0 Then
        Exit Do
    End If
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.23 * pesotot2I3
ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "2I3E2"
contador = contador + 4 'd3
If contador >= Vao.Value + 0 Then
  Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.21 * pesotot2I3
ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "2I3E3"
contador = contador + 2.5 'd4
If contador >= Vao.Value + 0 Then
  Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 3).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 3).Value = 0.22 * pesotot2I3
ActiveCell.Offset(2, 3).Value = "2I3E4"
contador = contador + 2.5 'd5
If contador >= Vao.Value + 0 Then
  Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 4).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 4).Value = 0.22 * pesotot2I3
ActiveCell.Offset(2, 4).Value = "2I3E5"
ActiveCell.Offset(0, 5).Select
contador = contador + 1.5 + espac 'd6+espac
Case Is = "3D4"
  contador = contador + 1.5 'd1
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
  End If
  ActiveCell.Value = contador
  pesotot3D4 = Application.WorksheetFunction.NormInv(Rnd, 577.57, 25.96)
  ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.11 * pesotot3D4
  ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "3D4E1"
  contador = contador + 4 'd2
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
  End If
  ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
  ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.31 * pesotot3D4
  ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "3D4E2"
  contador = contador + 6.5 'd3
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
    Exit Do
  End If
  ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
  ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.3 * pesotot3D4
  ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "3D4E3"
  contador = contador + 4.5 'd4
  If contador >= Vao.Value + 0 Then
```

```
Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 3).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 3).Value = 0.28 * pesotot3D4
ActiveCell.Offset(2, 3).Value = "3D4E4"
ActiveCell.Offset(0, 4).Select
contador = contador + 2.5 + spac 'd5+spac
Case Is = "3T6" 'BIMODAL
contador = contador + 1.5 'd1
If contador >= Vao.Value + 0 Then
Exit Do
End If
ActiveCell.Value = contador
u1 = Rnd
u2 = Rnd
If u1 < 0.95 Then
pesotot3T6 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 752.38, 21.99)
Else
pesotot3T6 = Application.WorksheetFunction.NormInv(u2, 400, 70)
End If
ActiveCell.Offset(1, 0).Value = 0.08 * pesotot3T6
ActiveCell.Offset(2, 0).Value = "3T6E1"
contador = contador + 5 'd2
If contador >= Vao.Value + 0 Then
Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 1).Value = 0.23 * pesotot3T6
ActiveCell.Offset(2, 1).Value = "3T6E2"
contador = contador + 6.5 'd3
If contador >= Vao.Value + 0 Then
Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 2).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 2).Value = 0.24 * pesotot3T6
ActiveCell.Offset(2, 2).Value = "3T6E3"
contador = contador + 4.5 'd4
If contador >= Vao.Value + 0 Then
Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 3).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 3).Value = 0.22 * pesotot3T6
ActiveCell.Offset(2, 3).Value = "3T6E4"
contador = contador + 6.5 'd5
If contador >= Vao.Value + 0 Then
Exit Do
End If
ActiveCell.Offset(0, 4).Value = contador
ActiveCell.Offset(1, 4).Value = 0.23 * pesotot3T6
ActiveCell.Offset(2, 4).Value = "3T6E5"
ActiveCell.Offset(0, 5).Select
```

```
        contador = contador + 2.5 + espac 'd6+espac
    End Select
    coluna = coluna + 1
    Loop
    linha = linha + 1
    Cells(linha * 3 - 2, 1).Select
    Loop
    Cells(1, 1).Select
    contaplan = contaplan + 1
    Loop
    Sheets("Ano1a5").Activate
End Sub
```

B.4 PLANILHAS *Calcula Esforço*

B.4.1 *Calcula Momento (isostática)*

```
Private Sub UserForm_Initialize()
    NomeArquivo.Text = "3_Monta trem de carga.xls"
    QuantTabuleiros.Value = 20000
    NumFaixas.Value = 2
    Vao.Value = 200
End Sub
```

```
Private Sub Gera_Click()
    contaplan = 1
    Do While contaplan <= 5
        Select Case contaplan
            Case Is = 1
                Sheets("Ano1a5").Activate
            Case Is = 2
                Sheets("Ano6a10").Activate
            Case Is = 3
                Sheets("Ano11a15").Activate
            Case Is = 4
                Sheets("Ano16a20").Activate
            Case Is = 5
                Sheets("Ano21a25").Activate
        End Select
        L = Vao.Value + 0
        linha = 1
        Cells(1, 1).Select
        PlanPesquisa = ActiveCell.Worksheet.Name
        ActiveCell.Value = "tabuleiro"
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "1 faixa"
        ActiveCell.Offset(1, 0).Select
        Do Until linha = QuantTabuleiros.Value + 1
            coluna = 2
            A = 1
```

