



## DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MODELO DE CARGAS MÓVEIS PARA VERIFICAÇÃO DE FADIGA EM PONTES RODOVIÁRIAS

Lívia Fernandes Santos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Rio de Janeiro  
Agosto de 2013

DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MODELO DE CARGAS MÓVEIS PARA  
VERIFICAÇÃO DE FADIGA EM PONTES RODOVIÁRIAS

Lívia Fernandes Santos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

---

Prof. Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.  
(Orientadora)

---

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

---

Prof. Benjamin Ernani Diaz, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
AGOSTO DE 2013

Santos, Livia Fernandes

Desenvolvimento de um Novo Modelo de Cargas Móveis para Verificação de Fadiga em Pontes Rodoviárias/  
Livia Fernandes Santos – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2013.

XV, 98 p: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Michèle Schubert Pfeil

Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/Curso de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 99-101.

1. Fadiga. 2. Pontes rodoviárias. 3. Espectro de veículos reais. I. Pfeil, Michèle Schubert. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Civil. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar sempre ao meu lado, me guiando na caminhada da vida. Aquele que me deu a força para continuar empenhada nos momentos de cansaço da graduação.

À minha orientadora, Michèle Pfeil, por todo o conhecimento e atenção a mim disponibilizados e pela ajuda prestada em todos os momentos deste trabalho. Agradeço também por servir de exemplo para a profissional que pretendo ser.

A todos os professores que contribuíram de forma imensa para minha formação, sendo grandes fontes de conhecimento e inspiração, Ana Catarina Evangelista, Benjamin Ernani Diaz, Eduardo Batista, Elaine Vazquez, Henrique Longo, Michèle Pfeil, Sérgio Hampshire e Valeriano Alves.

Aos professores do Laboratório de Estruturas - LABEST, onde tive minha primeira experiência de estágio, e que me fizeram ter gosto pela área de pesquisa, Ana Catarina Evangelista, Guilherme Cordeiro, Janine Vieira, Luiz Fernando Rosa e Romildo Toledo.

Aos meus pais, meu irmão e a Duca, que sempre me apoiaram, incentivando os estudos e dando carinho e amor. Ajudando em tudo que fosse possível (e impossível), da forma que podiam, inclusive com caronas fora da rota.

Ao meu namorado, Luís Fernando, por ter me acompanhado incondicionalmente durante toda a graduação. Por ter sido namorado e amigo. Por ter me acalmado nos momentos de stress e ter sido sempre companheiro.

Aos meus familiares e amigos, por me proporcionarem momentos de descontração e por entenderem a minha ausência nos períodos mais atarefados da graduação. Agradeço especialmente minha amiga Dalvania, pela ajuda neste trabalho e por estar sempre disponível.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

## DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MODELO DE CARGAS MÓVEIS PARA VERIFICAÇÃO DE FADIGA EM PONTES RODOVIÁRIAS

Lívia Fernandes Santos

Agosto/2013

Orientadora: Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Curso: Engenharia Civil

As pontes são estruturas submetidas a ciclos não uniformes de variação tensão devidos à passagem de veículos com diferentes características. Esses ciclos de variação de tensão provocam danos microscópicos no material, que se acumulam durante a vida útil da estrutura, podendo eventualmente resultar em uma fratura. Esse mecanismo de acumulação de danos é denominado fadiga, e a verificação desse fenômeno em estruturas de obras de arte especiais é essencial para garantir a segurança estrutural, especialmente em pontes em aço. Atualmente, a normalização brasileira não conta com um regulamento específico para análise de fadiga em pontes, apresentando somente modelos de cargas móveis para verificação do Estado Limite Último, o qual não é adequado para verificação da resistência à fadiga. Este trabalho busca desenvolver uma proposta de modelo de cargas móveis próprio para verificação de fadiga em pontes rodoviárias no Brasil. Este estudo é voltado para pontes em aço com vãos biapoioados, com comprimento de 10 a 40m. A calibração dos modelos de carga é feita a partir de dados atuais de tráfego de veículos pesados, coletados de postos de monitoramento de diversas rodovias brasileiras. São propostos dois modelos com aplicações distintas: o primeiro é baseado no conceito de dano equivalente, o segundo no de equivalência de variação máxima de tensão. O resultado deste trabalho pretende, de certa forma, contribuir para a modernização da normalização brasileira para projetos de pontes.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer.

## DEVELOPEMENT OF A NEW LOAD MODEL FOR FATIGUE ASSESSMENT OF BRIDGES WITH ROAD TRAFFIC

Lívia Fernandes Santos

August/2013

Advisor: Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Course: Civil Engineering

During service life, bridges are subjected to variable amplitude loading due to passage of traffic. These stress cycles result in microscopic damages, which accumulate during service life and may result in a fracture. This mechanism of damage accumulation is called fatigue, and its assessment is essential to ensure the structural safety, especially in steel bridges. Brazilian code does not have a specific standard for fatigue life assessment of bridges, only presenting a live load model for ultimate limit state, which is not appropriate for fatigue limit state. This study aims to develop new live load models for fatigue verification of Brazilian highway bridges, and it is focused on simple span steel bridges, with 10m to 40m span length. The live load models calibration is performed using actual truck traffic data, collected from monitoring stations placed on several Brazilian highways. Two live load models are proposed for different applications: one based on the damage equivalent concept and another on the equivalent maximum stress range. The result of this work aims to contribute to Brazilian bridge standard modernization.

# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.	Contextualização .....	1
1.2.	Motivação.....	1
1.3.	Objetivo.....	2
1.4.	Estrutura do Trabalho .....	3
<b>2.</b>	<b>PRINCÍPIOS DA ANÁLISE DE FADIGA.....</b>	<b>4</b>
2.1.	O Fenômeno da Fadiga (ESDEP, 2000).....	4
2.2.	Curvas de Resistência à Fadiga.....	5
2.3.	Acumulação de Dano e Vida Útil da Estrutura .....	7
2.4.	Avaliação da Resistência à Fadiga em um Espectro de Variação de Tensão.....	9
<b>3.</b>	<b>EFEITO DINÂMICO DA PASSAGEM DOS VEÍCULOS.....</b>	<b>11</b>
3.1.	Conceituação.....	11
3.2.	Coeficiente de Impacto da Norma Brasileira Atual.....	12
3.3.	Proposta de Mudança do Coeficiente de Impacto da Norma Brasileira.....	13
	3.3.1. <i>Coeficiente de Impacto Vertical</i> .....	13
	3.3.2. <i>Coeficiente do Número de Faixas</i> .....	14
	3.3.3. <i>Coeficiente de Impacto Adicional</i> .....	14
	3.3.4. <i>Comparação entre o Coeficiente de Impacto Atual e a Nova Proposta</i> ...	15
3.4.	Simulação da Interação Veículo-Pavimento-Estrutura.....	16
<b>4.</b>	<b>A ANÁLISE DE FADIGA SEGUNDO ÀS NORMAS DE PROJETO.....</b>	<b>18</b>
4.1.	Modelos para Verificação da Resistência à Fadiga .....	18
4.2.	Normalização Brasileira.....	20
4.3.	Proposta de Atualização do Modelo de Cargas Móveis da NBR7188.....	21
4.4.	Norma Europeia – Eurocódigo .....	22
	4.4.1. <i>Princípios Gerais</i> .....	22
	4.4.2. <i>Modelos de Carga do Eurocódigo 1 e Métodos de Verificação</i> .....	23
	4.4.3. <i>Curvas de Resistência à Fadiga e Categorias de Detalhes</i> .....	29
4.5.	Norma Americana – AASHTO.....	32
	4.5.1. <i>Princípios Gerais</i> .....	32

4.5.2. Modelo de Carga Móvel e Número de Ciclos.....	32
4.5.3. Curvas de Resistência à Fadiga e Categorias de Detalhes.....	33
4.5.4. Verificação da Resistência à Fadiga.....	35
<b>5. BASE DE DADOS DE TRÁFEGO.....</b>	<b>36</b>
5.1. Montagem da Base de Dados (ROSSIGALI, 2013).....	36
5.2. Classes de Veículos.....	37
5.3. Características dos Veículos que Compõem a Base de Dados.....	39
5.3.1. Pesos Totais das Classes de Veículos.....	39
5.3.2. Distribuição do Peso Total por Eixos.....	40
5.3.3. Distâncias Longitudinais entre Eixos e Bitolas.....	42
5.4. Composição do Tráfego.....	44
5.4.1. Frequências das Classes de Veículos.....	44
5.4.2. Volume Médio Diário Adotado.....	46
5.4.3. Comparação das Características do Tráfego da Base de Dados com o Tráfego de Referência para a Elaboração do Eurocode.....	47
<b>6. MODELOS DE CARGAS MÓVEIS PARA FADIGA NO BRASIL.....</b>	<b>49</b>
6.1. Introdução.....	49
6.2. Condições de Tráfego para o Espectro de Veículos Reais.....	49
6.3. Modelo de Cargas Móveis para Dano Equivalente (Nível 2).....	50
6.3.1. Metodologia de Cálculo do Peso do Veículo Padrão de Fadiga.....	51
6.3.2. Variações de Tensão nos Elementos Estruturais.....	53
6.3.3. Curvas S-N Adotadas.....	55
6.3.4. Cálculo dos Momentos Fletores Devido à Ação do Tráfego Real.....	57
6.3.5. Configurações para os Veículos Padrão de Fadiga.....	62
6.3.6. Momentos Fletores Máximos Provocados Pelos Modelos de Carga Móveis Unitários.....	65
6.3.7. Aplicação do Modelo de Cargas Móveis para Dano Equivalente na Verificação de Fadiga.....	68
6.4. Modelo de Cargas Móveis para Equivalência de Variação de Tensão Máxima (Nível 1).....	69
6.4.1. Metodologia de Cálculo do Fator de Redução para o Modelo de Cargas Móveis.....	69



6.4.2. Configurações para Modelo de Cargas para Equivalência de Tensão Máxima .....	71
6.4.3. Cálculo dos Momentos Fletores .....	71
6.4.4. Aplicação do Modelo de Cargas Móveis para Equivalência de Variação de Tensão Máxima .....	75
<b>7. ANÁLISES E RESULTADOS.....</b>	<b>77</b>
7.1. MF3 - Modelo de Equivalência de Danos.....	77
7.1.1. Resultados e Discussões .....	77
7.1.2. Comparação dos Modelos de Carga Calibrados com Dados do Tráfego Real com os Modelos de Cargas Móveis da AASHTO e Eurocódigo 1.....	81
7.1.3. Calibração do Modelo de Cargas.....	83
7.2. MF1 – Modelo de Equivalência de Variação de Tensão Máxima .....	85
<b>8. EXEMPLO NUMÉRICO PARA VERIFICAÇÃO DE FADIGA .....</b>	<b>89</b>
8.1. Introdução .....	89
8.2. Características Geométricas da Estrutura.....	90
8.3. Propriedades Geométricas dos Componentes Estruturais .....	91
8.3.1. Vigas Principais .....	91
8.3.2. Laje de Concreto Armado.....	92
8.3.3. Propriedades da Seção Mista .....	92
8.4. Curvas S-N Consideradas e Detalhe Analisado.....	93
8.5. Resultados e Discussões .....	94
8.5.1. Cálculo dos Danos .....	94
8.5.2. Verificação de Fadiga Através do MF1 .....	95
<b>9. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>96</b>
9.1. Conclusões .....	96
9.2. Trabalhos Futuros.....	98
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICE A – Dados da Composição do Tráfego .....</b>	<b>102</b>
A.1) Histogramas de Peso Total por Classe de Veículo.....	102
A.2) Frequencias Relativa e Absoluta das Classes de Veículos, por Faixa de Peso ...	106
<b>APÊNDICE B - Macro Para Cálculo dos Posições Críticas e Momentos Fletores Máximos .....</b>	<b>113</b>

<b>APÊNDICE C - Posição Longitudinal Crítica Para Cada Classe de Veículo e Comprimento de Vão.....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE D – Momentos Máximos no Meio do Vão Sem Coeficiente de Impacto .....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICE E - Cálculo do Dano Acumulado para Espectro de Veículos Reais .</b>	<b>127</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 – Exemplo de fratura provocada por fadiga em longarina soldada - ponte Hoan (FISHER et al.,2001) .....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.2 – Curva típica de crescimento de fissuras provocadas por fadiga (ESDEP, 2000) ....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.3 – Variação de tensão constante (adaptado de ESDEP,2000) .....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.4 – Curva S-N típica.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.5 – Ilustração da forma de utilização da curva S-N para obtenção do dano acumulado</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.6 – Exemplo de histograma de tensões (adaptado de ESDEP, 2000).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.7 – Três casos de espectro de tensões variáveis (adaptado de SMITH et al., 1989)..</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3.1 – Variação de tensões devido à passagem de um veículo (PFEIL et al., 2007).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3.2 – Comparação entre o coeficiente de impacto calculado pela NBR 7187(2003) e pela proposta de revisão da norma.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.3 – Impacto adotado no desenvolvimento dos modelos de carga do Eurocódigo 1 (2002) (SANPAOLESI e CROCE, 2005).....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3.4 – Efeito da qualidade do pavimento e da relação entre as frequências naturais no FAD, para ponte com vão de 30m (PFEIL et al., 2007).....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4.1 – Ilustração dos três níveis de verificação de fadiga. (a) Nível 1, (b) Nível 2, (c) Nível 3 (adaptado de CEB (1987)) .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4.2 – Trem-tipo da norma brasileira NBR7188 (1982) para classes 45 e 30 .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 4.3 – Modelo de cargas móveis proposto por ROSSIGALI (2013), dimensões em m ....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4.4 – Modelo de cargas de fadiga 1 (FLM1) (adaptado de EN1991-2, 2002).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4.5 – Gráfico para obtenção do fator <math>\lambda_1</math> para a seção do meio do vão (adaptado de EN1993-2,2006) .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4.6 – Gráfico para obtenção do fator <math>\lambda_{max}</math> para a seção do meio do vão (adaptado de EN1993-2, 2006) .....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4.7 – Configuração do veículo-padrão do FLM3 do Eurocódigo (EN1991-2, 2002) .....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4.8 – Exemplo de Curva S-N com duas inclinações (adaptado de ESDEP, 2000).....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4.9 – Algumas categorias de detalhes do Eurocódigo para soldas longitudinais (EN1993-1-9, 2005) .....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4.10 – Curvas S-N para tensão normal segundo o Eurocódigo (EN1993-1-9, 2005).....</i>	<i>31</i>

<i>Figura 4.11 – Configuração do modelo de cargas proposto pela AASHTO para verificação da fadiga ( adaptado de AASHTO, 2007) .....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.12 – Curvas S-N adotadas pela AASTHO (2007) para tensões normais.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 5.1 - Grupos de eixos mais comuns nos veículos comerciais rodoviários: simples de rodas simples (SRS), simples de rodas duplas (SRD), duplo especial (DE, com duas configurações possíveis), tandem duplo (TD) e tandem triplo (TT) (ROSSIGALI,2013).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 5.2 – Histograma de peso: (a) Classe 3C, (b) Classe 2C; (c) Classe 2S2; (d) Classe 2CC .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 5.3 – Histograma de frequência das classes de veículos.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.4 – Histograma de frequência dos Pesos Totais dos Veículos .....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.5 – Histograma de frequência acumulada dos Pesos Totais dos Veículos.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.6 – Histograma de pesos totais - Autoestradas A6 (Auxerre, França) e M4 (Irlanda) (MALAKATAS, 2013) .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 6.1 – Histórico de variações de tensões de amplitude variável e representação da variação de tensão equivalente (adaptado de ESDEP, 2000).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 6.2 – Curvas S-N simplificadas com inclinação igual a <math>m=3</math> e <math>m=5</math> (SANPAOLESI e CROCE, 2005) .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 6.3 – Distribuição de frequência da posição transversal da linha de centro do veículo (EN1991-2, 2002).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 6.4 – Linha de influência longitudinal de uma viga principal biapoiada na seção do meio do vão.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 6.5 – Configurações das propostas de veículo padrão para verificação de fadiga no Brasil, segundo o nível de verificação 2.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 6.6 – Linha de influência transversal da viga de extremidade (TOLEDO,2011) .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 6.7 – Valores das ordenadas da linha de influência transversal para a viga de extremidade nas posições dos eixos dos veículos do espectro. Dimensões em metros.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 6.8 – Valores das ordenadas da linha de influência transversal para a viga de extremidade nas posições dos eixos do veículo padrão da NBR 7188 (1984). Dimensões em metros.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 6.9 – Valores das ordenadas da linha de influência transversal para a viga de extremidade nas posições dos eixos do veículo padrão nº1 proposto por ROSSIGALI (2013). Dimensões em metros .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 6.10 – Posição da carga distribuída sobre a linha de influência e valores das ordenadas nos pontos de interesse. Dimensões em metros.....</i>	<i>74</i>

<i>Figura 7.1 - Peso total do modelo de cargas móveis MF3, considerando <math>m=3</math> e o coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003) .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 7.2 - Peso total do modelo de cargas móveis MF3, considerando <math>m=3</math> e a proposta de revisão do coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003) .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 7.3 - Peso total do modelo de cargas móveis MF3, considerando <math>m=5</math> e o coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003) .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 7.4 - Peso total do modelo de cargas móveis MF3, considerando <math>m=5</math> e a proposta de revisão do coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003) .....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 7.5 - Comparação entre o peso total do veículo padrão FLM3 do Eurocódigo e peso total do veículo padrão com a mesma configuração, calibrado com os dados das rodovias brasileiras .....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 7.6 - Comparação entre o peso total do veículo padrão da AASHTO e peso total do veículo padrão com a mesma configuração, calibrado com os dados das rodovias brasileiras .....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 7.7 - Veículo padrão proposto para verificação da resistência à fadiga no Brasil, segundo o nível 2 de verificação.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 7.8 – Fator redutor das cargas totais dos modelos de carga de referência, considerando o coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003) .....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 7.9 – Fator redutor das cargas totais dos modelos de carga de referência, considerando a proposta de revisão do coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003) .....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 7.10 – Modelo de cargas móveis proposto para verificação da resistência à fadiga no Brasil, segundo o nível 1 de verificação.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 8.1 – Seção transversal da ponte (mm) (TOLEDO, 2011) .....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 8.2 – Vista da ponte em planta (mm) (TOLEDO, 2011) .....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 8.3 – Indicação das dimensões da seção transversal das longarinas .....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 8.4 – Seção transversal da laje de concreto armado (TOLEDO, 2011) .....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 8.5 – Seção transversal homogeneizada para vigas extremas para cargas de curta duração (TOLEDO, 2011) .....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 8.6 – Ilustração da categoria de detalhe 112 e descrição das características (EN1993-1-9, 2005) .....</i>	<i>94</i>
<i>Figura A.1 – Histograma de peso das classes 2S3-L e 2CB.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura A.2 – Histograma de peso das classes 3S3-L e 3T4.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura A.3 – Histograma de peso das classes 2S1 e 2S3-C.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura A.4 – Histograma de peso das classes 3CB e 3BB.....</i>	<i>103</i>

<i>Figura A.5 – Histograma de peso das classes 2I2 e 3I3 .....</i>	<i>103</i>
<i>Figura A.6 – Histograma de peso das classes 3S3-C e 2C2.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura A.7 – Histograma de peso das classes 3S2 e 2I3.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura A.8 – Histograma de peso das classes 3C2 e 2C3 .....</i>	<i>104</i>
<i>Figura A.9 – Histograma de peso das classes 3C3 e 3I1.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura A.10 – Histograma de peso das classes 3S1 e 3M6.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura A.11 – Histograma de peso das classes 3D4 e 2I1.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura A.12 – Histograma de peso das classes 4C e 3I2.....</i>	<i>105</i>

## **ÍNDICE DE TABELAS**

<i>Tabela 4.1 – Indicação do número de veículos pesado por ano e por faixa lenta (adaptado de EN1991-2, 2002) .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 4.2 – Características do veículos frequentes do FLM2 do Eurocódigo (EN1991-2, 2002) .....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 4.3 – Configuração dos eixos dos veículos-padrão do FLM2 e FML4 do Eurocódigo (EN1991-2, 2002) .....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 4.4 – Configuração e frequências dos veículos-padrão do FLM4 do Eurocódigo (EN1991-2, 2002) .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 4.5 – Ciclos por passagem de veículo, n (adaptado de AASHTO,2007).....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4.6 – Constante A para cada categoria de detalhe (adaptado de AASHTO,2007) .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 4.7 – Limite de fadiga para variação de tensão de amplitude constante <math>\Delta FTH</math> (adaptado de AASHTO, 2007) .....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 5.1 - Silhuetas e características dos grupos de eixos das classes de veículos pertencentes a base de dados.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 5.2 – Coeficientes da equação linear que representa a variação do peso por grupo de eixos e peso total do veículo (ROSSIGALI,2013) .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 5.3 – Distâncias Longitudinais Entre Eixos dos Veículos (ROSSIGALI-2013).....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 5.4 – Bitolas dos Eixos dos Veículos .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 5.5 – Características do tráfego europeu e brasileiro de veículos pesados utilizadas para calibração de modelos .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 6.1 – Momentos fletores máximos no meio do vão sem coeficiente de impacto – Veículo 3C .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 6.2 – Momentos fletores máximos no meio do vão com coeficiente de impacto da NBR 7187 (2003) – Veículo 3C .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 6.3 – Momentos fletores máximos no meio do vão com coeficiente de impacto proposto para nova NBR 7187 (TIMERMAN e MARTIN, 2012) – Veículo 3C .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 6.4 – Dano acumulado causado por cada classe de veículo para um detalhe com <math>\Delta\sigma</math> igual a 112, segundo o Eurocódigo 3 – Parte 1-9 (2005) .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 6.5 – Dimensões longitudinais dos modelos de carga móvel propostos .....</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 6.6 – Distribuição proporcional do peso total dos modelos de carga móvel pelos eixos</i>	<i>66</i>

<i>Tabela 6.7 – Posição longitudinal crítica e momento máximo no meio do vão provocado pelos modelos de carga móvel de peso total unitário.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 6.8 – Veículos do espectro que geram <math>\Delta\sigma_{max}</math> para cada vão considerado .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 6.9 – Momentos fletores referentes a <math>\Delta\sigma_{max}</math>, no meio do vão, com coeficiente de impacto da atual NBR 7187 (2003) e proposta de revisão (TIMERMAN e MARTIN,2012) .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 7.1 – Peso total do veículo FLM3 do Eurocódigo ajustado pelo coeficiente <math>\lambda</math> .....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 7.2 – Resultados para veículo tipo tandem duplo, coeficiente de impacto proposto pela revisão da NBR7187(2003) e curvas S-N com inclinação <math>m=5</math>.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 7.3 - Momentos fletores máximos gerados pelos modelos de cargas móveis para Estado Limite Último da NBR7188 (1984) e proposto por ROSSIGALI (2013).....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 8.1 – Veículos utilizados em cada situação analisada.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabela 8.2 – Dimensões da seção transversal das longarinas .....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 8.3 – Resultado para cálculo do dano por ano e vida útil para cada situação .....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela A.1 – Frequências das classes de veículos por faixa de peso .....</i>	<i>106</i>
<i>Tabela C.1 – Posição longitudinal crítica para vão de 10m.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabela C.2 – Posição longitudinal crítica para vão de 15m.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabela C.3 – Posição longitudinal crítica para vão de 20m.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabela C.4 – Posição longitudinal crítica para vão de 25m.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabela C.5 – Posição longitudinal crítica para vão de 30m.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabela C.6 – Posição longitudinal crítica para vão de 35m.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabela C.7 – Posição longitudinal crítica para vão de 40m.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabela E.1 – Cálculo do Dano Acumulado para Espectro de Veículos Reais para ponte com vão de 40m e detalhe categoria 112MPa .....</i>	<i>127</i>



# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. Contextualização**

No Brasil, o transporte de cargas é feito majoritariamente através das rodovias. Segundo a Confederação Nacional dos Transportes (2013), o modal rodoviário representa 61,1% da matriz do transporte de cargas brasileira, contando com um total de 220.378km de estradas pavimentadas. Nessa malha rodoviária, circula diariamente um grande volume de veículos com diversas configurações e pesos. As características desse tráfego se alteram com o tempo, e atualmente no Brasil, assim como em diversos países, esse desenvolvimento tem se caracterizado pelo aumento do volume de tráfego e acréscimo do número de eixos dos veículos e peso bruto total.

As pontes e viadutos fazem parte da malha rodoviária nacional e estão sujeitas à passagem desse variado tráfego de veículos comerciais. Essas estruturas, por receberem um carregamento acidental de caráter cíclico, estão suscetíveis ao fenômeno de fadiga, que se caracteriza pela acumulação gradual de danos devido à variação de tensão nos componentes estruturais, a qual pode levar a ruptura. Esse fenômeno se intensifica com o aumento do volume de tráfego e peso total dos veículos.

Diante desse cenário, surge o questionamento a cerca da validade dos atuais modelos de carga para verificação da resistência à fadiga em obras de arte especiais no Brasil.

## **1.2. Motivação**

A norma brasileira de pontes que trata das cargas móveis em pontes rodoviárias, NBR 7188 (1984), apresenta somente modelo de cargas móveis para a verificação das estruturas em situações de Estado Limite Último (E.L.U.), quando a estrutura apresenta colapso total ou parcial por ação de um carregamento de magnitude extrema, em geral com baixa probabilidade de ocorrência. Já a ruptura por fadiga, é decorrente da ação repetida de carregamentos de magnitude usual e com alta probabilidade de ocorrência durante a vida útil da estrutura. Por esse motivo, o modelo de cargas utilizado para verificação da estrutura no Estado Limite Último não é adequado à verificação de fadiga.

A única menção encontrada na normalização brasileira prescreve a verificação da resistência à fadiga em estruturas de pontes de concreto adotando 50% do trem tipo utilizado para determinação dos esforços longitudinais no E.L.U., para a determinação dos esforços para a resistência à fadiga de vigas principais longitudinais.

No entanto, a adoção dessa porcentagem não é justificada e pode não ser adequada à composição atual do tráfego nas rodovias brasileiras.

No que diz respeito à análise de fadiga em pontes de aço, não há qualquer indicação na normalização brasileira de um modelo de cargas para verificação deste estado limite. Atualmente, para os projetos destas estruturas, é necessário recorrer a normas estrangeiras, como a norma americana (AASHTO, 2007) ou a Europeia (EN-1991, 2002; EN1993-2, 2006 e EN-1993-1-9, 2005). No entanto, o tipo de tráfego das rodovias desses países, pode, por vezes, não ser representativo do tráfego nas rodovias brasileiras, tanto no que diz respeito ao volume de veículos como às configurações e pesos totais destes.

Assim sendo, faz-se necessário o desenvolvimento de um modelo de cargas para verificação da fadiga em pontes com base nos dados atuais de tráfego em rodovias no Brasil.

### **1.3. Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo de cargas móveis para verificação da resistência à fadiga em longarinas de pontes de aço, tendo como base os dados do tráfego atual em rodovias brasileiras, coletados e tratados por ROSSIGALI (2013). O estudo será desenvolvido para pontes em grelha, com longarinas biapoiadas e para uma faixa de vãos com comprimentos entre 10 e 40m.

É importante ressaltar que apesar deste estudo ser voltado para pontes de aço, a metodologia de desenvolvimento dos modelos de carga móveis para verificação de fadiga é aplicável também para pontes de concreto.

Com base nos procedimentos existentes na literatura para verificação da resistência à fadiga, neste trabalho, serão, então, desenvolvidos dois modelos de cargas segundo dois enfoques distintos: o de equivalência de variação de tensão máxima e o de equivalência de dano. Os modelos serão desenvolvidos com base em ações nominais, sem a multiplicação pelos coeficientes de segurança parciais.

Como objetivo secundário, está a comparação entre os modelos de cargas desenvolvidos (com os dados do tráfego rodoviário brasileiro atual) e aqueles apresentados pelas normas atuais, tais como a AASHTO (2007) e Eurocódigo 1 (2002). Além disso, pretende-se também avaliar a influência do coeficiente de impacto na calibração dos modelos de cargas móveis, comparando a atual formulação da norma brasileira (NB7187, 2003) e uma proposta de revisão desse coeficiente apresentada por TIMERMAN e MARTIN (2012).

Será também apresentado um exemplo numérico onde é realizado o cálculo de danos em uma ponte mista, visando a validação dos resultados obtidos para o modelo de cargas para verificação de fadiga baseado no conceito de dano equivalente, além disso, também é realizada a verificação da resistência à fadiga utilizando-se o modelo de cargas desenvolvido através da equivalência de variação de tensão máxima.

#### **1.4. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está organizado em nove capítulos, organizados da seguinte forma:

No capítulo 2, é apresentada uma revisão de alguns conceitos relacionados à análise de fadiga e, no capítulo 3, é discutido o efeito dinâmico em pontes.

No capítulo 4, é feita uma revisão da abordagem da análise de fadiga em pontes dada pelas normas brasileira, americana e europeia.

No capítulo 5, é descrito o banco de dados de veículos utilizado para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 6, são desenvolvidos os modelos de carga móveis através dos conceitos de dano equivalente e variação de tensão máxima e, no capítulo 7, são apresentados os resultados obtidos para a calibração dos modelos através dos dados do tráfego real.

Finalmente, o capítulo 8 apresenta o exemplo numérico para verificação de fadiga e no capítulo 9 são tecidas as considerações finais.

## **2. PRINCÍPIOS DA ANÁLISE DE FADIGA**

### **2.1. O Fenômeno da Fadiga (ESDEP, 2000)**

A fadiga pode ser definida como o processo no qual o dano é acumulado em um material através de variações de tensão, resultando eventualmente em uma ruptura estrutural da peça, mesmo que a maior carga aplicada seja inferior ao limite elástico do material.

O fenômeno da fadiga é um processo de redução local da resistência que depende de diversos fatores, tanto intrínsecos quanto extrínsecos à estrutura, o que torna a sua análise de grande complexidade. Dentre os principais fatores intrínsecos à estrutura que ditam o comportamento de um elemento à fadiga, estão a geometria dos detalhes, a distribuição de tensões e as características do material constituinte do elemento. Dentre os fatores extrínsecos, estão a amplitude de variação de tensões e os fatores ambientais.

As alterações permanentes na estrutura do material que caracterizam o fenômeno da fadiga só ocorrem quando há variação de tensão ou deformação. Essas flutuações geram o aparecimento de microfissuras, que após um determinado número de ciclos culminam na fratura completa do material, como mostrado na Figura 2.1. As fissuras podem ocorrer sem danos aparentes e propagar de maneira estável até formar uma fratura grave, causando uma ruptura frágil da estrutura.



*Figura 2.1 – Exemplo de fratura provocada por fadiga em longarina soldada - ponte Hoan (FISHER et al.,2001)*

No processo de fadiga, podem ser identificados três estágios:

- Estágio I: Iniciação da fissura;
- Estágio II: Propagação de uma fissura dominante;
- Estágio III: Fratura final do elemento.

No primeiro estágio, os danos no componente se desenvolvem de maneira lenta, ocupando a maior parte da vida útil da estrutura sem defeitos iniciais graves. No entanto, quando a vida útil se aproxima do final, a redução da área da seção transversal aumenta a concentração de tensão, acelerando substancialmente o processo de ruptura. A Figura 2.2 mostra a evolução da fratura com o aumento do número de ciclos de variação de tensões.

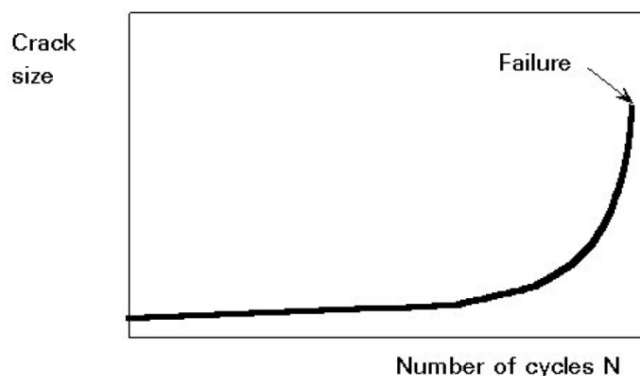


Figura 2.2 – Curva típica de crescimento de fissuras provocadas por fadiga (ESDEP, 2000)

Em estruturas soldadas, como é o caso da maioria das pontes em aço, as fissuras causadas pelo fenômeno da fadiga quase sempre se iniciam nas soldas. A justificativa para isso está no processo de fabricação. A maioria dos processos de soldagem deixam pequenas discontinuidades, a partir de onde as fissuras começam a crescer. Dessa forma, o tempo necessário para que ocorra a fase inicial de iniciação da primeira fissura é muito reduzido, ou até mesmo não existe, acelerando o processo de fadiga nas juntas soldadas.

## 2.2. Curvas de Resistência à Fadiga

Um dos métodos para avaliação da vida útil em estruturas submetidas ao fenômeno da fadiga é aquele baseado na variação de tensão. Esse método é o procedimento recomendado pelas normas e consiste na determinação do número de ciclos necessários para que ocorra a fratura do elemento. Para que seja possível essa avaliação, são utilizadas as curvas S-N.

As curvas S-N são diagramas na escala log-log que relacionam a intensidade da variação de tensão (S) com o número de ciclos necessários à ruptura (N). Augusto Wöhler (WÖHLER, 1863 *apud* MADDAAH, 2013) foi o pioneiro na realização de ensaios para a determinação da resistência à fadiga em corpos de prova submetidos à

variação de tensão constante (Figura 2.3). Os resultados desses ensaios deram origem às primeiras curvas S-N, que também são conhecidas como curvas de Wöhler. A Figura 2.4 ilustra uma curva S-N típica.

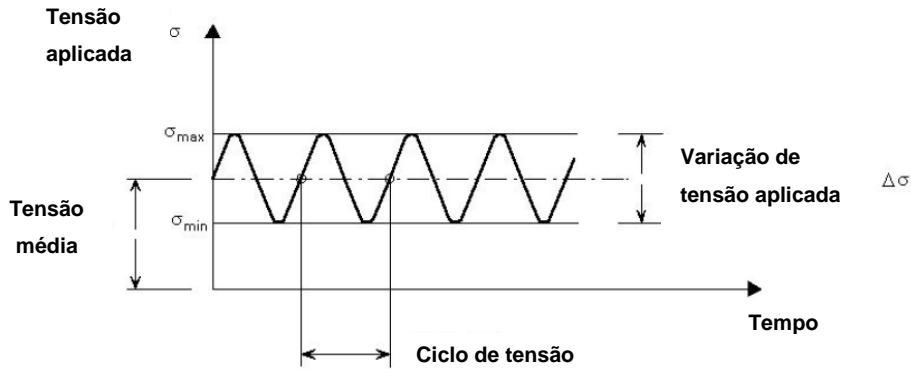


Figura 2.3 – Variação de tensão constante (adaptado de ESDEP,2000)

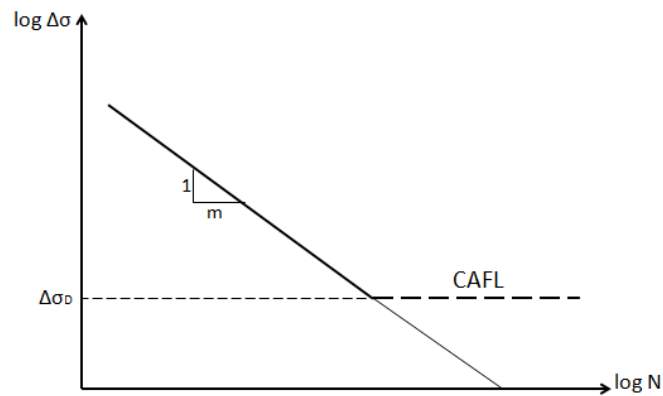


Figura 2.4 – Curva S-N típica

As curvas S-N são representadas por retas paralelas, de inclinação constante, definidas de forma a se ajustarem melhor aos resultados dos ensaios de fadiga. Cada uma dessas retas se refere a um conjunto específico de detalhes típicos e pode ser expresso da seguinte forma:

$$N = C \times \Delta\sigma^{-m} \quad (2.1)$$

onde,

$N$  é o número de ciclos até a ruptura;

$C$  é uma constante característica do detalhe;

$\Delta\sigma$  é a variação de tensão;

$m$  é a inclinação da curva.

As curvas S-N podem também ser divididas em dois segmentos distintos: o primeiro representando a fadiga de baixo ciclo, onde o número de ciclos necessários para o início de uma fissura visível ou até a ruptura final é menor do que  $10^4$  ou  $5 \times 10^4$  ciclos (BOLOTIN, 1999), e o segundo, denominado de fadiga de alto ciclo, com o número de ciclos até a ruptura maior que  $10^4$  ou  $5 \times 10^4$  ciclos.

A fadiga de baixo ciclo é caracterizada por apresentar ciclos de tensões próximos da resistência última do material, o que reduz a quantidade de ciclos para se atingir a ruptura. No caso das estruturas de pontes, os ciclos de tensões originados de ações do tráfego de veículos geralmente são bem inferiores à tensão de escoamento do material, sendo necessário um número elevado de ciclos de tensão para levar a estrutura à ruptura por fadiga, o que caracteriza a fadiga de alto ciclo.

Segundo BOLOTIN (1999), há evidências de que para alguns materiais estruturais como aço-carbono, o início das microfissuras não acontece se a amplitude das tensões for suficientemente pequena. Nesses casos, há um limite para as tensões abaixo do qual a ruptura por fadiga não acontece mesmo para um grande número de ciclos de variação constante de tensão. Para esses materiais, as curvas S-N têm a tendência de aproximarem-se a uma assíntota horizontal com o valor desse limite, denominado limite de fadiga para variações de tensões constantes (CAFL – Constante Amplitude Fatigue Limite) – ver Figura 2.4.