```
momento = 0
Do Until A > L Or A = 0
    q = Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(linha * 3 - 1,
coluna).Value
    A = Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(linha * 3 - 2,
coluna).Value
    If A <= L / 2 Then
        momento = momento + q * A / 2
    Else
        If A > L Then
            Exit Do
        End If
        momento = momento + q * (L - A) / 2
    End If
    coluna = coluna + 1
Loop
If momento = 0 Then
    Exit Do
End If
ActiveCell.Value = linha
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = momento
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
linha = linha + 1
Loop
linha2 = 1
numfaixa = NumFaixas.Value + 0 'declarada como caixa de texto
Cells(1, 3).Select
ActiveCell.Value = numfaixa & " faixas"
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Do Until linha2 >= QuantTabuleiros.Value + 1
    contafaixa = 0
    mom2 = 0
    Do While contafaixa < numfaixa
        mom2 = mom2 + Cells(linha2 + 1, 2).Value
        contafaixa = contafaixa + 1
        linha2 = linha2 + 1
    Loop
    ActiveCell.Value = mom2
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
Cells(1, 5).Select
ActiveCell.Value = "Máximos anuais (" & numfaixa & " faixas)"
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
linha3 = 2
Dim anual As Range
Do While linha3 <= (QuantTabuleiros.Value / numfaixa + 1)
    Set anual = Range(Cells(linha3, 3), Cells(linha3 + 2000, 3))
    ActiveCell.Value = Application.WorksheetFunction.Max(anual)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    linha3 = linha3 + 2000
Loop
```

```
Cells(1, 1).Select
contaplan = contaplan + 1
Loop
Sheets("Resumo").Activate
Cells(1, 1).Select
contaplan2 = 1
Do While contaplan2 <= 5
  Select Case contaplan2
    Case Is = 1
      planres = "Ano1a5"
    Case Is = 2
      planres = "Ano6a10"
    Case Is = 3
      planres = "Ano11a15"
    Case Is = 4
      planres = "Ano16a20"
    Case Is = 5
      planres = "Ano21a25"
  End Select
  nn = 2
  Do While nn <= 6
    ActiveCell.Value = Worksheets(planres).Cells(nn, 5).Value
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    nn = nn + 1
  Loop
  contaplan2 = contaplan2 + 1
Loop
Cells(1, 1).Select
End Sub
```

B.4.2 *Calcula Força Cortante (isostática)*

```
Private Sub UserForm_Initialize()
  NomeArquivo.Text = "3_Monta trem de carga.xls"
  QuantTabuleiros.Value = 20000
  NumFaixas.Value = 2
  Vao.Value = 200
End Sub
```

```
Private Sub Gera_Click()
  contaplan = 1
  Do While contaplan <= 5
    Select Case contaplan
      Case Is = 1
        Sheets("Ano1a5").Activate
      Case Is = 2
        Sheets("Ano6a10").Activate
      Case Is = 3
        Sheets("Ano11a15").Activate
      Case Is = 4
```

```
    Sheets("Ano16a20").Activate
Case Is = 5
    Sheets("Ano21a25").Activate
End Select
L = Vao.Value + 0
linha = 1
Cells(1, 1).Select
PlanPesquisa = ActiveCell.Worksheet.Name
ActiveCell.Value = "tabuleiro"
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "1 faixa"
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Do Until linha = QuantTabuleiros.Value + 1
    coluna = 2
    A = 1
    cortante = 0
    Do Until A > L Or A = 0
        q = Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(linha * 3 - 1,
coluna).Value
        A = Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(linha * 3 - 2,
coluna).Value
        cortante = cortante + q * (L - A) / L
        If A > L Then
            Exit Do
        End If
        coluna = coluna + 1
    Loop
    If cortante = 0 Then
        Exit Do
    End If
    ActiveCell.Value = linha
    ActiveCell.Offset(0, 1).Value = cortante
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    linha = linha + 1
Loop
linha2 = 1
numfaixa = NumFaixas.Value + 0 'declarada como caixa de texto
Cells(1, 3).Select
ActiveCell.Value = numfaixa & " faixas"
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Do Until linha2 >= QuantTabuleiros.Value + 1
    contafaixa = 0
    cor2 = 0
    Do While contafaixa < numfaixa
        cor2 = cor2 + Cells(linha2 + 1, 2).Value
        contafaixa = contafaixa + 1
        linha2 = linha2 + 1
    Loop
    ActiveCell.Value = cor2
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
Loop
Cells(1, 5).Select
```



```
ActiveCell.Value = "Máximos anuais (" & numfaixa & " faixas)"
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
linha3 = 2
Dim anual As Range
Do While linha3 <= (QuantTabuleiros.Value / numfaixa + 1)
    Set anual = Range(Cells(linha3, 3), Cells(linha3 + 2000, 3))
    ActiveCell.Value = Application.WorksheetFunction.Max(anual)
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    linha3 = linha3 + 2000
Loop
Cells(1, 1).Select
contaplan = contaplan + 1
Loop
Sheets("Resumo").Activate
Cells(1, 1).Select
contaplan2 = 1
Do While contaplan2 <= 5
    Select Case contaplan2
        Case Is = 1
            planres = "Ano1a5"
        Case Is = 2
            planres = "Ano6a10"
        Case Is = 3
            planres = "Ano11a15"
        Case Is = 4
            planres = "Ano16a20"
        Case Is = 5
            planres = "Ano21a25"
    End Select
    nn = 2
    Do While nn <= 6
        ActiveCell.Value = Worksheets(planres).Cells(nn, 5).Value
        ActiveCell.Offset(1, 0).Select
        nn = nn + 1
    Loop
    contaplan2 = contaplan2 + 1
Loop
Cells(1, 1).Select
End Sub
```

B.4.3 *Calcula Momento Negativo (hiperestática)*