### 2.3. Acumulação de Dano e Vida Útil da Estrutura

As bases das teorias que estudam o fenômeno da fadiga foram desenvolvidas para tensões cíclicas de amplitude constante, no entanto, boa parte das estruturas, como pontes, estruturas *offshore* e guindastes, durante sua vida útil estarão expostas a ciclos de variações de tensão de diversas amplitudes. Um das formas de abordagem desse problema é através da aplicação da lei de danos acumulados, juntamente com as curvas S-N.

O dano causado pela aplicação de um determinado número de ciclos de variação de tensão constante é igual ao quociente do número  $n$  de ciclos aplicados por unidade de tempo pelo número  $N$  de ciclos que leva à fratura do elemento, obtido através das curvas S-N ( $D = n_i/N_i$ ).

A fadiga é um processo de acumulação de danos gradual que ocorre em diversos estágios desde a escala microestrutural até a escala dos componentes estruturais (BRANCO *et al.*, 1999). A regra de Palmgren-Miner é usada como ferramenta para cálculo do dano acumulado no elemento. Essa regra se baseia na hipótese de que o dano total acumulado no elemento estrutural sob amplitudes de

tensões variáveis, é obtido pela acumulação linear dos danos causados por cada um dos ciclos de tensão (ESDEP, 2000).

$$D = \sum_{i=1}^{nt} \frac{n_i}{N_i} \quad (2.2)$$

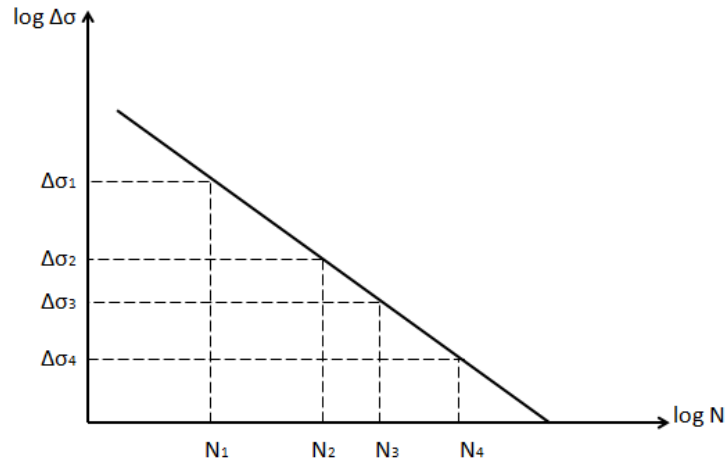


Figura 2.5 – Ilustração da forma de utilização da curva S-N para obtenção do dano acumulado

Os danos devem ser acumulados desde o início da operação do componente estrutural até o fim da sua vida útil. O fim da vida útil é definido pelo momento em que quando a estrutura não mantém mais níveis de desempenho aceitáveis, sob outro enfoque, quando a fratura alcança uma dimensão crítica tornando a estrutura insegura. Pela regra de Palmgren-Miner, o fim da vida útil é alcançado quando o dano acumulado é igual à unidade,  $D=1$ .

A vida útil à fadiga de uma ponte, assim como de outras estruturas, pode ser determinada pelo inverso do dano acumulado por unidade de tempo.

$$VU = \frac{1}{D} \quad (2.3)$$

O conceito de vida útil é de grande utilidade quando se deseja projetar uma estrutura para um determinado período de utilização. No caso de pontes, a vida útil projetada varia de 70 a 100 anos. Esse conceito também é utilizado para determinar o saldo de vida útil, ou seja, o tempo adicional até que ocorra uma falha por fadiga.



## 2.4. Avaliação da Resistência à Fadiga em um Espectro de Variação de Tensão

Como grande parte das estruturas possui um histórico de variações de tensão variável durante sua vida útil, esses dados precisam ser organizados de forma a possibilitar a análise de fadiga através da lei de acumulação de dano, equação 2.2.

Na prática, os dados de variação de tensão obtidos de estruturas reais são difíceis de serem processados. A conversão do histórico de variação de tensão em ciclos de amplitudes definidas pode ser feita através de dois principais métodos: o Método Rainflow e o Método do Reservatório (ESDEP, 2000).

Após a definição dos ciclos de tensão, a maneira mais comum de representar um histórico de variação de tensão é agrupando todos os ciclos de mesma amplitude, independente da ordem de ocorrência, e verificando a frequência de cada variação de tensão durante a vida útil da estrutura. Com esses dados, pode ser montado um histograma de tensões, também chamado de espectro de tensões, e a partir dele proceder à verificação da resistência à fadiga pela regra de Palmgren-Miner.

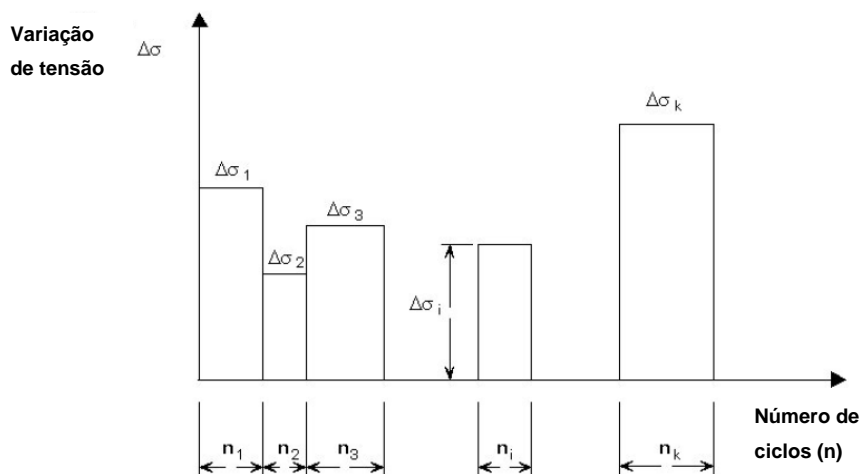


Figura 2.6 – Exemplo de histograma de tensões (adaptado de ESDEP, 2000)

Quando se utiliza um espectro de variação de tensões para verificação de fadiga, podem ocorrer basicamente três situações:

- 1) Todas as tensões do espectro estão acima do limite de fadiga para amplitude de tensão constante;
- 2) Alguns, mas não todos, ciclos de tensões estão acima desse limite de fadiga;

- 3) Todos os ciclos de tensão estão abaixo do limite de fadiga para amplitude de tensão constante.

Essas três situações são ilustradas na Figura 2.7.

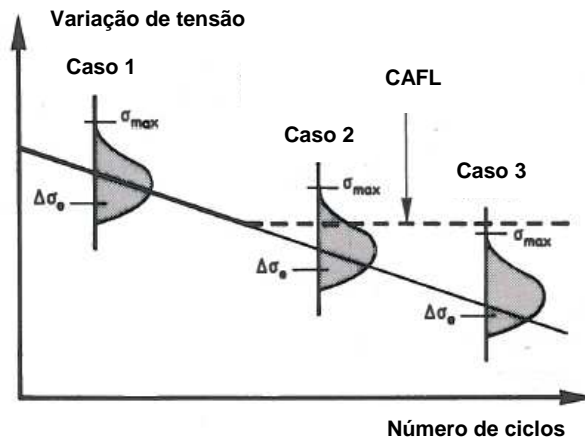


Figura 2.7 – Três casos de espectro de tensões variáveis (adaptado de SMITH et al., 1989)

Na primeira situação, onde todos os ciclos de tensão estão acima do limite de fadiga para amplitude constante, a verificação da fadiga deve ser feita pela acumulação de dano.

Na terceira situação, onde todos os ciclos estão abaixo do limite de fadiga para amplitude de tensão constante, o fenômeno da fadiga não é esperado, desde que seja assegurado que nenhum ciclo exceda o limite de fadiga.

A segunda situação é a mais comum em estruturas de pontes. Nesse caso, se ao menos um ciclo exceder o limite de fadiga para amplitude de tensão constante, os ciclos abaixo desse limite passam a influenciar na vida útil de fadiga. Essa influência é devida a uma superação gradual do limite de fadiga pelos ciclos de menor amplitude a medida que as fissuras, causadas pelos ciclos acima do limite, aumentam de tamanho (SMITH et al., 1989). Assim como na primeira situação, a avaliação da resistência a fadiga deve ser feita através da acumulação de danos e todos os ciclos devem ser considerados.

### **3. EFEITO DINÂMICO DA PASSAGEM DOS VEÍCULOS**

#### **3.1. Conceituação**

A passagem dos veículos pelas pontes representa um carregamento variável no tempo e as pontes podem responder ao tráfego de veículos pesados de forma dinâmica, ou seja, exibindo vibrações que podem majorar os esforços estáticos.

Segundo a norma AASHTO (2007), os efeitos dinâmicos resultantes da passagem de veículos pelas pontes têm duas origens: o impacto vertical dos veículos sobre a ponte, provocado pela passagem destes sobre descontinuidades, como por exemplo, ressaltos nas extremidades da ponte e irregularidades na superfície do pavimento, e a resposta dinâmica da ponte como um todo, devido ao fenômeno de ressonância, resultado da similaridade da frequência de vibração entre a ponte e o veículo.

Dessa forma, a amplitude da resposta dinâmica da ponte está associada às características da ponte e dos veículos que por ela circulam. Dentre essas características podemos citar as frequências naturais da estrutura e do veículo, a geometria da ponte, a velocidade dos veículos, o nível de rugosidade do pavimento e a existência de ressaltos na cabeceira da ponte (PFEIL *et al.*, 2007).

Devido à natureza dinâmica do carregamento provocado pelos veículos na ponte, os deslocamentos e esforços gerados na ponte são diferentes daqueles provocados pelas cargas quase-estáticas. A passagem de um único veículo pela ponte pode gerar diversos ciclos de tensão de menor amplitude, resultado das vibrações durante e depois do carregamento dinâmico.

A Figura 3.1 apresenta a resposta em termos de tensões na seção mais solicitada de uma ponte devido à passagem de um veículo. Foram consideradas duas situações: uma com o pavimento em bom estado sem ressalto na extremidade da ponte e outra com pavimento bom e ressalto. Observa-se que nas duas situações há a geração de um ciclo maior, correspondente à resposta quase-estática e outros ciclos menores devido às vibrações. Na situação onde há ressalto, os ciclos menores se intensificam, evidenciando uma resposta dinâmica mais intensa.

Usualmente, nos projetos de pontes, o efeito dinâmico da passagem dos veículos é apenas considerado multiplicando-se os esforços calculados estaticamente por um coeficiente de amplificação dinâmica, ou coeficiente de impacto. Apesar de ser de conhecimento que os efeitos dinâmicos dependem de diversos fatores, o coeficiente de majoração para as cargas dinâmicas, ainda é dado na norma brasileira como função somente do comprimento do vão da ponte.

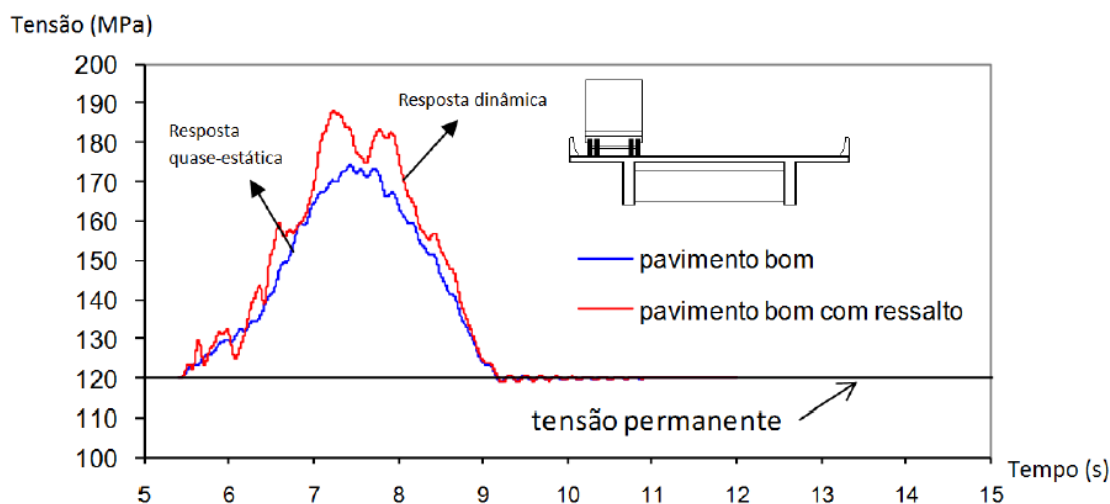


Figura 3.1 – Variação de tensões devido à passagem de um veículo (PFEIL et al., 2007)

Para a análise de fadiga, além da majoração dos esforços através do coeficiente de impacto, ainda é necessário avaliar a geração dos ciclos de tensão adicionais. Esses ciclos de amplitudes menores podem contribuir para o dano acumulado na estrutura. No entanto, estudos feitos por SCHILLING (1984 *apud* MADDAH, 2013) concluíram que os ciclos parasitas só são significativos na análise de fadiga para vãos com comprimento inferiores a 12m, no caso de pontes com um único vão. Considerando a faixa de comprimento de vãos analisadas, neste trabalho, será considerado que cada veículo produz somente um ciclo de tensão, independente do comprimento do vão.

### 3.2. Coeficiente de Impacto da Norma Brasileira Atual

No Brasil, não existe uma norma que formule o coeficiente de impacto de forma diferenciada para pontes mistas e de aço. A NBR 7187 (2003) é a que apresenta esse coeficiente para pontes de concreto armado e protendido. Assim, devido à falta de um coeficiente de majoração para cargas dinâmicas em pontes em aço, o coeficiente apresentado nessa norma é usado indiscriminadamente.

A NBR 7187 (2003), como já citado anteriormente, ignora a gama de fatores que influenciam a resposta dinâmica da ponte a passagem de veículos e apresenta o coeficiente de impacto variando somente conforme o vão da ponte, através da fórmula apresentada a seguir.

$$\varphi = 1,4 - 0,007 \times L \quad (3.1)$$

onde L é o comprimento, em metros, de cada vão teórico da ponte.

O coeficiente de impacto deve ser sempre maior que 1 e é utilizado para majoração das cargas dos veículos e das cargas distribuídas. Esse coeficiente decresce linearmente com o aumento do vão e é igual a unidade para um vão de 57m. Portanto, vãos maiores que 57m não sofrem majoração das cargas devido ao efeito dinâmico.

### **3.3. Proposta de Mudança do Coeficiente de Impacto da Norma Brasileira**

Diversos estudos têm sido feitos com o intuito de aprimorar a norma brasileira de pontes e garantir a segurança das obras de arte especiais no Brasil. TIMERMAN e BEIER (2012) apresentaram um trabalho sobre a proposta de revisão da ABNT NBR 7188 (2003) e como principais razões para a revisão estavam o aumento da densidade do tráfego nas rodovias, a magnitude do peso dos veículos que circulam pelas estradas e a presença de anomalias nos pavimentos das pontes em uso, o que acentua o efeito dinâmico da passagem dos veículos.

Uma das propostas apresentadas é a de modificação do coeficiente de impacto. O novo coeficiente de impacto seria composto por três parcelas e consideraria a majoração dos esforços verticais nas regiões próximas às extremidades das pontes e juntas estruturais, diferenciando as pontes em concreto das pontes em aço, além de prever um coeficiente para consideração de mais de uma pista carregada. O coeficiente parcial para majoração dos esforços na região das juntas é similar ao coeficiente adicional de amplificação dos esforços dinâmicos proposto pelo Eurocódigo (EN1991-2, 2002).

A carga móvel concentrada a ser aplicada para verificação da ponte (Q) deverá ser igual aos valores característicos das cargas concentradas representativas do veículo tipo (P) majoradas pelos Coeficientes de Impacto Vertical (CIV), do Número de Faixas (CNF) e do Impacto Adicional (CIA).

$$Q = P \times CIV \times CNF \times CIA \quad (3.2)$$

#### **3.3.1. Coeficiente de Impacto Vertical**

O Coeficiente de Impacto Vertical (CIV) deve ser utilizado na majoração das cargas móveis verticais e deve ser considerado no dimensionamento de todos os elementos estruturais. Esse coeficiente é definido da seguinte forma:

$$CIV = \begin{cases} 1,35, & \text{Para estruturas com vão} < 10m \\ 1 + 1,06 \times \left(\frac{20}{Liv+50}\right), & \text{Para estruturas com vão entre } 10m \text{ e } 200m \end{cases} \quad (3.3)$$

onde *Liv* é o vão em metros para o cálculo do CIV, que varia conforme o tipo de estrutura.

$$Liv = \begin{cases} L, & \text{Para estruturas de vão isostático} \\ \text{Média aritmética dos vãos,} & \text{Para estruturas de vãos contínuos} \\ \text{Comprimento do balanço,} & \text{Para estruturas em balanço} \end{cases} \quad (3.4)$$

onde *L* é o comprimento do vão em metros.

Para estruturas com vãos superiores a 200m, deverá ser realizado um estudo específico para definição do CIV.

### 3.3.2. Coeficiente do Número de Faixas

O coeficiente do Número de Faixas (CNF) ajusta as cargas móveis verticais características conforme o número de faixas carregadas do tabuleiro da ponte e não é utilizado para majoração das cargas no dimensionamento de elementos transversais ao sentido do tráfego. Esse coeficiente é definido da seguinte forma:

$$CNF = 1 - 0,05 \times (n - 2) > 0,9 \quad (3.5)$$

onde *n* é o número de faixas de tráfego rodoviário a serem carregadas sobre o tabuleiro transversalmente contínuo. Os acostamentos e faixas de segurança não são considerados faixas de tráfego.

### 3.3.3. Coeficiente de Impacto Adicional

A implementação do Coeficiente de Impacto Adicional (CIA) é a modificação mais importante no coeficiente de impacto da norma brasileira. A consideração desse fator já é feita na norma europeia e britânica. Esse coeficiente tem como objetivo considerar o aumento dos efeitos dinâmicos provocados por ressaltos nas extremidades das pontes ou próximos às juntas estruturais. As seções afastadas menos de 5m desses locais deverão ser dimensionadas levando em consideração o CIA.

$$CIA = \begin{cases} 1,25, & \text{Para obras em concreto ou mistas} \\ 1,15, & \text{Para obras em aço} \end{cases} \quad (3.6)$$

### 3.3.4. Comparação entre o Coeficiente de Impacto Atual e a Nova Proposta

Neste trabalho será feita a análise do impacto do coeficiente de majoração para cargas dinâmicas na calibração dos modelos de cargas móveis para verificação de fadiga. Esses modelos já consideram a majoração dos efeitos pelo coeficiente de impacto e, portanto, esses coeficientes devem ser definidos antes da calibração dos modelos.

Para o cálculo dos coeficientes de impacto, serão estudadas pontes com longarinas de aço e tabuleiro em concreto armado, ou seja, pontes mistas, com vãos que variam de 10m a 40m.

No cálculo dos coeficientes de impacto pela nova proposta, será considerado que a ponte possui somente duas faixas de tráfego, o que resulta em um CNF igual a um para todos os vãos considerados. O CIA será considerado somente para a análise das pontes com vão igual a 10m, já que a seção crítica de cálculo é aquela do meio do vão, e neste caso se encontra a 5m da extremidade da ponte.

A Figura 3.2 apresenta uma comparação entre os coeficientes de impacto calculados pela atual NBR 7187 (2003) e pela proposta de revisão desta norma.

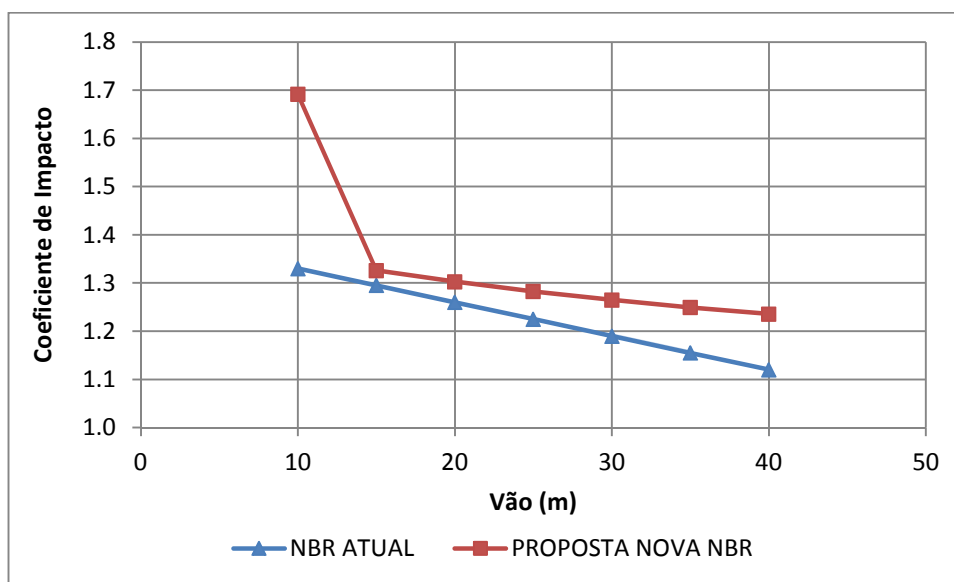


Figura 3.2 – Comparação entre o coeficiente de impacto calculado pela NBR 7187(2003) e pela proposta de revisão da norma

### 3.4. Simulação da Interação Veículo-Pavimento-Estrutura

A norma de projeto de pontes brasileira, mesmo com a possível modernização do coeficiente de impacto apresentada no item 3.3, ainda não conseguiria abranger grande parte dos diversos fatores que influenciam na amplitude dos efeitos dinâmicos resultantes da passagem dos veículos pela ponte.

As normas de projeto mais modernas (Eurocódigo 1 e AASHTO) prescrevem modelos de cargas móveis nos quais já se encontram incluídos os efeitos das ações dinâmicas. No caso do Eurocódigo, os valores adotados para os coeficientes de impacto resultaram de simulações numéricas da passagem de veículos sobre estruturas considerando a interação dinâmica veículo-pavimento-estrutura, sendo o pavimento de boa ou média qualidade e com a presença de ressaltos de 30mm de altura (SANPAOLESI e CROCE, 2005). A Figura 3.3 apresenta os coeficientes de impacto utilizados no desenvolvimento dos modelos de carga do Eurocódigo 1 (2002).

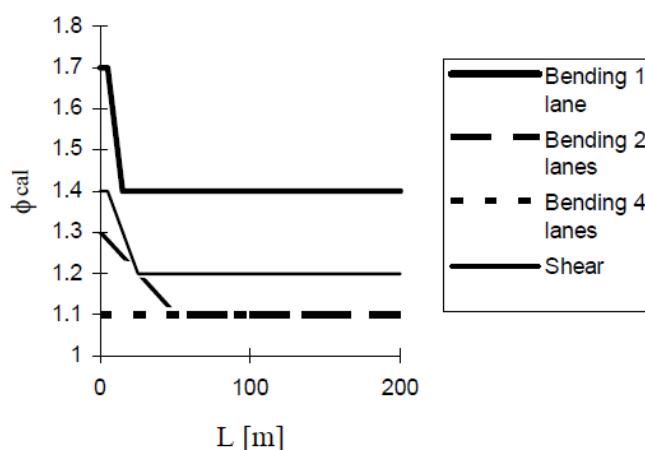


Figura 3.3 – Impacto adotado no desenvolvimento dos modelos de carga do Eurocódigo 1 (2002) (SANPAOLESI e CROCE, 2005)

Com o objetivo de contribuir para a elaboração de modelos de cargas móveis no Brasil mais representativos do tráfego real, MELO (2007) e MENDONÇA (2009) desenvolveram uma modelagem analítico-numérica da interação dinâmica entre veículo-pavimento-estrutura. A estrutura da ponte foi representada por um modelo unifilar de barras, com propriedades de rigidez a flexão vertical e torção, e o veículo representado por um sistema plano de massas e molas associadas com 5 graus de liberdade. O perfil longitudinal do pavimento foi obtido por geração aleatória a partir de uma função de espectro de irregularidades.

O estudo foi dirigido a pontes de concreto armado em grelha, de duas vigas principais, com vãos de comprimento entre 10m e 30m. Foi elaborado, então, um



estudo paramétrico para avaliar a variação do fator de amplificação dinâmica (FAD), revelando a importância de cada parâmetro envolvido na análise dinâmica, tais como qualidade do pavimento, presença de ressalto na cabeceira, peso e velocidade dos veículos e frequências naturais do veículo e da estrutura.

A Figura 3.4 apresenta um exemplo do estudo paramétrico realizado para uma ponte com vão de 30m, relacionando o FAD com a qualidade do pavimento e a relação entre as frequências naturais do veículo e da estrutura ( $f_v/f_e$ ). Os resultados da análise paramétrica são então comparados com o valor do coeficiente de impacto prescrito pela norma NBR 7187 (2003) ( $\varphi(30)$ ).

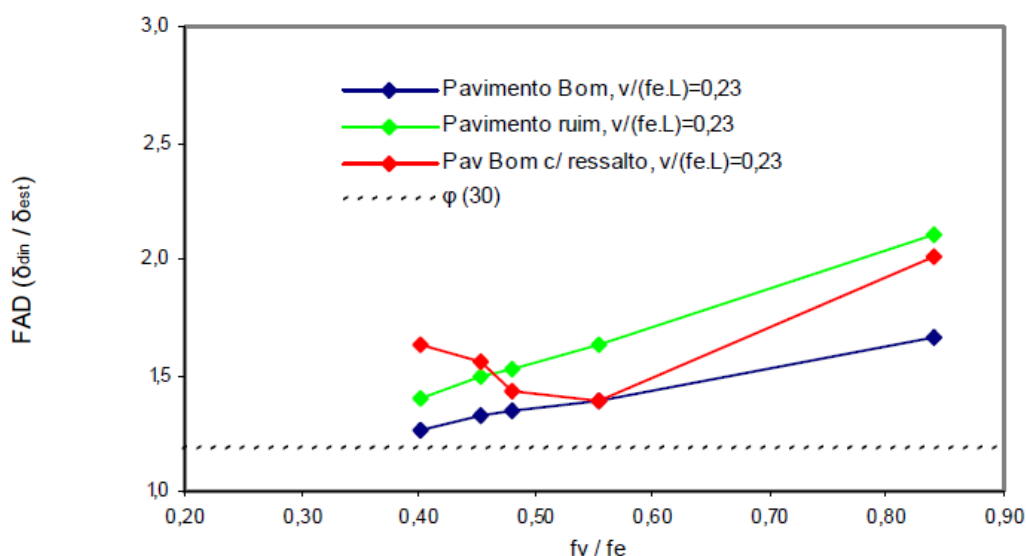


Figura 3.4 – Efeito da qualidade do pavimento e da relação entre as frequências naturais no FAD, para ponte com vão de 30m (PFEIL et al., 2007)

O estudo concluiu que os parâmetros mais influentes no FAD são a presença de ressalto na pista e a razão entre as frequências naturais do veículo e da estrutura. Verificou-se também que os valores de FAD podem ser muito superiores àqueles fornecidos pela expressão da norma brasileira (PFEIL et al., 2007).

Neste trabalho, ainda não serão considerados os resultados obtidos no estudo paramétrico da interação veículo-pavimento-estrutura para o desenvolvimento de um modelo de cargas móveis para rodovias brasileiras. No entanto, a consideração dos diversos parâmetros que interferem na resposta dinâmica da estrutura é de extrema importância para o desenvolvimento de modelos de carga mais compatíveis com o tráfego de veículos atual.

## 4. A ANÁLISE DE FADIGA SEGUNDO ÀS NORMAS DE PROJETO

No Brasil, não existe uma norma específica para o projeto de pontes em aço ou mistas. Dessa forma, quando se pretende dimensionar pontes com essas características, para estradas brasileiras, deve-se recorrer às normas estrangeiras.

Entre as normas estrangeiras mais modernas utilizadas no dimensionamento de pontes, estão a norma americana, a AASTHO *LRFD Bridge Design Specifications* (2007) e a norma europeia, o Eurocódigo 1 e o Eurocódigo 3. Outra norma importante é a norma Britânica, BS 5400 (1980).

### 4.1. Modelos para Verificação da Resistência à Fadiga

Os métodos presentes na literatura e adotados nas normas de projeto podem ser classificados em três níveis conforme o grau de complexidade da análise e dos modelos de carga a serem aplicados.

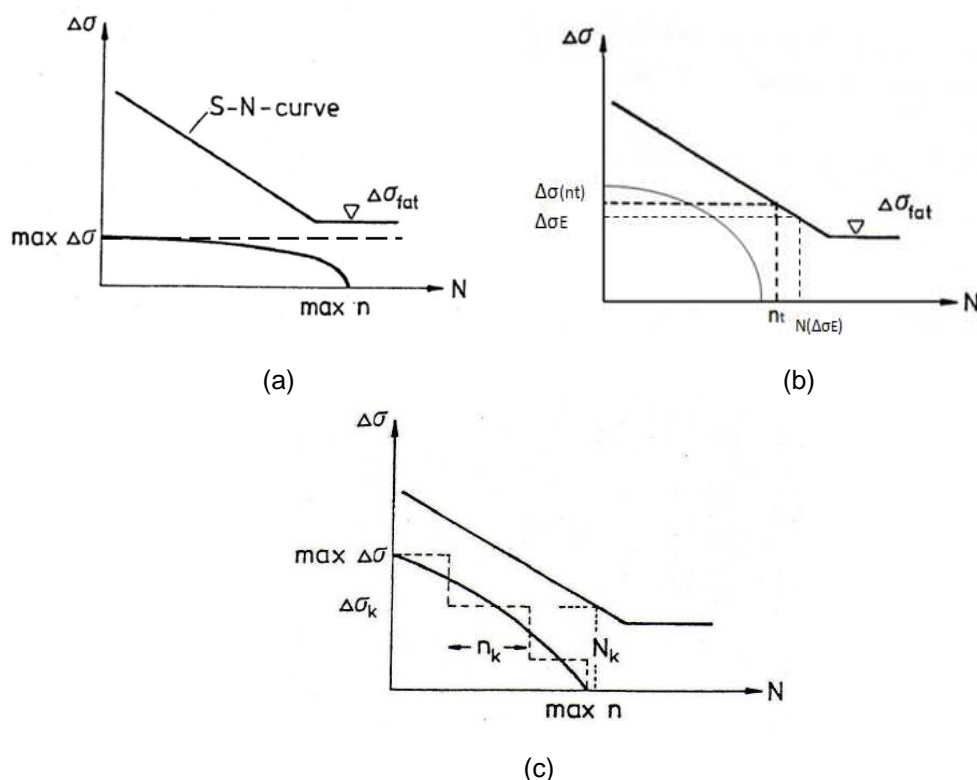


Figura 4.1 – Ilustração dos três níveis de verificação de fadiga. (a) Nível 1, (b) Nível 2, (c) Nível 3 (adaptado de CEB, 1987)

- Nível 1

O primeiro nível de verificação consiste em um método simplificado de análise de fadiga e permite somente determinar se a vida útil de fadiga do componente estrutural é muito superior à requerida em projeto ou não. Essa análise compara a

máxima variação de tensões ( $\Delta\sigma_{max}$ ) do espectro de tensões ao limite de fadiga para amplitude de tensão constante ( $\Delta\sigma_D$ ), como mostrado na Figura 4.1a. Caso  $\Delta\sigma_{max}$  seja inferior a  $\Delta\sigma_D$ , a resistência à fadiga está garantida. A variação de tensão correspondente ao limite de fadiga é obtida pelas curvas S-N em função do detalhe analisado:

$$\Delta\sigma_{max} < \Delta\sigma_D \quad (4.1)$$

Para o cálculo de  $\Delta\sigma_{max}$ , utiliza-se um modelo de carga móvel equivalente ao tráfego de veículos reais em termos de máxima variação de tensões. A definição da máxima variação de tensão ( $\Delta\sigma_{max}$ ) provocada pelo espectro de veículos reais não é trivial. Para ser significativa à análise de fadiga, a máxima variação de tensão deve ser excedida diversas vezes durante a vida útil da ponte.

SANPAOLESI e CROCE (2005) propuseram em seu estudo duas aproximações diferentes para o cálculo da variação máxima de tensão que, entretanto, fornecem resultados similares:

- a)  $\Delta\sigma_{max}$  é definida de tal modo que 99% do dano total resultam de toda a variação de tensão abaixo de  $\Delta\sigma_{max}$ ;
- b)  $\Delta\sigma_{max}$  é a variação de tensão excedida  $5 \times 10^4$  vezes durante a vida útil da estrutura, considerada igual a 100 anos. A última definição implica, para o espectro de tensões utilizado no desenvolvimento dos modelos de carga para verificação de fadiga do Eurocódigo 1, que o período de retorno para  $\Delta\sigma_{max}$  seja aproximadamente metade de um dia.

- Nível 2

O segundo nível de verificação consiste na verificação da vida útil à fadiga utilizando um modelo de cargas móveis com equivalência em termos de dano total produzido pelo tráfego de veículos reais. Ou seja, o trem-tipo definido deve ter a característica de gerar, para uma quantidade de ciclos pré-fixada, o mesmo dano que seria gerado pelo espectro de veículos ao longo da vida útil da estrutura.

- Nível 3

No terceiro nível de verificação, o mais sofisticado e geral de todos, a verificação da resistência à fadiga é feita através do cálculo da vida útil da estrutura

utilizando o espectro de variação de tensão produzido pelo tráfego de veículos reais. A aplicação desse nível de verificação é complexa, pois requer um tratamento adequado dos dados de variação de tensão e uma escolha criteriosa daqueles pertinentes ao estudo.

As variações de tensões obtidas com a passagem dos veículos devem ser organizadas sob a forma de um espectro de tensões. Para cada amplitude de tensão, um número de ciclos que leva a ruptura por fadiga sob variação de tensão constante ( $N$ ) é obtido através das curvas S-N. O dano causado por cada amplitude tensão é computado dividindo-se o número de ciclos correspondente a cada amplitude ( $n$ ) pelo número de ciclos até a ruptura ( $N$ ). Os danos são então somados, e segundo a regra de Palmgren-Miner, essa soma deve ser inferior a um para que a resistência à fadiga seja garantida durante a vida útil estipulada.

## 4.2. Normalização Brasileira

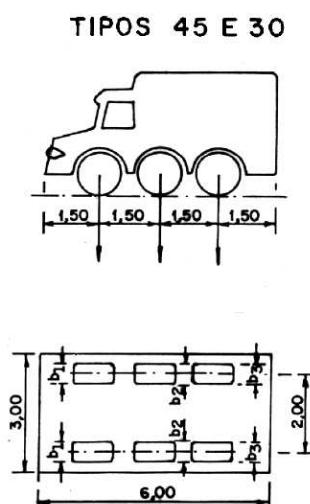
A normalização brasileira que trata do fenômeno da fadiga é constituída das normas NBR8800 e NBR6118, no entanto, nenhuma delas é voltada para pontes.

A norma NBR8800 (2008) trata do projeto de estruturas de aço e mistas em edifícios e no seu anexo K aborda a análise de fadiga nessas estruturas, apresentando as curvas S-N pertinentes aos detalhes soldados típicos. São curvas S-N do tipo da apresentada na Figura 2.4.

Já a norma NBR6118 (2007) trata do projeto de estruturas de concreto e aborda no seu capítulo 23 a análise de fadiga, no entanto, fornece poucas indicações para esta análise em pontes de concreto. De acordo com a norma NBR6118 (2007), a verificação da resistência à fadiga em elementos de concreto armado é realizada comparando-se a máxima variação de tensão, no concreto ou no aço, a uma tensão limite de fadiga (equação 4.1). A máxima variação de tensão é calculada considerando o valor frequente de ações de carga móvel, definida como o carregamento normativo (trem-tipo indicado na NBR7188 (1984) – ver a Figura 4.2) definido para o Estado Limite Último, multiplicado pelo fator 0,5, no caso da verificação de vigas principais longitudinais de pontes rodoviárias. Para a verificação de fadiga em transversinas, esse fator é igual a 0,7, enquanto para lajes de tabuleiro, o fator é igual a 0,8. As curvas S-N apresentadas na NBR6118 (2007) para o aço são do tipo daquelas apresentadas na Figura 4.8. Para armadura passiva, em ambiente não agressivo, as inclinações  $m$  para o primeiro e segundo trecho das curvas S-N são respectivamente iguais a 5 e 9, já o limite de fadiga  $\Delta\sigma_{fad}$  é definido de acordo com o tipo de barra e a bitola.

A norma NBR7188 (1984) – Cargas móveis em ponte rodoviárias e passarelas de pedestre - é a norma que apresenta a carga móvel a ser utilizada para o dimensionamento de pontes rodoviárias e passarelas de pedestres e foi elaborada com base na norma alemã DIN 1072. A norma brasileira divide as pontes rodoviárias em três classes, denominadas segundo o peso total do trem-tipo a ser utilizado, em toneladas: classe 45, classe 30, classe 12. Para pontes que recebem frequentemente o tráfego de veículos pesados, como o caso daquelas localizadas em rodovias brasileiras, o dimensionamento deve ser feito considerando-se o trem-tipo de 450kN de peso total, também conhecido como TB-45.

A configuração do trem-tipo utilizado para dimensionamento das pontes classe 45 e 30 é a de três eixos espaçados de 1,50m entre si, com espaçamento transversal de 2,0m entre os eixos das rodas, possuindo dimensões de 6m de comprimento por 3m de largura. O peso total do veículo-tipo deve ser distribuído igualmente pelas 6 rodas.



*Figura 4.2 – Trem-tipo da norma brasileira NBR7188 (1982) para classes 45 e 30*

Além das cargas concentradas que constituem o trem-tipo, também devem ser consideradas no projeto cargas distribuídas sobre toda a ponte, exceto na área ocupada pela carga móvel. Para a classe 45, essas cargas distribuídas são iguais a 5kN/m<sup>2</sup> sobre a pista de rolamento e 3kN/m<sup>2</sup> nos passeios.