```
Private Sub UserForm_Initialize()
    NomeArquivo.Text = "3_Monta trem de carga.xls"
    QuantTabuleiros.Value = 20000
    NumFaixas.Value = 2
    v1.Value = 40
    v2.Value = 40
End Sub
```

Private Sub Gera_Click()

contaplan = 1

Do While contaplan <= 5**Select Case** contaplan**Case Is** = 1

Sheets("Ano1a5").Activate

Case Is = 2

Sheets("Ano6a10").Activate

Case Is = 3

Sheets("Ano11a15").Activate

Case Is = 4

Sheets("Ano16a20").Activate

Case Is = 5

Sheets("Ano21a25").Activate

End Select

vao1 = v1.Value + 0

vao2 = v2.Value + 0

linha = 1

Cells(1, 1).Select

ActiveCell.Value = "tabuleiro"

ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "1 faixa"

ActiveCell.Offset(1, 0).Select

PlanPesquisa = ActiveCell.Worksheet.Name

Do Until linha = QuantTabuleiros.Value + 1

coluna = 2

a = 1

momento = 0

Do Until a > (vao1 + vao2) **Or** a = 0

q = Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(linha * 3 - 1, coluna).Value

a = Workbooks(NomeArquivo.Text).Worksheets(PlanPesquisa).Cells(linha * 3 - 2, coluna).Value

If a <= vao1 **Then** $X = a * ((vao1 + vao2)^2 - a^2 - vao2^2) / (2 * vao2 * vao1^2)$ $RC = ((a) - X * (vao1)) / (vao1 + vao2)$

momento = momento + q * (RC * vao2)

Else**If** a > (vao1 + vao2) **Then****Exit Do****End If** $X = (vao1 + vao2 - a) * ((vao1 + vao2)^2 - (vao1 + vao2 - a)^2 - vao1^2) / (2 * vao1 * vao2^2)$ $RC = ((a) - X * (vao1)) / (vao1 + vao2)$

momento = momento + q * (RC * vao2 - (a - vao1))

End If

coluna = coluna + 1

Loop**If** momento = 0 **Then****Exit Do****End If**

```
ActiveCell.Value = linha  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = -momento  
ActiveCell.Offset(1, 0).Select  
linha = linha + 1
```

Loop

```
linha2 = 1  
numfaixa = NumFaixas.Value + 0 'declarada como caixa de texto  
Cells(1, 3).Select  
ActiveCell.Value = numfaixa & " faixas"  
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
```

```
Do Until linha2 >= QuantTabuleiros.Value + 1
```

```
    contafaixa = 0
```

```
    mom2 = 0
```

```
    Do While contafaixa < numfaixa
```

```
        mom2 = mom2 + Cells(linha2 + 1, 2).Value
```

```
        contafaixa = contafaixa + 1
```

```
        linha2 = linha2 + 1
```

Loop

```
ActiveCell.Value = mom2
```

```
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
```

Loop

```
Cells(1, 5).Select
```

```
ActiveCell.Value = "Máximos anuais (" & numfaixa & " faixas)"
```

```
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
```

```
linha3 = 2
```

```
Dim anual As Range
```

```
Do While linha3 <= (QuantTabuleiros.Value / numfaixa + 1)
```

```
    Set anual = Range(Cells(linha3, 3), Cells(linha3 + 2000, 3))
```

```
    ActiveCell.Value = Application.WorksheetFunction.Max(anual)
```

```
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
```

```
    linha3 = linha3 + 2000
```

Loop

```
Cells(1, 1).Select
```

```
contaplan = contaplan + 1
```

Loop

```
Sheets("Resumo").Activate
```

```
Cells(1, 1).Select
```

```
contaplan2 = 1
```

```
Do While contaplan2 <= 5
```

```
    Select Case contaplan2
```

```
        Case Is = 1
```

```
            planres = "Ano1a5"
```

```
        Case Is = 2
```

```
            planres = "Ano6a10"
```

```
        Case Is = 3
```

```
            planres = "Ano11a15"
```

```
        Case Is = 4
```

```
            planres = "Ano16a20"
```

```
        Case Is = 5
```

```
            planres = "Ano21a25"
```

```
End Select
```

```
nn = 2
Do While nn <= 6
    ActiveCell.Value = Worksheets(planres).Cells(nn, 5).Value
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    nn = nn + 1
Loop
    contaplan2 = contaplan2 + 1
Loop
    Cells(1, 1).Select
End Sub
```

ANEXO C

EXEMPLO DE CÁLCULO DO ESFORÇO CARACTERÍSTICO

Neste anexo, serão apresentados os resultados de um processamento para obtenção do esforço característico correspondente aos quantis 99,43% e 99,14%, conforme o modelo definido no capítulo 7. Trata-se de uma ponte em seção celular com 40 metros de vão, duas faixas de tráfego, tráfego tipo PD-B (tabela 8.1), com espaçamento entre os veículos de 2 metros. As tabelas C.2 a C.51 apresentam os 50 trens de carga correspondentes aos momentos fletores máximos anuais determinados para a distribuição de extremos.

Tabela C.1 – Padrão das tabelas dos trens de carga de momentos máximos

FAIXA DE TRÁFEGO	COORDENADA (m)
	CARGA (kN)
	VEÍCULO (conf. tab. 7.4) / EIXO

Tabela C.2 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 1

FAIXA 1	1,50	6,00	12,50	20,00	25,00	29,50	35,00				
	64,57	111,92	253,97	55,22	156,45	248,47	36,30				
	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	3S3CE1	3S3CE2	3S3CE3	3CE1				
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	30,50	34,00	36,50	
	6,48	6,48	63,23	178,19	172,45	160,95	6,48	6,48	6,48	6,48	
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	

Tabela C.3 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 2

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	27,50	32,00	37,00	39,50	
	6,48	6,48	64,50	181,76	175,90	164,17	31,21	43,10	6,48	6,48	
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2CE1	2CE2	autoE1	autoE2	
FAIXA 2	1,50	5,50	12,00	16,50	22,50	26,50	33,00	37,50			
	65,69	185,12	179,15	167,21	61,71	173,92	168,31	157,09			
	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4			

Tabela C.4 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 3

FAIXA 1	1,50	6,00	12,50	20,00	24,50	28,50	34,00			
	30,51	52,89	120,03	66,03	114,46	259,73	57,64			
	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	3CE1			
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	17,50	24,00	28,50	34,00	36,50
	6,48	6,48	6,48	6,48	63,54	179,06	173,29	161,73	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2

Tabela C.5 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 4

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,50	33,50		
	6,48	6,48	60,27	169,85	164,37	153,41	55,56	157,41		
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3S3LE1	3S3LE2		
FAIXA 2	1,50	6,00	10,00	12,50	15,00	20,00	24,00	30,50	35,00	
	54,41	104,29	95,22	99,76	99,76	65,05	183,32	177,40	165,58	
	2I3E1	2I3E2	2I3E3	2I3E4	2I3E5	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	

Tabela C.6 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 5

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	27,50	32,00	37,00		
	6,48	6,48	68,23	192,28	186,08	173,67	48,86	67,47	92,49		
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2CE1	2CE2	4CE1		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	18,50	23,00	28,50	31,00	34,50	37,00
	6,48	6,48	6,48	6,48	54,82	155,32	246,68	6,48	6,48	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3S3CE1	3S3CE2	3S3CE3	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2

Tabela C.7 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 6

FAIXA 1	0,50	5,00	10,50	15,00	21,50	29,00	33,00	39,50		
	19,94	27,54	63,40	109,90	249,38	64,69	182,32	176,44		
	2CE1	2CE2	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3		
FAIXA 2	1,50	5,50	12,00	16,50	22,50	27,50	32,00	37,50		
	62,59	176,39	170,70	159,32	56,56	160,25	254,52	6,48		
	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3S3CE1	3S3CE2	3S3CE3	autoE1		

Tabela C.8 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 7

FAIXA 1	1,50	6,50	13,50	20,50	24,50	31,00	35,50			
	55,76	158,00	250,94	66,24	186,68	180,66	168,62			
	3S3LE1	3S3LE2	3S3LE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4			
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	34,00		