### **4.3. Proposta de Atualização do Modelo de Cargas Móveis da NBR7188**

ROSSIGALI (2013), em seu trabalho, propõe um novo modelo de cargas móveis para projeto de pontes em situações de E.L.U. após um extenso estudo que incluiu:

- Montagem de uma base de dados de tráfego em rodovias brasileiras;
- Cálculo estático de esforços críticos em pontes típicas da malha rodoviária brasileira com vãos entre 10 e 40m;
- Extrapolação destes esforços para 100 anos de recorrência;
- Análise dinâmica da interação veículo-pavimento-estrutura;
- Cálculo dos valores alvo dos esforços críticos já incluindo o efeito dinâmico;
- Determinação do modelo de cargas móveis.

A Figura 4.3 ilustra um dos novos modelos propostos que será usado no presente trabalho.

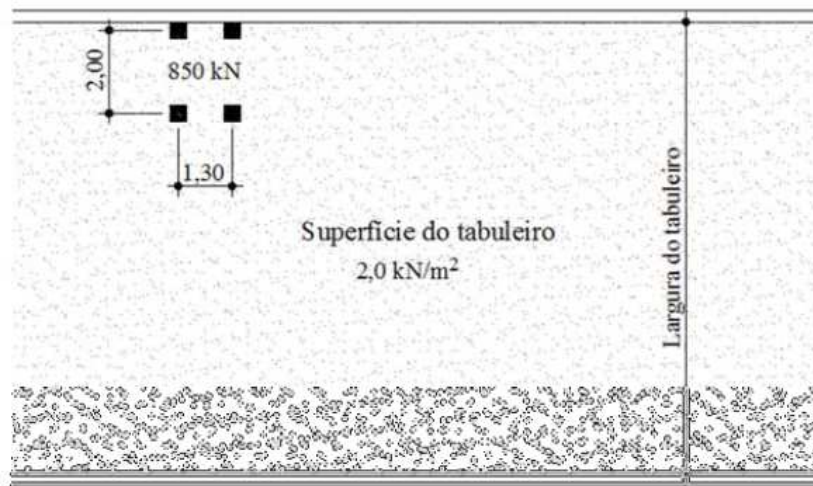


Figura 4.3 – Modelo de cargas móveis proposto por ROSSIGALI (2013), dimensões em m

#### 4.4. Norma Europeia – Eurocódigo

##### 4.4.1. Princípios Gerais

O Eurocódigo é uma das normas atuais mais completas para verificação da resistência à fadiga em pontes. Ele fornece instrumentos para verificação da fadiga utilizando modelos de carga recomendados, além de prever uma verificação baseada no cálculo da vida útil para um histórico de amplitudes de tensões variáveis.

As recomendações para a verificação de fadiga em pontes estão presentes no Eurocódigo 1 e 3. O Eurocódigo 3 é a norma europeia de projeto de estruturas de aço em geral. Na sua Parte 1-9, trata da avaliação da resistência à fadiga em todos os tipos de estruturas de aço. Na sua Parte 2, trata especificamente do projeto de pontes

em aço, apresentando as verificações necessárias para avaliação da segurança em relação à fadiga nessas estruturas. Os modelos de carga indicados para verificação do Estado Limite de Fadiga são dados pelo Eurocódigo 1 - Parte 2, que trata das ações do tráfego nas pontes.

Segundo o Eurocódigo 3, a verificação da fadiga deverá ser realizada utilizando-se um dos seguintes conceitos: método do dano controlado (níveis 2 ou 3) ou método do tempo de vida garantido (nível 1). O método do dano controlado assegura que a estrutura terá comportamento satisfatório durante a sua vida útil, desde que seja realizado nesse período um programa de manutenção. Já pelo método do tempo de vida garantido, o comportamento satisfatório da estrutura é garantido durante toda sua vida útil sem a necessidade de inspeções regulares. O coeficiente de segurança é então ajustado considerando-se o método de verificação escolhido e as consequências da ruptura da estrutura. As verificações são baseadas em uma vida útil de 100 anos e são feitas relacionando-se os efeitos das ações e as resistências à fadiga.

#### **4.4.2. Modelos de Carga do Eurocódigo 1 e Métodos de Verificação**

O Eurocódigo 1 – Parte 2 (2002) prevê 5 modelos de cargas para verificação de fadiga. Os modelos de carga 1 (FLM1) e 2 (FLM2) devem ser utilizados com o intuito de verificar se a vida útil de fadiga é muito superior à requerida em projeto (Nível 1), já para os modelos de carga 3 (FLM3) e 4 (FLM4), a resistência à fadiga é verificada através das curvas de resistência à fadiga (Nível 2). O Eurocódigo 3 – Parte 1 fornece ainda, no seu anexo A, as diretrizes para verificação da resistência à fadiga através da avaliação da vida útil da estrutura utilizando-se um espectro de veículos reais (Nível 3), definido pelo projetista.

Como referência, o número de veículos pesados que circulam por ano na faixa lenta é sugerido pela norma conforme apresentado na Tabela 4.1. A norma também define que os efeitos da fadiga devem ser verificados considerando os modelos de carga centralizados nas faixas de tráfego.

Tabela 4.1 – Indicação do número de veículos pesado por ano e por faixa lenta (adaptado de EN1991-2, 2002)

Categoria de tráfego		$N_{obs}$ por ano e por faixa lenta
1	Estradas e auto-estradas com 2 ou mais faixas por direção, com alto fluxo de caminhões	$2,0 \times 10^6$
2	Estradas e auto-estradas com baixo fluxo de caminhões média	$0,5 \times 10^6$
3	Estradas principais com baixo fluxo de caminhões	$0,125 \times 10^6$
4	Estradas locais com baixo fluxo de caminhões	$0,05 \times 10^6$

#### 4.4.2.1. FLM1

O modelo de cargas de fadiga 1 (FLM1) é bastante simples e a favor da segurança, usado na verificação da vida útil de fadiga muito superior à requerida em projeto. Esse modelo de cargas foi desenvolvido a partir da equivalência em termos de variação de tensão máxima produzida por um espectro de veículos reais e, portanto, deve ser utilizado para a verificação de nível 1.

Esse modelo de cargas é derivado do modelo de cargas 1 para verificação do Estado Limite Último (LM1), com uma redução das cargas. As cargas concentradas devem ser reduzidas de um fator igual 0,7 e as cargas uniformemente distribuídas devem ser multiplicadas por 0,3. A configuração do FLM1 e as cargas a serem consideradas são apresentadas na Figura 4.4.

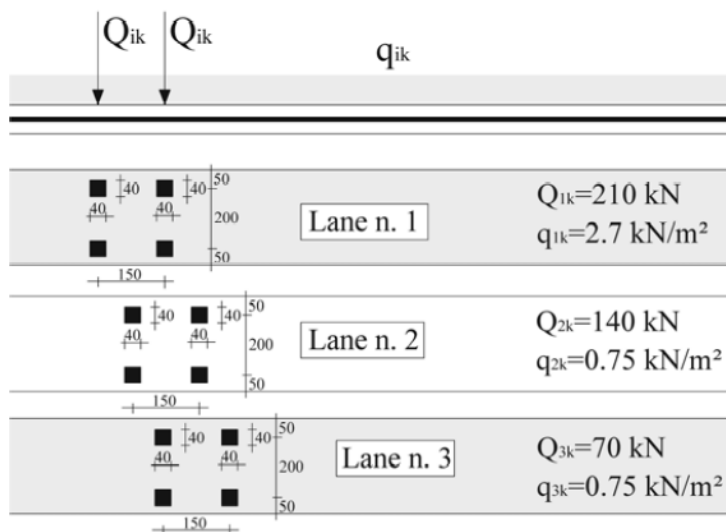


Figura 4.4 – Modelo de cargas de fadiga 1 (FLM1) (adaptado de EN1991-2, 2002)



#### 4.4.2.2. FLM2

O modelo de cargas 2 (FLM2) também é utilizado para verificação de fadiga segundo o nível 1 de verificação, no entanto é mais sofisticado e preciso que o FLM1. Este modelo consiste de um conjunto de veículos idealizados, que são denominados veículos “frequentés”. As características destes veículos são apresentadas na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3.

A máxima variação de tensão é determinada pela maior sollicitação causada pela passagem do conjunto de veículos “frequentés” pela ponte. Os veículos devem passar pela ponte de forma isolada e sobre a faixa apropriada.

Tabela 4.2 – Características do veículos frequentés do FLM2 do Eurocódigo (EN1991-2, 2002)



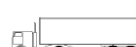
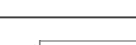
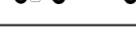
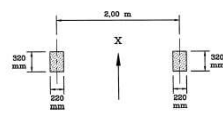
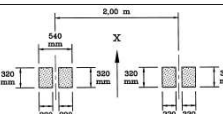
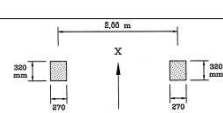
1 LORRY SILHOUETTE	2 Axle spacing (m)	3 Frequent axle loads (kN)	4 Wheel type (see Table 4.8)
	4,5	90 190	A B
	4,20 1,30	80 140 140	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	90 180 120 120 120	A B C C C
	3,40 6,00 1,80	90 190 140 140	A B B B
	4,80 3,60 4,40 1,30	90 180 120 110 110	A B C C C

Tabela 4.3 – Configuração dos eixos dos veículos-padrão do FLM2 e FML4 do Eurocódigo (EN1991-2, 2002)

WHEEL/ AXLE TYPE	GEOMETRICAL DEFINITION
A	
B	
C	

#### 4.4.2.3. FLM3

O modelo de cargas 3 (FLM3) é um modelo simplificado para verificação direta da resistência à fadiga e deve ser empregado na verificação de nível 2. Segundo SANPAOLESI e CROCE (2005), este modelo de cargas foi concebido através da aplicação do conceito de dano equivalente a um espectro de tensões real, calculadas a partir de dados do tráfego de rodovias europeias.

Para o FLM3, a verificação da resistência à fadiga é feita pelo método do coeficiente  $\lambda$ , onde a variação de tensão provocada pela passagem da carga móvel é ajustada por fatores  $\lambda_i$  que dependem das propriedades geométricas da ponte e do tráfego de veículos. Os fatores  $\lambda_i$  também apresentam valores diferenciados para pontes em aço e em concreto.

O modelo de cargas desenvolvido para esta análise teve como propósito selecionar um único veículo-tipo que, assumindo um número total de ciclos igual a dois milhões por ano e após adaptações numéricas proporcionadas pelo coeficiente  $\lambda$ , se chegasse ao mesmo dano gerado pelo espectro de veículos reais. A variação de tensão equivalente ao dano provocado pelo tráfego real é definida da seguinte forma:

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda \Delta\sigma_p \quad (4.2)$$

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \leq \lambda_{max} \quad (4.3)$$

onde,

$\Delta\sigma_{E2}$  é a tensão equivalente relacionada aos 2 milhões de ciclos por ano;

$\Delta\sigma_p$  é a variação de tensão produzida pela passagem do veículo tipo;

$\lambda_1$  é o fator que diz respeito ao comprimento da linha de influência;

$\lambda_2$  é o fator que diz respeito ao volume de tráfego que circulará pela ponte durante sua vida útil;

$\lambda_3$  é o fator que leva em consideração o tempo de vida útil da ponte;

$\lambda_4$  é o fator que permite considerar o tráfego simultâneo de veículos na via;

$\lambda_{max}$  é o valor limite do fator  $\lambda$  e é dado em função do tipo de ponte e comprimento do vão.

- $\lambda_1$  - obtido através do gráfico apresentado pelo Eurocódigo 3 – Parte 2 (2006) reproduzido na Figura 4.5.
- $\lambda_2$  - obtido através da seguinte fórmula:

$$\lambda_2 = \frac{Q_{m1}}{Q_0} \left( \frac{N_{obs}}{N_0} \right)^{1/5} \quad (4.4)$$

onde:

$Q_{m1}$  é o peso médio, em kN, dos veículos pesados que circulam pela faixa lenta;

$Q_0 = 480kN$ ;

$N_{obs}$  é o número total de veículos pesados que circulam por ano na faixa lenta;

$N_0 = 0,5 \times 10^6$ .

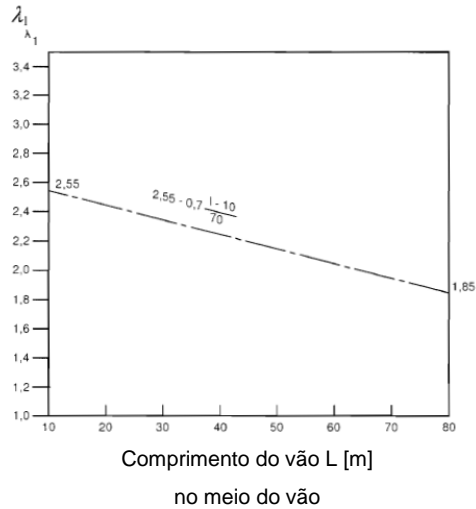


Figura 4.5 – Gráfico para obtenção do fator  $\lambda_1$  para a seção do meio do vão (adaptado de EN1993-2,2006)

- $\lambda_3$  - obtido através da seguinte fórmula:

$$\lambda_3 = \left( \frac{t_{Ld}}{100} \right)^{1/5} \quad (4.5)$$

onde  $t_{Ld}$  é o período de vida útil de fadiga projetado, em anos.

- $\lambda_4$  – calculado da seguinte forma:

$$\lambda_4 = \left[ 1 + \frac{N_2}{N_1} \left( \frac{\eta_2 Q_{m2}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 + \dots + \frac{N_k}{N_1} \left( \frac{\eta_k Q_{mk}}{\eta_1 Q_{m1}} \right)^5 \right]^{1/5} \quad (4.6)$$

onde:

$k$  é o número de faixas com permissão de tráfego de veículos pesados;

$N_j$  é o número de veículos pesados que circulam por ano pela faixa  $j$ ;

$Q_{mj}$  é o peso bruto médio dos veículos pesados que circulam pela faixa  $j$ ;

$\eta_j$  é o valor da linha de influencia para as forças internas que produzem tensão no centro da faixa  $j$ .

- $\lambda_{max}$  - obtido através do gráfico apresentado pelo Eurocódigo 3 – Parte 2 (2006) reproduzido na Figura 4.6.

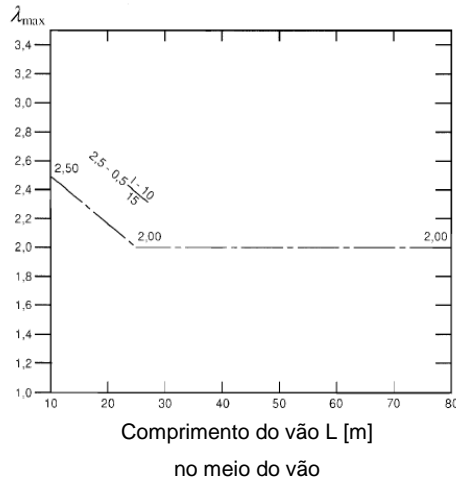


Figura 4.6 – Gráfico para obtenção do fator  $\lambda_{max}$  para a seção do meio do vão (adaptado de EN1993-2, 2006)

Fazendo uso dos coeficientes de segurança pertinentes, essa tensão equivalente é então comparada à variação de tensão que caracteriza a categoria do detalhe analisado ( $\Delta\sigma_C$ ).

$$\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_{E2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \quad (4.7)$$

onde,

$\gamma_{Ff}$  e  $\gamma_{Mf}$  são fatores parciais de segurança;

$\Delta\sigma_C$  é a variação de tensão correspondente aos 2 milhões de ciclos.

O FLM3 é constituído por um único veículo, de quatro eixos, cada um com 120kN. A Figura 4.7 apresenta a configuração deste veículo. Nos casos aplicáveis, um segundo veículo deve ser colocado simultaneamente sobre a ponte para o cálculo da variação de tensão. Nesse caso, o segundo veículo terá a mesma configuração do primeiro, com 36kN em cada eixo, e a distância entre eixos dos veículos não deverá ser inferior a 40m.

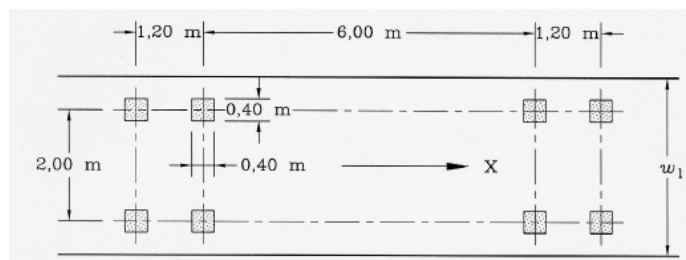


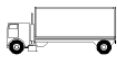




Figura 4.7 – Configuração do veículo-padrão do FLM3 do Eurocódigo (EN1991-2, 2002)

#### 4.4.2.4. FLM4

O modelo de carga 4 (FLM4) é baseado em cinco veículos padrão, os quais simulam o tráfego que deve produzir um dano equivalente ao gerado pelo tráfego de veículos reais. As frequências dos cinco veículos padrão são ajustadas de forma a reproduzir o tráfego real. As características e frequências dos veículos padrão são indicadas pelo Eurocódigo 1 segundo a Tabela 4.4.

Por ter sido desenvolvido através do conceito de dano equivalente, a análise de fadiga através da utilização desse modelo de cargas é considerada uma verificação da resistência à fadiga de nível 2. Para isso, os danos resultantes do espectro de veículos simulado pelo Eurocódigo devem ser acumulados através da regra de Palmgren-Miner e a vida útil calculada.

Tabela 4.4 – Configuração e frequências dos veículos-padrão do FLM4 do Eurocódigo (EN1991-2, 2002)

VEHICLE TYPE			TRAFFIC TYPE			
1	2	3	4	5	6	7
	Axle spacing (m)	Equivalent axle loads (kN)	Long distance Lorry percentage	Medium distance Lorry percentage	Local traffic Lorry percentage	Wheel type
	4,5	70	20,0	40,0	80,0	A
		130				B
	4,20 1,30	70	5,0	10,0	5,0	A
		120 120				B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	70	50,0	30,0	5,0	A
		150				B
		90				C
		90 90				C C
	3,40 6,00 1,80	70	15,0	15,0	5,0	A
		140				B
		90				B
		90				B
	4,80 3,60 4,40 1,30	70	10,0	5,0	5,0	A
		130				B
		90				C
		80				C
		80				C

#### 4.4.3. Curvas de Resistência à Fadiga e Categorias de Detalhes

As curvas S-N para tensão normal, propostas pelo Eurocódigo, apresentam duas inclinações e um limite de *cut-off* ( $\Delta\sigma_L$ ) definido aos  $10^8$  ciclos, conforme ilustra a Figura 4.8. Estas são mais precisas do que as de uma inclinação e foram desenvolvidas de forma a considerar a diminuição da taxa de crescimento das fissuras para ciclos de tensões mais baixas. A mudança de inclinação da curva ocorre aos 5 milhões de ciclos, no limite de fadiga para amplitude constante (CAFL -  $\Delta\sigma_D$ ). Acima

desse limite, as curvas S-N possuem inclinação  $m=3$ , entre  $\Delta\sigma_D$  e o limite de *cut-off*, a inclinação das curvas é  $m=5$ .