	6,48	6,48	65,50	184,58	178,62	166,71	57,79	156,26		
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3CE1	3CE2		

Tabela C.9 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 8

FAIXA 1	1,50	6,00	12,50	20,00	24,00	30,50	35,00				
	61,15	105,99	240,51	64,24	181,05	175,21	163,53				
	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4				
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	18,00	22,00	27,50	30,00	33,50	39,50
	6,48	6,48	6,48	6,48	67,09	116,29	263,89	6,48	6,48	24,09	65,15
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	autoE1	autoE2	3CE1	3CE2

Tabela C.10 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 9

FAIXA 1	1,50	6,00	10,00	16,00	20,00	26,50	31,00	36,50			
	56,72	98,31	223,10	65,44	184,43	178,48	166,58	48,94			
	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3CE1			
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	17,50	24,00	28,50	34,00	36,50	
	6,48	6,48	6,48	6,48	62,10	175,01	169,36	158,07	6,48	6,48	
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	

Tabela C.11 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 10

FAIXA 1	1,50	5,50	12,00	16,50	22,50	27,00	33,50				
	65,55	184,74	178,78	166,86	67,69	117,33	266,26				
	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3				
FAIXA 2	1,50	6,50	13,50	20,50	25,00	29,00	35,00	39,50			
	56,27	159,43	253,21	61,21	106,09	240,74	20,19	34,99			
	3S3LE1	3S3LE2	3S3LE3	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	2S3LE1	2S3LE2			

Tabela C.12 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 11

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	12,00	16,00	22,00	26,50	30,50	36,00	38,50	
	6,48	6,48	61,39	106,41	241,47	60,10	104,18	236,40	6,48	6,48	
	autoE1	autoE2	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	autoE1	autoE2	
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	12,50	19,50	26,00	28,50	32,00	34,50	38,50	
	6,48	6,48	56,64	160,48	254,87	6,48	6,48	6,48	6,48	47,98	
	autoE1	autoE2	3S3LE1	3S3LE2	3S3LE3	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	2S2E1	

Tabela C.13 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 12

FAIXA 1	1,50	6,00	12,50	20,00	24,50	31,00	38,00				
	56,88	98,59	223,73	67,42	116,86	265,19	6,48				
	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	autoE1				
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	27,50	32,00	37,00	39,50	
	6,48	6,48	66,18	186,50	180,48	168,45	49,79	68,75	6,48	6,48	
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2CE1	2CE2	autoE1	autoE2	

Tabela C.14 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 13

FAIXA 1	1,00	7,00	14,00	19,00	26,00	33,00	37,50		
	53,99	145,97	52,98	150,12	238,42	31,05	53,81		
	3CE1	3CE2	3S3LE1	3S3LE2	3S3LE3	2S3LE1	2S3LE2		
FAIXA 2	1,50	6,00	10,00	12,50	15,00	20,00	24,00	30,50	35,00
	55,34	106,07	96,85	101,46	101,46	65,76	185,33	179,35	167,39
	2I3E1	2I3E2	2I3E3	2I3E4	2I3E5	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4

Tabela C.15 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 14

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	12,00	16,00	22,00	26,00	32,50	37,00		
	6,48	6,48	60,54	104,94	238,13	62,11	175,04	169,39	158,10		
	autoE1	autoE2	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	30,50	34,00	36,50	
	6,48	6,48	68,50	193,03	186,80	174,35	6,48	6,48	6,48	6,48	
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	

Tabela C.16 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 15

FAIXA 1	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	17,50	24,00	28,50	34,50	38,50	
	6,48	6,48	6,48	6,48	65,37	184,23	178,29	166,40	66,73	188,04	
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3D4E1	3D4E2	
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	17,50	24,00	28,50	34,00	36,50	
	6,48	6,48	6,48	6,48	63,60	179,23	173,44	161,88	6,48	6,48	
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	

Tabela C.17 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 16

FAIXA 1	0,50	5,00	10,00	14,50	20,50	23,00	27,50	33,50		
	39,23	54,17	126,22	214,57	151,46	138,84	35,63	96,33		
	2CE1	2CE2	2I2E1	2I2E2	2I2E3	2I2E4	3CE1	3CE2		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,00	15,50	19,50	23,50	30,00	34,50
	6,48	6,48	6,48	6,48	6,48	6,48	62,60	176,42	170,73	159,35
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4

Tabela C.18 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 17

FAIXA 1	0,50	5,00	10,50	14,50	21,00	25,50	31,00	33,50	36,50		
	22,59	31,20	67,94	191,47	185,30	172,94	6,48	6,48	67,03		
	2CE1	2CE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	2CE1		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	12,00	16,00	22,00	26,50	33,00			
	6,48	6,48	59,77	103,61	235,11	66,74	115,68	262,50			
	autoE1	autoE2	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3			

Tabela C.19 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 18

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	12,00	18,50	26,00	30,00	36,50
	6,48	6,48	67,47	116,95	265,38	63,58	179,19	173,40
	autoE1	autoE2	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	12,00	18,50	26,00	30,00	36,50
	6,48	6,48	62,33	108,04	245,17	63,76	179,69	173,90
	autoE1	autoE2	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3

Tabela C.20 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 19

FAIXA 1	0,50	5,00	10,50	15,00	19,00	24,50	30,50	37,50		
	49,80	68,77	67,65	117,26	266,09	58,85	159,10	51,38		
	2CE1	2CE2	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	3CE1	3CE2	2S3LE1		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	30,50	34,00	36,50
	6,48	6,48	68,60	193,31	187,08	174,61	6,48	6,48	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2

Tabela C.21 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 20

FAIXA 1	1,50	5,50	12,00	16,50	22,50	27,50	34,50
	66,33	186,93	180,90	168,84	55,25	156,53	248,61
	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3S3LE1	3S3LE2	3S3LE3
FAIXA 2	1,00	7,00	14,00	19,00	23,50	29,50	33,50
	26,90	72,74	55,53	157,34	249,89	60,41	170,24
	3CE1	3CE2	3S3CE1	3S3CE2	3S3CE3	3D4E1	3D4E2

Tabela C.22 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 21

FAIXA 1	1,50	6,00	12,50	20,00	24,00	30,50	35,00			
	61,07	105,85	240,19	64,82	182,68	176,79	165,00			
	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4			
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	17,50	24,00	28,50	34,00	36,50
	6,48	6,48	6,48	6,48	63,50	178,95	173,18	161,63	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2

Tabela C.23 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 22

FAIXA 1	1,50	6,00	12,50	20,00	24,00	30,50	35,00
	63,81	110,60	250,98	62,48	176,08	170,40	159,04
	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4
FAIXA 2	1,50	5,50	12,00	16,50	22,50	27,00	33,50
	65,33	184,11	178,17	166,29	64,93	112,55	255,40
	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3

Tabela C.24 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 23

FAIXA 1	1,50	5,50	12,00	16,50	22,50	26,50	33,00	37,50					
	66,55	187,55	181,50	169,40	66,53	187,48	181,43	169,34					
	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4					
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	18,00	22,00	24,50	27,00	31,50	34,00	37,50	
	6,48	6,48	6,48	6,48	53,13	101,84	92,98	97,41	97,41	6,48	6,48	6,48	
	autoE1	AutoE2	autoE1	autoE2	2I3E1	2I3E2	2I3E3	2I3E4	2I3E5	autoE1	autoE2	autoE1	

Tabela C.25 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 24

FAIXA 1	1,50	5,50	12,00	16,50	22,50	27,00	31,00	36,00					
	61,38	172,99	167,41	156,25	63,63	110,29	250,28	24,55					
	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	2CE1					
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	12,50	19,50	26,00	28,50	32,00	34,50	38,00			
	6,48	6,48	56,68	160,61	255,08	6,48	6,48	6,48	6,48	6,48			
	autoE1	autoE2	3S3LE1	3S3LE2	3S3LE3	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	autoE1			

Tabela C.26 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 25

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	30,50	34,00	36,50
	6,48	6,48	67,70	190,78	184,63	172,32	6,48	6,48	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	12,00	18,50	26,00	30,00	36,50		
	6,48	6,48	58,78	101,89	231,21	63,22	178,17	172,43		
	autoE1	autoE2	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3		

Tabela C.27 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 26

FAIXA 1	1,50	6,00	12,50	20,00	24,50	28,50	34,00	36,50					
	61,66	106,87	242,52	69,14	119,85	271,96	6,48	6,48					
	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	autoE1	autoE2					
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	17,50	24,00	28,50	34,00	36,50	39,50		
	6,48	6,48	6,48	6,48	66,85	188,40	182,32	170,17	6,48	6,48	32,77		
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	2CE1		

Tabela C.28 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 27

FAIXA 1	1,50	6,50	11,00	17,00	21,00	27,50	32,00	37,50					
	45,95	130,18	206,76	68,84	194,00	187,75	175,23	6,48					
	3S3CE1	3S3CE2	3S3CE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1					
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	18,50	23,00	28,50	31,00	34,50	37,00		
	6,48	6,48	6,48	6,48	56,63	160,45	254,82	6,48	6,48	6,48	6,48		
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3S3CE1	3S3CE2	3S3CE3	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2		

Tabela C.29 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 28

FAIXA 1	1,00	7,00	14,00	18,00	24,50	29,00	34,50	
	51,33	138,77	62,87	177,17	171,46	160,03	48,22	
	3CE1	3CE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3CE1	
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	12,00	18,50	26,00	31,00	37,50
	6,48	6,48	66,86	115,89	262,99	56,54	162,54	169,61
	autoE1	autoE2	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	3T6E1	3T6E2	3T6E3

Tabela C.30 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 29

FAIXA 1	1,50	6,00	12,50	20,00	24,50	28,50	34,00	36,50
	59,61	103,32	234,45	62,20	107,81	244,64	6,48	6,48
	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	autoE1	autoE2
FAIXA 2	1,50	6,00	12,50	20,00	24,50	31,00	37,50	
	64,01	110,95	251,77	64,88	112,46	255,20	20,67	
	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	2CE1	

Tabela C.31 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 30

FAIXA 1	1,50	6,50	13,00	17,50	24,00	30,00	35,00	39,50		
	62,93	180,94	188,80	173,07	180,94	55,78	158,04	251,01		
	3T6E1	3T6E2	3T6E3	3T6E4	3T6E5	3S3CE1	3S3CE2	3S3CE3		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	17,50	24,00	28,50	34,00	36,50
	6,48	6,48	6,48	6,48	65,57	184,78	178,82	166,90	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2

Tabela C.32 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 31

FAIXA 1	1,50	5,50	12,00	16,50	22,50	27,50	34,00	38,50		
	63,15	177,96	172,22	160,73	59,24	170,31	177,72	162,91		
	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3T6E1	3T6E2	3T6E3	3T6E4		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	30,50	34,00	36,50
	6,48	6,48	67,43	190,03	183,90	171,64	6,48	6,48	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2

Tabela C.33 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 32

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	12,00	18,50	26,00	30,50	37,00		