Quando uma variação de tensão de amplitude constante ou todas as variações de tensão de um espectro de tensões são menores que o limite de fadiga para amplitude constante, em um detalhe específico, a verificação da resistência à fadiga não é necessária neste detalhe. No entanto, no caso de um espectro de tensões, se ao menos um ciclo exceder esse limite, todos os demais ciclos deverão ser considerados na avaliação da fadiga (ECCS, 1985), exceto aqueles abaixo do limite de *cut-off*, os quais devem ser descartados.

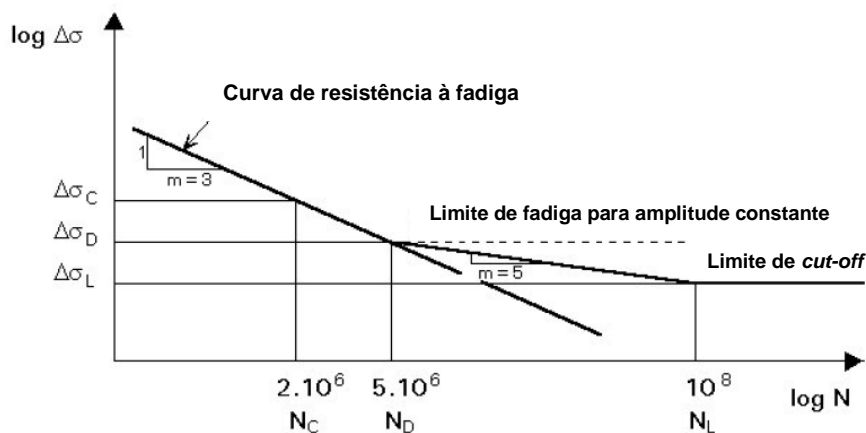


Figura 4.8 – Exemplo de Curva S-N com duas inclinações (adaptado de ESDEP, 2000)

Com relação ao uso de um limiar de não ocorrência de fadiga, uma crítica é feita pela norma inglesa, BS5400-10 (1980), em seu anexo A.2. Em seu texto, a norma explica que condições ambientais e possíveis defeitos iniciais alteram os limites de fadiga inicialmente propostos pelas curvas S-N. Além disso, conforme os ciclos de tensões maiores aumentam os danos no material, ciclos de menores amplitudes, possivelmente abaixo do limite de *cut-off*, podem contribuir com a propagação das fissuras. Com isso, de forma a ser mais conservadora, a norma britânica propõe o uso de curvas S-N sem a consideração do limite de *cut-off*.

O limite de fadiga para amplitude constante e o limite de *cut-off* podem ser calculados da seguinte forma:

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \Delta\sigma_C \quad (4.8)$$

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \Delta\sigma_D \quad (4.9)$$

A norma europeia apresenta dez categorias de detalhes construtivos, classificados de acordo com as faixas de tensão resistente de cada elemento estrutural. As categorias de detalhes são identificadas pela variação de tensão, em MPa, correspondente a 2 milhões de ciclos ( $\Delta\sigma_C$  da Figura 4.8). A Figura 4.9 ilustra alguns detalhes típicos referentes a soldas longitudinais.

A Figura 4.10 ilustra as curvas S-N para tensão normal apresentadas no Eurocódigo 3 – Parte 1-9 (2005).

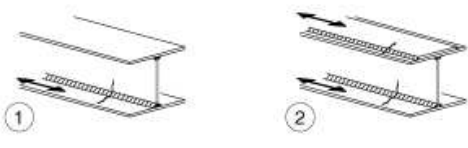
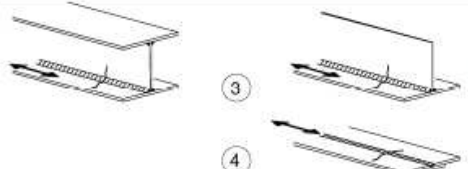
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
125		<u>Soldaduras longitudinais contínuas:</u> 1) Soldadura automática ou totalmente mecânica de topo executada em ambos os lados. 2) Soldadura automática ou totalmente mecânica de ângulo. Extremidades das chapas de recobrimento a verificar de acordo com o pormenor 6) ou 7) do Quadro 8.5.	<u>Pormenores 1) e 2):</u> Não é permitida qualquer paragem/recomeço da soldadura excepto no caso em que a reparação é executada por um especialista e a execução correcta da reparação é controlada por inspeção.
112		3) Soldadura automática ou totalmente mecânica de ângulo ou de topo executada nos dois lados, mas com paragem/recomeço. 4) Soldadura automática ou totalmente mecânica de topo executada apenas num dos lados, com uma contrachapa contínua no lado oposto, sem paragem/recomeço.	4) No caso em que este pormenor apresentar traços de paragem/recomeço utiliza-se a categoria 100.

Figura 4.9 – Algumas categorias de detalhes do Eurocódigo para soldas longitudinais (EN1993-1-9, 2005)

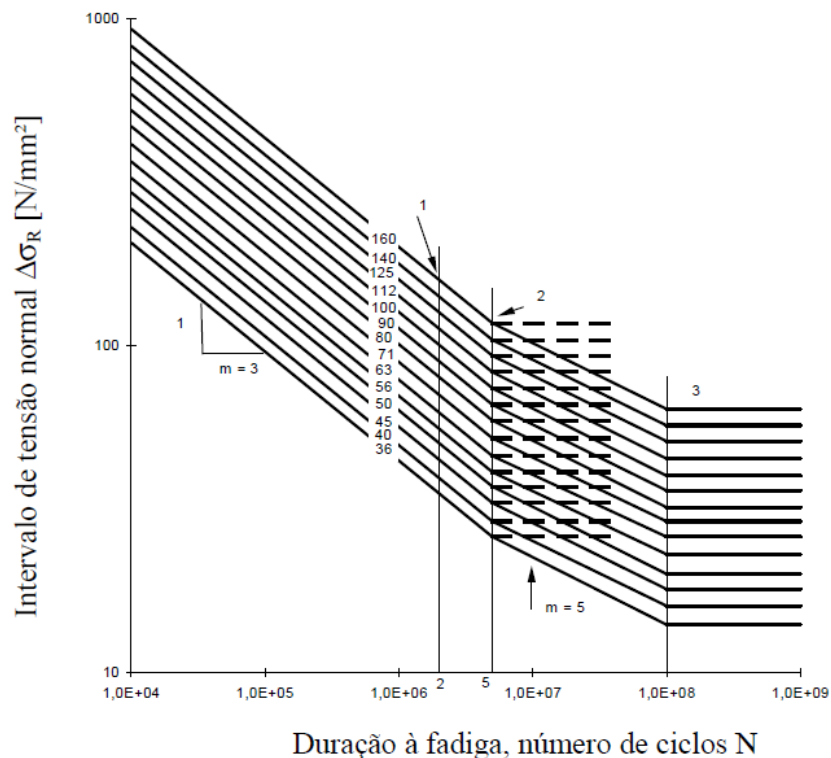


Figura 4.10 – Curvas S-N para tensão normal segundo o Eurocódigo (EN1993-1-9, 2005)

## 4.5. Norma Americana – AASHTO

### 4.5.1. Princípios Gerais

A norma americana que trata especificamente do projeto de pontes é a norma AASHTO (2007). Essa norma é baseada no método dos estados limites e em seu capítulo 6.6 aborda o fenômeno da fadiga em pontes de aço.

Assim como o modelo de cargas FLM3 do Eurocódigo 1 (2002), o modelo de cargas para verificação da resistência à fadiga proposto pela norma AASHTO (2007) foi desenvolvido a partir do conceito de equivalência de dano. Dados coletados de estradas americanas foram utilizados para calibrar o modelo de cargas, considerando-se uma vida útil de 75 anos para a estrutura. Dessa forma, a norma AASHTO (2007) apresenta a verificação da fadiga de acordo com o nível 2 de verificação, comparando a variação de tensão gerada pela passagem do veículo padrão com uma variação de tensão limite.

### 4.5.2. Modelo de Carga Móvel e Número de Ciclos

A verificação do Estado Limite de Fadiga é feita através da variação de tensão gerada pela passagem de um único veículo pela ponte, a qual ainda deve ser afetada por um coeficiente de majoração de cargas dinâmicas. Esse veículo-tipo possui três eixos, com carga total igual a 325kN. A Figura 4.11 apresenta a configuração do modelo de cargas proposto pela AASHTO (2007).

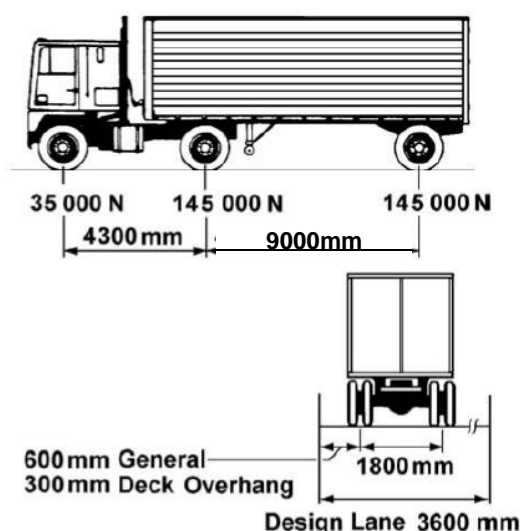


Figura 4.11 – Configuração do modelo de cargas proposto pela AASHTO para verificação da fadiga ( adaptado de AASHTO, 2007)



A frequência de passagem da carga móvel pela ponte é definida pela norma AASHTO (2007) a partir de um volume médio de tráfego diário (ADT) igual a 20000 veículos por dia, por faixa, incluindo veículos leves e pesados. O número de veículos pesados que passam pela ponte, em uma direção, por dia (ADTT) é determinado através da porcentagem de veículos pesado no tráfego, dada pela tabela C3.6.1.4.2-1 da norma.

O volume diário de veículos pesados em uma faixa é dado pela seguinte expressão:

$$ADTT_{SL} = p \times ADTT \quad (4.10)$$

onde p é dado pela tabela 3.6.1.4.2-1 da norma.

O número de ciclos resultante da passagem de um veículo pela ponte é dado pela Tabela 4.5. Essa tabela traduz o aumento no número de ciclos decorrente do efeito dinâmico da passagem dos veículos pelas pontes de pequeno vão.

Para a verificação da resistência à fadiga, o número de ciclos de variação de tensão, resultantes da passagem da carga móvel, a que a estrutura estará sujeita durante sua vida útil deve, portanto, ser calculado pela seguinte expressão:

$$N = 365 \times 75 \times n \times ADTT_{SL} \quad (4.11)$$

Tabela 4.5 – Ciclos por passagem de veículo, n (adaptado de AASHTO,2007)

Membros Longitudinais	Comprimento do Vão	
	> 12000mm	≤ 12000mm
Vigas biapioadas	1.0	2.0
Vigas contínuas		
1) próximo ao apoio interno	1.5	2.0
2) outros locais	1.0	2.0
Vigas em balanço	5.0	
Treliças	1.0	
Membros Transversais	Espaçamento	
	> 6000mm	≤ 6000mm
	1.0	2.0

#### 4.5.3. Curvas de Resistência à Fadiga e Categorias de Detalhes

Na norma AASHTO (2007), as curvas de resistência à fadiga para tensões normais possuem uma única inclinação, igual a m=3. Essas curvas não apresentam

limite de *cut-off* e o limite de resistência a fadiga para amplitude constante (CAFL) varia conforme a categoria do detalhe. Segundo SMITH *et al.* (1989), a norma americana define o CAFL como a variação de tensão correspondente a uma quantidade de ciclos que variam de 2 a 20 milhões. A Figura 4.12 reproduz as curvas S-N propostas pela norma AASHTO (2007).

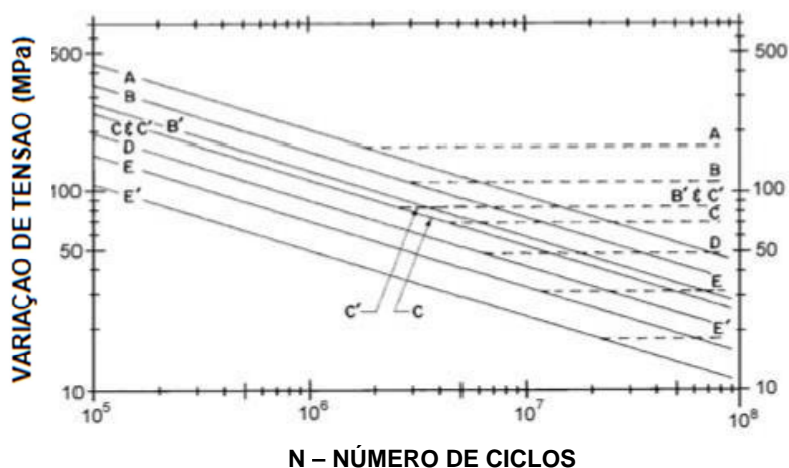


Figura 4.12 – Curvas S-N adotadas pela AASTHO (2007) para tensões normais

Cada uma das curvas S-N representa uma categoria de detalhe. Os detalhes estruturais são classificados em 8 categorias diferentes, nomeadas de A a E' e identificadas por uma constante A. O enquadramento dentro de uma categoria depende da geometria do detalhe, das condições de acabamento e execução e do esforço solicitante. A Tabela 4.6 apresenta a constante A que identifica cada uma das categorias de detalhes.

Tabela 4.6 – Constante A para cada categoria de detalhe (adaptado de AASHTO,2007)

Categoria de detalhe	Constante A [ $10^{11}$ MPa <sup>3</sup> ]
A	82.0
B	39.3
B'	20.0
C	14.4
C'	14.4
D	7.21
E	3.61
E'	1.28
M164M (A 325M) Parafusos sob tensão axial	6.61
M253M (A 490M) Parafusos sob tensão axial	10.3

#### 4.5.4. Verificação da Resistência à Fadiga

A verificação da resistência a fadiga segundo a norma americana é realizada através da seguinte equação:

$$\gamma \times \Delta f \leq \Delta F_n \quad (4.12)$$

onde,

$\gamma$  é fator de carga referente a combinação de fadiga;

$\Delta f$  é a variação de tensão provocada pela passagem da carga móvel (Figura 4.11)

$\Delta F_n$  é a variação de tensão resistente

$$\Delta F_n = \left(\frac{A}{N}\right)^{1/3} \geq \frac{1}{2} \Delta F_{TH} \quad (4.13)$$

onde  $\Delta F_{TH}$  é o limite de fadiga sob variação de tensão de amplitude constante (CAFL) e é dado em função da categoria do detalhe analisado pela tabela da norma AASHTO reproduzida na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Limite de fadiga para variação de tensão de amplitude constante  $\Delta F_{TH}$  (adaptado de AASHTO, 2007)

Categoria de detalhe	Limite de fadiga [MPa]
A	165.0
B	110.0
B'	82.7
C	69.0
C'	82.7
D	48.3
E	31.0
E'	17.9
M164M (A 325M) Parafusos sob tensão axial	214.0
M253M (A 490M) Parafusos sob tensão axial	262.0

## **5. BASE DE DADOS DE TRÁFEGO**

Trafegam diariamente pela malha rodoviária brasileira milhões de veículos com configurações e cargas por eixo diferentes, o que torna difícil a tarefa de padronização do tráfego para posterior análise (BARONI, 2010). Contudo, alguns esforços já têm sido feitos para se caracterizar a composição do tráfego nas rodovias brasileiras e as características dos veículos que por elas circulam.

ROSSIGALI (2013), em seu estudo acerca do desenvolvimento de um novo modelo de carga móvel para pontes em rodoviárias brasileiras, desenvolveu um extenso banco de dados representativo das características do tráfego nas estradas do Brasil, excluindo àquele relativo às classes de veículos leves e utilitários.

Nesse trabalho, será utilizado o banco de dados desenvolvido por ROSSIGALI (2013) para a calibração do modelo de cargas de verificação de fadiga em pontes que será proposto.

### **5.1. Montagem da Base de Dados (ROSSIGALI, 2013)**

As informações necessárias à montagem da base de dados utilizada no desenvolvimento deste trabalho foram fornecidas:

- a) Pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT);
- b) Pelo Centro de Excelência em Engenharia de Transportes (CENTRAN), que é um órgão com coordenação mista do DNIT (Ministério dos Transportes) e do Exército Brasileiro (Ministério da Defesa);
- c) Pela CCR AutoBAn, que controla Sistema Anhanguera-Bandeirantes no Estado de São Paulo;
- d) Pela Ecovia Caminho do Mar S/A, que administra o trecho da BR 277 (PR) entre as cidades de Curitiba e Paranaguá.

Os dados fornecidos pelas administradoras dos Postos contemplam informações como: classe dos veículos, peso total e por grupo de eixos, velocidade e limite de peso total e dos grupos de eixos dos veículos.

Com os dados coletados, foi realizada uma análise de toda a informação disponível e se constatou que nenhuma das bases de dados contemplava simultaneamente todas as informações necessárias ao estudo. Portanto, se montou

uma base de dados híbrida que utiliza informações de todas as bases de dados consideradas.

A base de dados mais recente, com os dados fornecidos pela concessionária CCR AutoBAn no ano de 2011, foi utilizada como referência para a composição do tráfego. Alguns ajustes foram feitos com informações contidas nas demais bases de dados. Descartando-se as classes com frequência menor que 0,1%, foi formada uma base de dados com 29 configurações de veículos comerciais.

## **5.2. Classes de Veículos**

Para se referenciar um determinado tipo de veículo, usam-se nomenclaturas especiais que o identificam univocamente no universo de configurações (ROSSIGALI, 2013). Existem diversas formas de nomenclaturas de veículos diferentes. No trabalho de ROSSIGALI (2013), os veículos da base de dados tiveram suas nomenclaturas definidas conforme o padrão QFV-2009, do DNIT (2009). Esse sistema de identificação contempla informações, tais como: número de partes que constituem o veículo, a configuração dos eixos e o tipo de conexão entre as partes.

A nomenclatura consiste em um conjunto de números e letras, indicando as configurações do veículo, da dianteira para a traseira. Os números informam a quantidade de eixos de veículo ou de suas partes componentes e as letras indicam o tipo de conexão entre as partes do veículo. Maiores detalhes podem ser obtidos em (ROSSIGALI, 2013).

Os veículos simples e as ligações do tipo reboque são representados pela letra “C”. As conexões do tipo semirreboque podem ser representadas tanto pela letra “I” quanto pela letra “S”. A diferença está na configuração dos eixos da unidade posterior: a letra “I” representa eixos isolados ou conjuntos isolados de eixos da mesma espécie, e a letra “S” representa eixos não isolados (em conjunto), em tandem ou não. (ROSSIGALI, 2006).