	6,48	6,48	60,87	105,50	239,41	68,24	118,28	268,39		
	autoE1	autoE2	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	17,50	24,00	28,50	34,00	36,50
	6,48	6,48	6,48	6,48	71,42	201,26	194,77	181,78	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2

Tabela C.34 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 33

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,50	33,00	39,50
	6,48	6,48	65,62	184,92	178,96	167,03	65,30	113,19	256,86
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3
FAIXA 2	1,00	7,00	14,00	18,00	24,50	29,00	34,50	37,00	
	60,77	164,30	60,79	171,31	165,79	154,73	6,48	6,48	
	3CE1	3CE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	

Tabela C.35 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 34

FAIXA 1	1,50	6,00	12,50	20,00	24,50	28,50	31,00	33,50	38,00
	64,35	111,55	253,12	56,54	108,36	98,94	103,65	103,65	6,48
	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	2I3E1	2I3E2	2I3E3	2I3E4	2I3E5	autoE1
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	12,00	16,00	22,00	26,50	33,00	
	6,48	6,48	67,01	116,15	263,56	61,73	107,01	242,82	
	autoE1	autoE2	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	

Tabela C.36 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 35

FAIXA 1	0,50	5,00	10,50	14,50	21,00	25,50	30,50	35,00		
	30,18	41,67	66,53	187,49	181,44	169,34	38,84	53,64		
	2CE1	2CE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2CE1	2CE2		
FAIXA 2	1,50	6,50	11,00	17,00	21,50	25,50	28,00	30,50	35,00	37,50
	63,89	181,02	287,51	54,80	105,03	95,89	100,46	100,46	6,48	6,48
	3S3CE1	3S3CE2	3S3CE3	2I3E1	2I3E2	2I3E3	2I3E4	2I3E5	autoE1	autoE2

Tabela C.37 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 36

FAIXA 1	1,50	6,00	10,00	16,00	20,50	27,00	34,50	39,00		
	64,41	111,64	253,33	66,01	114,42	259,66	62,96	109,14		
	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	2S3LE1	2S3LE2		
FAIXA 2	1,50	6,00	10,00	16,00	20,00	26,50	31,00	36,50	39,00	
	67,28	116,62	264,64	62,82	177,05	171,34	159,91	6,48	6,48	
	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	

Tabela C.38 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 37

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,50	33,00		
	6,48	6,48	62,78	176,91	171,21	159,79	51,83	72,11		
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2S2E1	2S2E2		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	18,50	23,00	28,50	34,50	
	6,48	6,48	6,48	6,48	56,33	159,59	253,47	63,33	171,23	
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3S3CE1	3S3CE2	3S3CE3	3CE1	3CE2	

Tabela C.39 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 38

FAIXA 1	1,50	5,50	12,00	16,50	22,50	27,00	31,00	33,50	36,00	
	65,99	185,96	179,97	167,97	53,82	103,15	94,18	98,67	98,67	
	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2I3E1	2I3E2	2I3E3	2I3E4	2I3E5	
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	30,50	34,00	36,50
	6,48	6,48	63,45	178,82	173,06	161,52	6,48	6,48	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2

Tabela C.40 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 39

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	12,50	19,50	26,50	30,50	37,00		
	6,48	6,48	54,78	155,22	246,52	61,24	172,57	167,01		
	autoE1	autoE2	3S3LE1	3S3LE2	3S3LE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	30,50	34,00	36,50
	6,48	6,48	61,51	173,34	167,75	156,57	6,48	6,48	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2

Tabela C.41 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 40

FAIXA 1	0,50	5,00	10,50	15,00	19,00	25,00	29,00	35,50	
	19,68	27,18	65,07	112,79	255,94	66,85	188,40	182,33	
	2CE1	2CE2	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3	
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	12,00	18,50	26,00	30,50	37,00	
	6,48	6,48	60,03	104,06	236,13	37,13	64,36	146,06	
	autoE1	autoE2	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	

Tabela C.42 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 41

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,50	33,50		
	6,48	6,48	65,67	185,08	179,11	167,16	56,88	161,17		
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3S3LE1	3S3LE2		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	17,50	24,00	28,50	34,50	38,50
	6,48	6,48	6,48	6,48	63,20	178,11	172,36	160,87	62,84	177,09
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3D4E1	3D4E2

Tabela C.43 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 42

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	30,50	34,00	36,50
	6,48	6,48	69,65	196,27	189,94	177,28	6,48	6,48	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,50	33,00	39,50	
	6,48	6,48	66,01	186,02	180,01	168,01	57,04	98,86	224,34	
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	

Tabela C.44 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 43

FAIXA 1	1,50	5,50	12,00	16,50	22,50	27,00	33,50				
	66,09	186,26	180,25	168,23	60,78	105,36	239,08				
	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3				
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	30,50	34,00	36,50	39,50
	6,48	6,48	61,83	174,24	168,62	157,38	6,48	6,48	6,48	6,48	20,32
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	2CE1

Tabela C.45 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 44

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	34,00			
	6,48	6,48	70,64	199,07	192,65	179,80	45,25	122,34			
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3CE1	3CE2			
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	27,50	32,00	37,00	39,50	
	6,48	6,48	65,11	183,51	177,59	165,75	62,56	86,40	6,48	6,48	
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2CE1	2CE2	autoE1	autoE2	

Tabela C.46 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 45

FAIXA 1	1,00	3,50	7,50	12,00	16,00	18,50	21,00	26,00	30,50	34,50	37,00	39,50
	6,48	6,48	56,91	109,08	99,60	104,34	104,34	55,62	106,61	97,34	101,98	101,98
	autoE1	autoE2	2I3E1	2I3E2	2I3E3	2I3E4	2I3E5	2I3E1	2I3E2	2I3E3	2I3E4	2I3E5
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	12,00	18,50	26,00	30,50	34,50	37,00	39,50		
	6,48	6,48	62,32	108,02	245,12	56,06	107,45	98,11	102,78	102,78		
	autoE1	autoE2	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	2I3E1	2I3E2	2I3E3	2I3E4	2I3E5		

Tabela C.47 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 46

FAIXA 1	1,50	6,00	10,00	12,50	15,00	19,00	23,50	29,00	33,50		
	58,37	111,88	102,15	107,01	107,01	40,25	55,59	64,02	110,96		
	2I3E1	2I3E2	2I3E3	2I3E4	2I3E5	2CE1	2CE2	2S3LE1	2S3LE2		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,50	33,00	37,00		
	6,48	6,48	63,28	178,34	172,59	161,08	62,56	108,44	246,07		
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3		

Tabela C.48 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 47

FAIXA 1	1,50	5,50	12,00	16,50	22,50	27,50	32,00	37,50			
	66,95	188,67	182,58	170,41	54,29	153,83	244,32	29,34			
	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	3S3CE1	3S3CE2	3S3CE3	3CE1			
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	12,50	19,50	26,00	28,50	32,00	34,50	38,00	
	6,48	6,48	56,78	160,87	255,51	6,48	6,48	6,48	6,48	6,48	
	autoE1	autoE2	3S3LE1	3S3LE2	3S3LE3	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	autoE1	

Tabela C.49 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 48

FAIXA 1	1,50	6,00	13,00	20,00	24,50	28,50	34,50	38,50		
	34,35	47,79	67,20	67,21	116,50	264,37	64,69	182,30		
	2S2E1	2S2E2	2S2E3	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	3D4E1	3D4E2		
FAIXA 2	1,50	6,00	10,00	16,00	20,00	26,50	31,00	36,50	39,00	
	66,01	114,42	259,65	62,42	175,91	170,24	158,89	6,48	6,48	
	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	

Tabela C.50 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 49

FAIXA 1	1,50	6,00	10,00	16,00	20,00	26,50	31,00	37,00		
	66,19	114,73	260,34	62,90	177,26	171,54	160,10	57,83		
	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	2S3LE1		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,00	9,50	13,50	18,00	24,50	31,50	34,00	37,50
	6,48	6,48	6,48	6,48	65,65	113,79	258,22	6,48	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2	2S3LE1	2S3LE2	2S3LE3	autoE1	autoE2	autoE1

Tabela C.51 – Trem de carga correspondente ao momento fletor máximo 50

FAIXA 1	1,50	6,00	10,00	16,00	21,00	28,00	34,50	37,00		
	65,53	113,59	257,76	56,04	158,78	252,19	6,48	6,48		
	2S3CE1	2S3CE2	2S3CE3	3S3LE1	3S3LE2	3S3LE3	autoE1	autoE2		
FAIXA 2	1,00	3,50	7,50	11,50	18,00	22,50	28,00	30,50	34,00	36,50
	6,48	6,48	65,05	183,32	177,40	165,58	6,48	6,48	6,48	6,48
	autoE1	autoE2	3D4E1	3D4E2	3D4E3	3D4E4	autoE1	autoE2	autoE1	autoE2

Tabela C.52 – Momentos Fletores no meio do vão (40 m) – máximos anuais

MOMENTOS FLETORES MÁXIMOS ANUAIS (kN.m)							
1	9429	14	10121	27	10100	40	9473
2	10212	15	9243	28	9620	41	9913
3	8556	16	9042	29	9364	42	9917
4	10445	17	10052	30	10110	43	9273
5	9350	18	9882	31	9752	44	10480
6	9969	19	9918	32	9478	45	9494
7	10738	20	10271	33	9968	46	9264
8	9309	21	9634	34	9948	47	9378
9	10174	22	10315	35	10544	48	9844
10	10272	23	9370	36	11096	49	9528
11	9077	24	9115	37	9671	50	9635
12	9547	25	9255	38	9462		
13	9829	26	9741	39	9299

Figura C.1 – Histograma dos máximos anuais

Figura C.2 – Plotagem no papel de probabilidades e obtenção dos parâmetros da distribuição

A seguir, os máximos anuais são postos em ordem crescente. Para a plotagem dos pontos em papel de probabilidades, utiliza-se o procedimento de Schneider (1997). No eixo vertical, plotam-se os valores de $F(s)$ em escala adequada, através de papel de probabilidades comercial, ou s , em escala linear, com utilização de qualquer ferramenta computacional. No eixo horizontal, os valores das amostras. O valor de

$F(s)$ será dado por $F(s) = (m - 0,4)/(N+0,2)$, e m é o índice de cada máximo ordenado, sendo N o total de máximos anuais (no caso, 50). E, utilizando-se a função inversa da distribuição acumulada padrão, obtém-se os valores de s correspondentes, que serão utilizados no gráfico, apresentado na figura C.2.

$$F_s^{-1}(s) = s = -\ln[-\ln(F_s(s))] \quad (C.1)$$

Através da equação da reta, obtém-se os parâmetros da distribuição:

$$\begin{aligned} X(s_0) = u &= 9529 \\ \alpha &= 0,0021564 \quad (\text{coeficiente angular}) \end{aligned} \quad (C.2)$$

A função inversa de distribuição acumulada de Gumbel I (item 5.6.2) é a seguinte:

$$F_x^{-1}(x) = \frac{\alpha \cdot u - \ln[-\ln(1 - F(x))]}{\alpha} = x \quad (C.3)$$

onde a variável x descreve os momentos fletores máximos anuais.

Finalmente, com a função C.3, obtém-se os momentos correspondentes ao quantil desejado. Tomando-se $F(x) = P = 1 - 0,9943$ ou $F(x) = P = 1 - 0,9914$, tem-se os respectivos momentos, apresentados no gráfico da figura C.3.

$$M(99,43\%) = 11920 \text{ kN.m}$$

$$M(99,14\%) = 11729 \text{ kN.m}$$

O Momento fletor máximo obtido por linha de influência, para o Trem-tipo 45, no meio do vão, sem coeficiente de impacto, e para 7,0 metros de largura (2 faixas) é dado por 10443 kN.m.

Assim, os viéses (relação momento característico / momento máximo do TT45) serão:

$$vies(99,43\%) = 1,14$$

$$vies(99,14\%) = 1,12$$

Figura C.3 – Função Densidade de Probabilidade da Distribuição dos Máximos Anuais