Na Figura 5.1 são apresentados os tipos de grupos de eixos dos veículos comerciais. Na Tabela 5.1 são apresentadas as silhuetas das classes de veículos pertencentes ao banco de dados utilizado neste trabalho, bem como suas respectivas nomenclaturas e características. Nestas silhuetas um eixo totalmente na cor preta representa que o mesmo possui rodagem simples (um pneumático em cada extremidade) e a ilustração de um eixo com o centro de roda na cor branca representa que esse possui rodagem dupla (dois pneumáticos em cada extremidade).

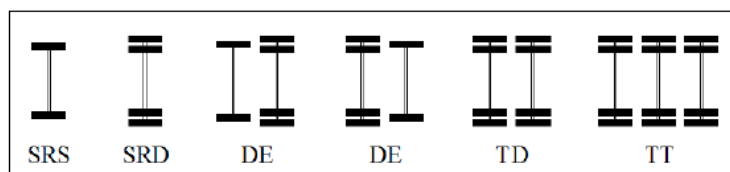

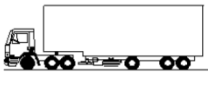

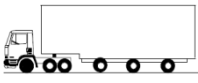
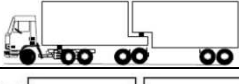

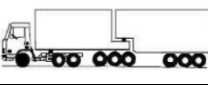





Figura 5.1 - Grupos de eixos mais comuns nos veículos comerciais rodoviários: simples de rodas simples (SRS), simples de rodas duplas (SRD), duplo especial (DE, com duas configurações possíveis), tandem duplo (TD) e tandem triplo (TT) (ROSSIGALI,2013)

Tabela 5.1 - Silhuetas e características dos grupos de eixos das classes de veículos pertencentes a base de dados

Classe	Silhueta	Tipo	Tipo de grupo de eixos				
			1	2	3	4	5
2CC		Caminhão	SRS	SRD	-	-	-
2C		Caminhão	SRS	SRD	-	-	-
3C		Caminhão Trucado	SRS	TD	-	-	-
4C		Caminhão Simples	SRS	TT	-	-	-
2C2		Caminhão + Reboque	SRS	SRD	SRD	SRD	-
2C3		Caminhão + Reboque	SRS	SRD	SRD	TD	-
3C2		Romeu e Julieta	SRS	TD	SRD	SRD	-
3C3		Romeu e Julieta	SRS	TD	SRD	TD	-
3D4		Romeu e Julieta	SRS	TD	TD	TD	-
2S1		Romeu e Julieta	SRS	SRD	SRD	-	-
2S2		Romeu e Julieta	SRS	SRD	TD	-	-
2S3		Romeu e Julieta	SRS	SRD	TT	-	-
2I1		Romeu e Julieta	SRS	SRD	SRD	TD	-
2I2		Caminhão Trator + Semireboque	SRS	SRD	SRD	SRD	-
2I3		Caminhão Trator + Semireboque	SRS	SRD	SRD	SRD	SRD
3S1		Caminhão Trator Trucado + Semi-reboque	SRS	TD	SRD	-	-
3S2		Caminhão Trator Trucado + Semi-reboque	SRS	TD	TD	-	-

Classe	Silhueta	Tipo	Tipo de grupo de eixos				
			1	2	3	4	5
3S3		Caminhão Trator Trucado + Semi-reboque	SRS	TD	TT	-	-
3I1		Caminhão Trator Trucado + Semi-reboque	SRS	TD	SRD	TD	-
3I2		Caminhão Trator Trucado + Semi-reboque	SRS	TD	SRD	SRD	-
3I3		Caminhão Trator Trucado + Semi-reboque	SRS	TD	SRD	SRD	SRD
3T4		Bi Trem Articulado	SRS	TD	TD	TD	-
3T6		Rodotrem	SRS	TD	TD	TD	TD
3M6		Caminhão Trator Trucado + Dois Semi-reboques	SRS	TD	TT	TT	-
2CB		Ônibus	SRS	SRD	-	-	-
3CB		Ônibus Trucado Misto	SRS	DE	-	-	-
3BB		Ônibus Trucado Misto	SRS	DE	-	-	-

### 5.3. Características dos Veículos que Compõem a Base de Dados

Com base nos dados fornecidos pelos postos de monitoramento, além de informações sobre as características técnicas dos veículos comerciais, ROSSIGALI (2013) conseguiu determinar, estatisticamente, as características das principais classes de veículos pesados que circulam pelas rodovias brasileiras.

Foram estabelecidas faixas de pesos totais dos veículos, bem como a distribuição do peso por grupo de eixos. Definiram-se também as distâncias longitudinais entre os grupos de eixos e distâncias transversais.

#### 5.3.1. Pesos Totais das Classes de Veículos

Os Postos de Pesagem efetuam a pesagem de todos os veículos comerciais que circulam pela rodovia monitorada. Os veículos são orientados a seguir na faixa específica e em seguida são dirigidos ao posto. A pesagem é realizada de duas formas: dinâmica e estática. A pesagem dinâmica ocorre em velocidades de até 60 km/h e, caso haja irregularidades nos pesos e dimensões, os veículos são pesados novamente, dessa vez em baixa velocidade, até 12 km/h.

Para a montagem dos histogramas de peso total para cada classe, ROSSIGALI (2013) cruzou as informações da planilha de *distribuição de veículos* comerciais por faixa de peso fornecida pelos postos de pesagem da CCR AutoBA, os dados de sobrecarga em excesso dos veículos monitorados, também fornecidos pelos postos, e do Peso Bruto Total Combinado dos veículos (PBTC), regulamentado pelo DNIT.

A Figura 5.2 mostra os histogramas de peso total usados neste trabalho para as classes mais frequentes, 3C, 2C, 2S2 e 2CC. Os histogramas de peso total para as demais classes de veículos encontram-se no Apêndice A.1.

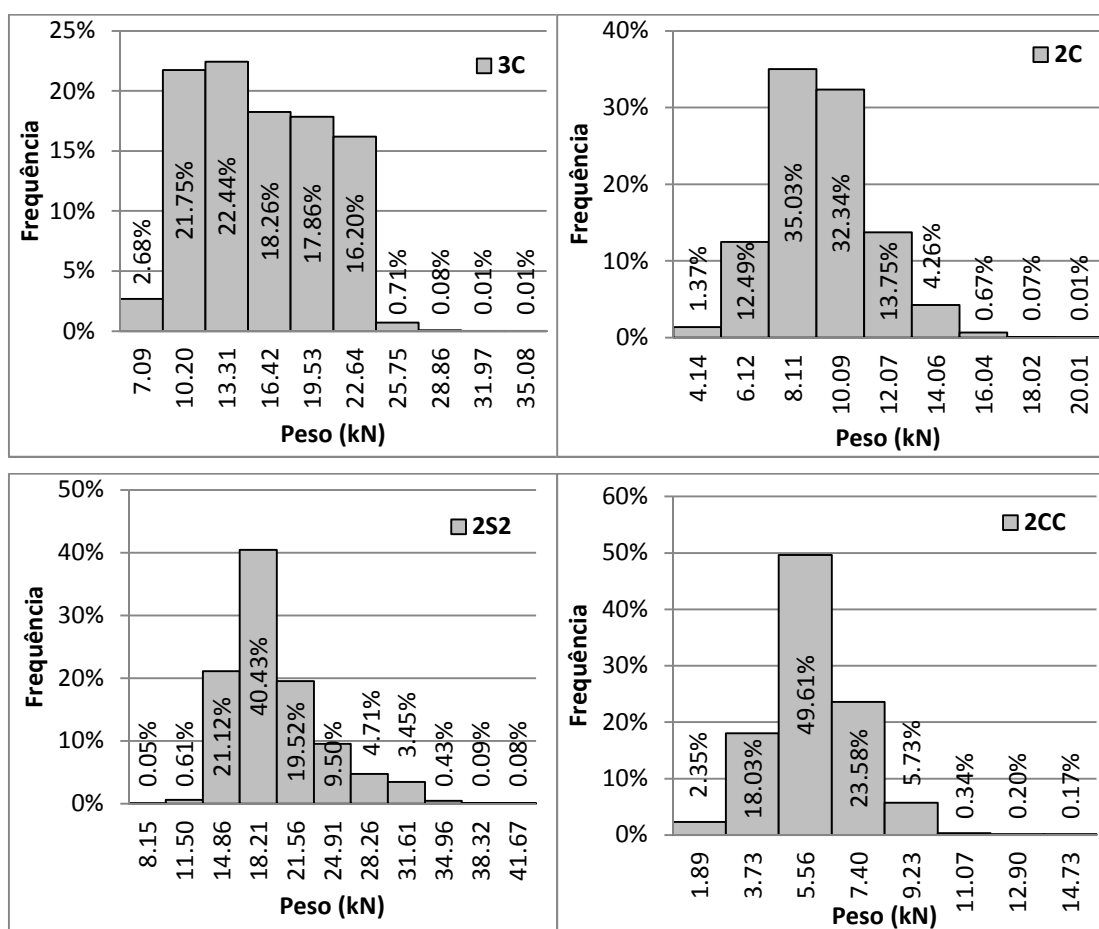


Figura 5.2 – Histograma de peso: (a) Classe 3C, (b) Classe 2C; (c) Classe 2S2; (d) Classe 2CC

### 5.3.2. Distribuição do Peso Total por Eixos

Os veículos de carga, quando vazios, apresentam maior carga no eixo dianteiro, em consequência da presença do motor. Conforme os veículos são carregados, o peso da carga passa a ser suportado principalmente pelos eixos traseiros. Dessa forma, os pesos suportados pelos grupos de eixos não são proporções constantes do peso total.



Com base nas informações fornecidas pelos postos de monitoramento, geraram-se dispersões que relacionam, para cada classe de veículos, o peso de cada grupo de eixos com peso total. Após ajustes por curvas de regressão de mínimos quadrados, ROSSIGALI (2013) verificou que as variações lineares apresentaram bons resultados.

Neste trabalho, serão utilizadas, portanto, equações lineares do tipo  $f(x) = ax + b$  para calcular a distribuição da carga total por grupo de eixos. A carga em eixos agrupados será dividida igualmente entre os eixos constituintes. A carga suportada pelo primeiro grupo de eixos é determinada pela subtração das cargas nos demais eixos do peso total. A Tabela 5.2 apresenta os coeficientes da equação linear para cada grupo de eixos.

*Tabela 5.2 – Coeficientes da equação linear que representa a variação do peso por grupo de eixos e peso total do veículo (ROSSIGALI,2013)*

Classe	Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4		Grupo 5	
	a	b	a	b	a	b	a	b
2CC	-0.576	0.652	-	-	-	-	-	-
2C	-1.226	0.751	-	-	-	-	-	-
3C	-2.265	0.865	-	-	-	-	-	-
4C	-3.603	0.946	-	-	-	-	-	-
2C2	1.174	0.298	-1.748	0.32	-2.724	0.333	-	-
2C3	3.434	0.158	-0.114	0.216	-6.238	0.564	-	-
3C2	-1.713	0.455	-0.895	0.245	-1.819	0.269	-	-
3C3	0.418	0.324	2.716	0.127	-8.012	0.538	-	-
3D4	-0.235	0.308	-0.761	0.309	-3.731	0.367	-	-
2S1	-1.402	0.413	-1.469	0.493	-	-	-	-
2S2	-0.271	0.331	-3.203	0.607	-	-	-	-
2S3-C	0.009	0.243	-3.795	0.72	-	-	-	-
2S3-L	1.136	0.224	-5.37	0.754	-	-	-	-
2I1	0.218	0.239	-2.255	0.265	-2.045	0.464	-	-
2I2	1.422	0.271	-2.22	0.322	-2.667	0.358	-	-
2I3	0.729	0.213	-0.058	0.203	-2.504	0.268	-1.999	0.276
3S1	-7.394	0.832	3.486	0.125	-	-	-	-
3S2	-0.986	0.428	-3.574	0.549	-	-	-	-
3S3-C	-3.6	0.407	-0.491	0.566	-	-	-	-
3S3-L	0.024	0.345	-4.979	0.649	-	-	-	-
3I1	-0.435	0.311	1.019	0.168	-6.64	0.511	-	-
3I2	-3.874	0.524	1.452	0.167	-1.294	0.255	-	-
3I3	0.524	0.303	1.143	0.168	-3.056	0.25	-3.182	0.259
3T4	-0.235	0.308	-0.761	0.309	-3.731	0.367	-	-
3T6	1.061	0.214	-0.818	0.249	-1.338	0.239	-3.863	0.287
3M6	10.823	0.091	-2.727	0.379	-10.74	0.486	-	-

Classe	Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4		Grupo 5	
	a	b	a	b	a	b	a	b
2CB	0.000	0.555	-	-	-	-	-	-
3CB	0.000	0.656	-	-	-	-	-	-
3BB	0.000	0.656	-	-	-	-	-	-

### 5.3.3. Distâncias Longitudinais entre Eixos e Bitolas

As distâncias entre os eixos dos veículos pertencentes à base de dados foram, na sua maioria, definidas utilizando como referência os dados da balança lenta da base de dados fornecida pela AutoBAN. As distâncias entre os eixos de ônibus e caminhões tratores foram obtidas através de informações de fabricantes.

Neste trabalho, as distâncias longitudinais que possuíam variação dentro da base de dados fornecida pela concessionária, foram tomadas por seus valores médios. A Tabela 5.3 apresenta as distâncias longitudinais adotadas entre eixos dos veículos.

*Tabela 5.3 – Distâncias Longitudinais Entre Eixos dos Veículos (ROSSIGALI-2013)*

Classe	Nº de Eixos	Bal. Diant.	d <sub>12</sub> (m)	d <sub>23</sub> (m)	d <sub>34</sub> (m)	d <sub>45</sub> (m)	d <sub>56</sub> (m)	d <sub>67</sub> (m)	d <sub>78</sub> (m)	d <sub>89</sub> (m)	Bal. Tras.
2CC	2	1.20	3.84	-	-	-	-	-	-	-	1.75
2C	2	1.40	5.31	-	-	-	-	-	-	-	2.00
3C	3	1.40	5.20	1.30	-	-	-	-	-	-	2.00
4C	4	1.40	5.29	1.35	1.35	-	-	-	-	-	2.00
2C2	4	1.40	4.16	7.06	4.81	-	-	-	-	-	1.00
2C3	5	1.40	3.85	8.02	3.98	1.30	-	-	-	-	1.50
3C2	5	1.40	4.68	1.30	5.04	4.9	-	-	-	-	1.00
3C3	6	1.40	5.22	1.30	6.83	4.62	1.30	-	-	-	1.50
3D4	7	1.40	3.75	1.30	5.11	1.30	3.62	1.30	-	-	1.00
2S1	3	1.40	3.94	7.51	-	-	-	-	-	-	1.00
2S2	4	1.40	3.88	8.22	1.25	-	-	-	-	-	2.00
2S3-C	5	1.40	4.09	3.43	1.25	1.25	-	-	-	-	1.50
2S3-L	5	1.40	3.97	6.26	1.25	1.25	-	-	-	-	2.50
2I1	5	1.40	3.88	5.22	2.43	1.25	-	-	-	-	2.00
2I2	4	1.40	3.73	7.78	2.43	-	-	-	-	-	1.00
2I3	5	1.40	3.93	4.53	2.43	2.43	-	-	-	-	2.00
3S1	4	1.40	3.84	1.35	6.28	-	-	-	-	-	1.00
3S2	5	1.40	3.79	1.35	7.12	1.25	-	-	-	-	2.00
3S3-C	6	1.40	3.88	1.30	3.13	1.25	1.25	-	-	-	1.50
3S3-L	6	1.40	3.85	1.30	5.76	1.25	1.25	-	-	-	2.50
3I1	6	1.40	3.72	1.30	5.13	2.43	1.25	-	-	-	2.00
3I2	5	1.40	3.54	1.30	7.42	2.43	-	-	-	-	1.00

Classe	Nº de Eixos	Bal. Diant.	d <sub>12</sub> (m)	d <sub>23</sub> (m)	d <sub>34</sub> (m)	d <sub>45</sub> (m)	d <sub>56</sub> (m)	d <sub>67</sub> (m)	d <sub>78</sub> (m)	d <sub>89</sub> (m)	Bal. Tras.
3I3	6	1.40	3.54	1.30	5.05	2.43	2.43	-	-	-	2.00
3T4	7	1.40	3.75	1.30	5.11	1.25	3.62	1.25	-	-	1.50
3T6	9	1.40	3.34	1.35	5.75	1.25	3.7	1.25	5.95	1.25	1.00
3M6	9	1.40	3.46	1.35	6.23	1.25	1.25	5.79	1.25	1.25	1.00
2CB	2	2.50	5.85	-	-	-	-	-	-	-	3.00
3CB	3	2.50	6.85	1.45	-	-	-	-	-	-	3.00
3BB	3	2.50	6.85	1.45	-	-	-	-	-	-	3.00

Tabela 5.4 – Bitolas dos Eixos dos Veículos

Classe	Eixo 1 (m)	Eixo 2 (m)	Eixo 3 (m)	Eixo 4 (m)	Eixo 5 (m)	Eixo 6 (m)	Eixo 7 (m)	Eixo 8 (m)	Eixo 9 (m)	
2CC	1.75	1.65	-	-	-	-	-	-	-	
2C	2.00	1.85	-	-	-	-	-	-	-	
3C		1.90		-	-	-	-	-	-	
4C		1.90		1.90	-	-	-	-	-	
2C2	2.00	1.85	1.90		-	-	-	-	-	
2C3		1.90		1.90	-	-	-	-	-	
3C2		1.90		1.90		-	-	-	-	
3C3	2.05	1.85		1.90	1.90	1.90	-	-	-	
3D4		1.85		1.90		1.90	-	-	-	
2S1		1.85		1.90		-	-	-	-	-
2S2	2.05	1.85		1.90	1.90	-	-	-	-	
2S3-C		1.85		1.90		1.90	-	-	-	-
2S3-L		1.85		1.90		1.90	-	-	-	-
2I1		1.85		1.90		1.90	-	-	-	-
2I2		1.85		1.90		1.90	-	-	-	-
2I3	1.85		1.90	1.90	1.90	-	-	-	-	
3S1	2.05	1.85		1.90	1.90	-	-	-	-	
3S2		1.85		1.90		1.90	-	-	-	-
3S3-C		1.85		1.90		1.90	1.90	-	-	-
3S3-L		1.85		1.90		1.90	1.90	-	-	-
3I1		1.85		1.90		1.90	1.90	-	-	-
3I2		1.85		1.90		1.90	1.90	-	-	-
3I3		1.85		1.90		1.90	1.90	-	-	-
3T4	2.05	1.85		1.90				-	-	
3T6		1.85		1.90				1.90		
3M6		1.85		1.90				1.90		
2CB	2.05	1.85	-	-	-	-	-	-	-	
3CB		2.10	1.85	-	-	-	-	-	-	
3BB		1.85	2.10	-	-	-	-	-	-	

A distância transversal entre as linhas de pneus do veículo é chamada bitola. A bitola é definida como a distância entre os centros dos pneus, no caso de eixos simples, e a distância entre o ponto médio dos pares de pneus, no caso de eixos duplos.

A Tabela 5.4, obtida do estudo de ROSSIGALI (2013), apresenta as bitolas de cada classe de veículo.

## **5.4. Composição do Tráfego**

### **5.4.1. Frequências das Classes de Veículos**

Após a montagem da base de dados híbrida, com informações dos diversos postos de monitoramentos, os dados referentes à passagem de veículos das classes selecionadas foram organizados de forma a se obter a composição do tráfego em rodovias brasileiras.

Neste trabalho, para a realização das análises, os pesos totais dos veículos foram classificados em faixas de pesos, numeradas de 1 a no máximo 12. Serão adotados como peso total dos veículos pertencentes a cada faixa de peso total, os valores referentes ao centro dos intervalos. No Apêndice A.2 estão apresentados os dados da composição do tráfego nas rodovias brasileiras, que inclui os pesos totais representativos de cada faixa de peso para cada uma das classes de veículos, assim como a frequência relativa de cada faixa de peso dentro da classe e a frequência absoluta das faixas de peso considerando todas as classes de veículos.

Constatou-se que as classes mais frequentes são as de veículos do tipo 3C (17,11%), 2C (12,42%), 2S2 (11,97%) e 2CC (11,08%). A Figura 5.3 apresenta o histograma de frequência das classes de veículos.

Com a finalidade de se comparar a composição do tráfego em rodovias brasileiras com a de outros países, montou-se também um histograma de frequência e outro de frequência acumuladas dos pesos totais dos veículos, mostrados respectivamente na Figura 5.4 e na Figura 5.5. Esta comparação é apresentada mais adiante no item 5.4.3.

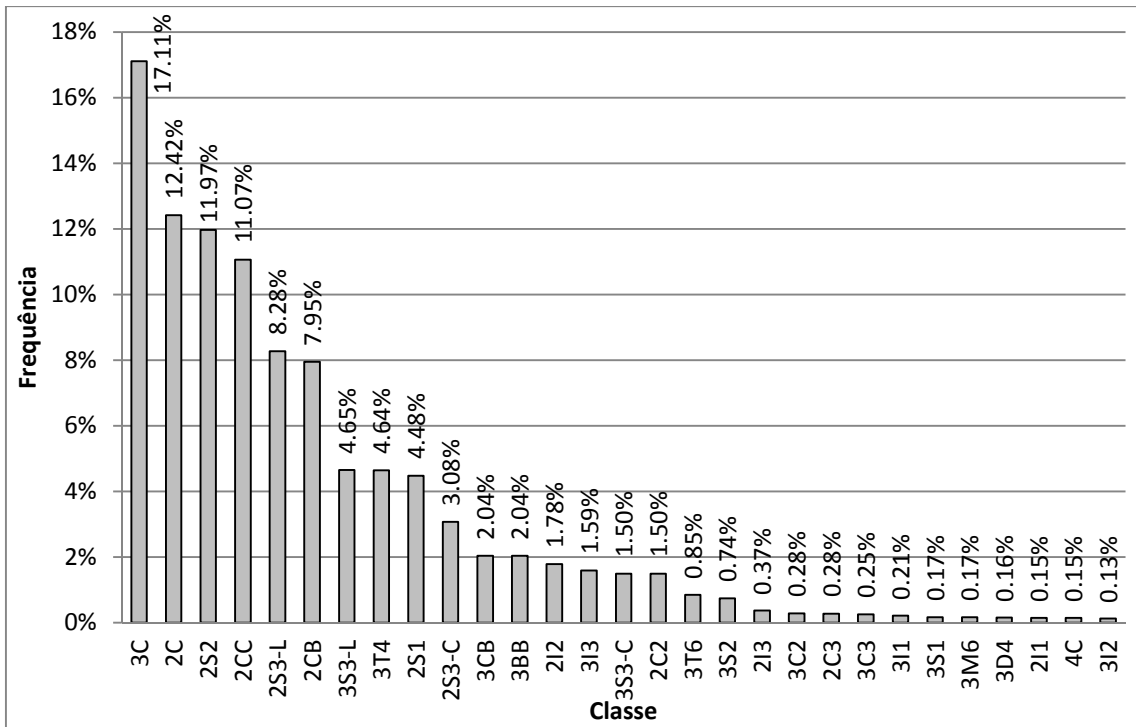


Figura 5.3 – Histograma de frequência das classes de veículos

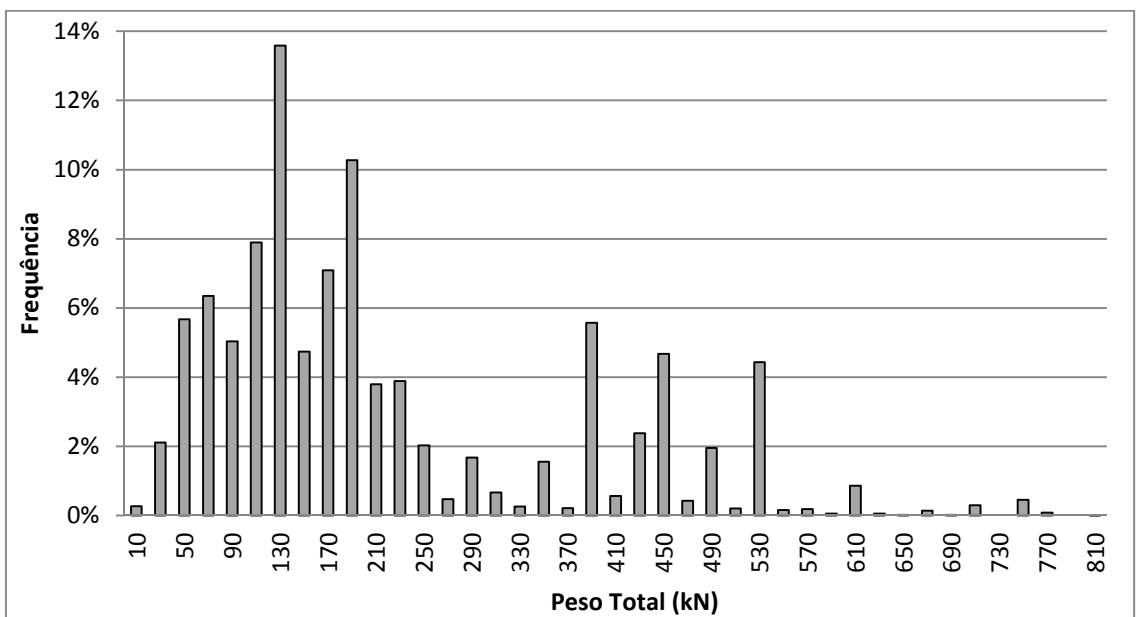


Figura 5.4 – Histograma de frequência dos Pesos Totais dos Veículos

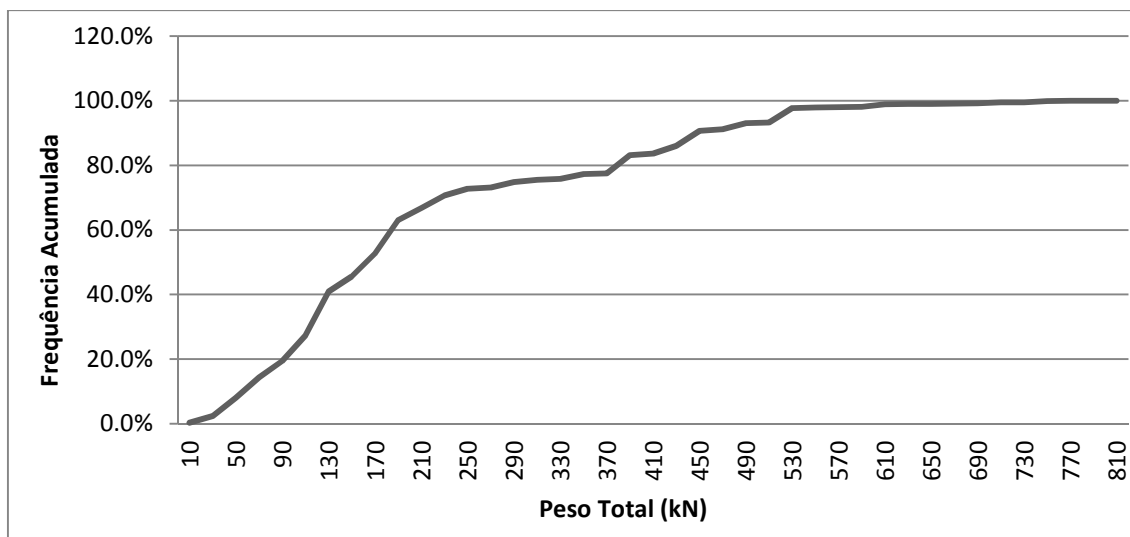


Figura 5.5 – Histograma de frequência acumulada dos Pesos Totais dos Veículos

#### 5.4.2. Volume Médio Diário Adotado

O volume médio de veículos que passam em um dia por um determinado ponto da via foi estimado considerando a base de dados fornecida pela concessionária AutoBAN, a mesma tomada como referência para a elaboração da base de dados híbrida. O número total de registros foi dividido pela quantidade de dias em que esses registros foram coletados, resultando em um número médio de registros igual a 6104 veículos por dia.

No entanto, esse volume diário não representa o total de veículos comerciais que trafegam pela rodovia. Alguns veículos se evadem da pesagem e nos horários de pico alguns outros são liberados da pesagem com o intuito de não se formar uma fila de veículos muito longa, a qual prejudicaria o tráfego em outras vias. Dessa forma, o fluxo real é aproximadamente 15% superior ao registrado, resultando em um volume médio diário (VMD) de 7019 veículos/dia.

O VMD encontrado representa o tráfego em todas as faixas da rodovia. ROSSIGALI (2013), em seu estudo, constatou que para rodovias com faixa única ou faixa dupla, o fluxo de veículos comerciais na faixa lenta, aquela onde a maioria dos veículos comerciais circula, é igual a 85% do volume total.

$$VDM = 0.85 \times 7019 = 5966 \approx 6000 \text{ veículos/dia} \quad (5.1)$$

Dessa forma, para esse estudo, será adotado um VDM igual a 6000 veículos/dia, o qual é representativo do fluxo de veículos comerciais na faixa lenta das rodovias brasileiras de maior volume de tráfego.

### 5.4.3. Comparação das Características do Tráfego da Base de Dados com o Tráfego de Referência para a Elaboração do Eurocode

Segundo SANPAOLESI e CROCE (2005), para a elaboração dos modelos de carga apresentados no Eurocódigo 1, foram coletados dados de diversas rodovias europeias durante os períodos de 1977 a 1988 e de 1984 a 1988, as quais apresentaram um VMD que varia de 1000 a 8000 veículos pesados por dia.

Dentre as estradas monitoradas, a Autoestrada A6, próximo a Auxerre, na França, foi selecionada para a calibração dos modelos de carga propostos pelo Eurocódigo. Essa estrada foi a que apresentou dados mais homogêneos e representativos do tráfego de longa distância europeu.

A tabela a seguir apresenta algumas características do tráfego na pista lenta da Autoestrada A6, considerando somente o tráfego de veículos comerciais (SANPAOLESI E CROCE, 2005). Esses dados são, então, comparados com as características do tráfego nas rodovias brasileiras, que será utilizado no desenvolvimento desse trabalho. São apresentados os volumes médios diários, o peso total médio dos veículos e o peso total máximo.

*Tabela 5.5 – Características do tráfego europeu e brasileiro de veículos pesados utilizadas para calibração de modelos*

Modelos	VMD	P <sub>médio</sub> (kN)	P <sub>máx</sub> (kN)	% de cargas na faixa entre 360kN e 560 kN
Autoestrada A6	2630	327	670	44%
Proposta para NBR 7188 (ROSSIGALI, 2013)	6000	328	801	22%

A Figura 5.6 apresenta o histograma de peso total dos veículos para os dados coletados da Autoestrada A6 e da Autoestrada M4, localizada na Irlanda, obtido de MALAKATAS (2013).

Fazendo uma comparação entre o histograma de pesos totais dos veículos da Autoestrada A6 apresentado na Figura 5.6 e aquele relativo aos dados das rodovias brasileiras, apresentado na Figura 5.4, pode-se observar que 44% dos veículos medidos na Autoestrada A6 possuem pesos entre 360kN e 560kN, enquanto nos dados das relativas às rodovias brasileiras, observa-se apenas 22% dos veículos nesta mesma faixa de peso (ver Tabela 5.5). Ainda, os dados relativos a estradas brasileiras apontam para a existência de veículos mais pesados, que chegam a 800kN, o que não ocorre nos dados relativos às estradas europeias, onde os pesos

totais chegam a 670kN. O volume diário médio de veículos nas rodovias brasileiras também é maior que aquele da rodovia selecionada para calibração do Eurocódigo 1.

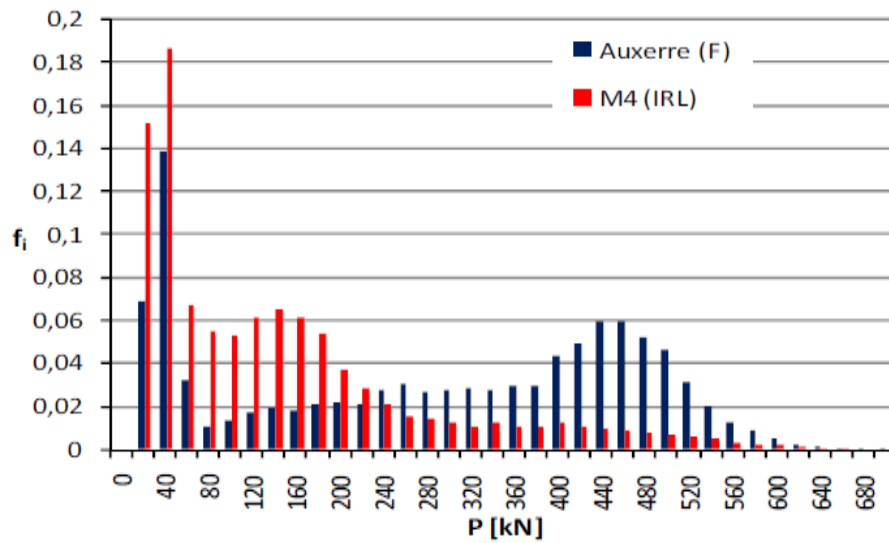


Figura 5.6 – Histograma de pesos totais - Autoestradas A6 (Auxerre, França) e M4 (Irlanda) (MALAKATAS, 2013)



## **6. MODELOS DE CARGAS MÓVEIS PARA FADIGA NO BRASIL**

### **6.1. Introdução**

Tendo em vista a verificação de fadiga nas obras de arte especiais submetidas ao tráfego de veículos usuais, a aplicação da metodologia de nível 3 (que calcula o dano produzido pelo tráfego real de veículos) não é uma ferramenta prática. Faz-se necessário, portanto, o desenvolvimento de modelos mais simples de carga para a verificação dessas estruturas à fadiga. Exigindo-se uma análise mais complexa dos efeitos provocados pelo espectro de variação de tensões real somente em situações especiais.

Neste trabalho, serão realizadas duas abordagens para a definição de um modelo de cargas móveis para verificação de fadiga no Brasil. A primeira é baseada no conceito de dano equivalente e considera o dano provocado por todos os veículos do espectro. Esse primeiro modelo de cargas é análogo ao FLM3 do Eurocódigo e pretende analisar o fenômeno de fadiga de acordo com o nível de verificação 2. A segunda abordagem utiliza os mesmos conceitos empregados no desenvolvimento do modelo de cargas FLM1 do Eurocódigo. Essa abordagem mais simplificada pretende chegar a um modelo de cargas móveis baseado na variação máxima de tensão. A análise da resistência à fadiga é, então, realizada segundo o nível 1 de verificação, descrito no item 4.1. Esta proposta de modelo de cargas será desenvolvida buscando uma correlação entre o modelo de cargas para verificação de resistência à fadiga e os modelos de carga para verificação do Estado Limite Último. Serão analisados o modelo de cargas apresentado pela atual norma brasileira (NBR7188, 1982) e o proposto por ROSSIGALI (2013) (item 4.3).

Para a elaboração dos modelos de verificação de fadiga, é necessária a definição de uma geometria para a carga móvel e posterior calibração do modelo. A calibração é feita de forma que o modelo melhor se ajuste ao dano provocado pelo tráfego real de veículos ou à máxima variação de tensão produzida por esse, dependendo da abordagem escolhida.

### **6.2. Condições de Tráfego para o Espectro de Veículos Reais**

MENDES (2009), após a coleta de dados em diversos órgãos traçou um perfil das pontes em rodovias brasileiras. Ele contabilizou cerca de 5620 pontes construídas, dentre essas, 93% possuíam vãos menores que 40m e 50% eram biapoiadas.

Com o intuito de realizar um estudo que abrangesse as obras de arte especiais mais comumente construídas no Brasil, o sistema estrutural selecionado para o

desenvolvimento de um novo modelo de cargas para verificação à fadiga é o de uma ponte fictícia, biapoiada e de eixo reto, com vãos que variam de 10 a 40m.

No que diz respeito ao fluxo de veículos pela ponte, existem dois cenários possíveis: o primeiro onde os veículos trafegam normalmente, em velocidades usuais e um segundo onde há uma situação de congestionamento, quando os veículos se acumulam sobre a estrutura. Nesse último cenário, o coeficiente de amplificação dinâmica das cargas não deve ser considerado.

Na situação de tráfego livre, em pontes de pequenos vãos, como o caso das estudados neste trabalho, é pouco provável que mais de um veículo por pista trafegue pela ponte. Esse fato se justifica pelo comprimento elevado dos veículos comerciais somados à distância de segurança que deve ser mantida entre eles.

Já na situação de engarrafamento, a probabilidade de que mais de um veículo, ou parte dele, esteja sobre a ponte cresce. Com o trânsito parado, a distância entre os veículos é bastante reduzida.

Analisando os dois cenários, podemos chegar à conclusão de que, apesar de na situação de congestionamento existir uma carga maior sobre a ponte, a situação que provoca maior solicitação nas longarinas é a situação de fluxo livre. O acréscimo de carga gerado pela presença de mais veículos, ou parte deles, sobre a ponte, na situação de congestionamento, é pequeno, visto o comprimento reduzido dos vãos das pontes. Dessa forma, esse acréscimo de carga é superado pelo coeficiente de amplificação dinâmico pelo qual as solicitações resultantes dos veículos em movimento devem ser multiplicadas.

Com base nessa análise, neste trabalho será considerado que os veículos passam pela ponte em velocidade, um por vez. De forma a simplificar o estudo, não serão considerados cruzamentos na ponte. No entanto, é preciso alertar que a presença de veículos em outras pistas altera as solicitações no elemento analisado, sendo necessário um estudo adicional a cerca da influência dos cruzamentos no dano acumulado na estrutura, que não será objeto deste trabalho.

### **6.3. Modelo de Cargas Móveis para Dano Equivalente (Nível 2)**

O modelo de cargas móveis para dano equivalente é obtido aplicando-se os conceitos de acumulação de dano (item 2.3) e dano equivalente a todo o espectro de variações de tensão provocadas pela passagem dos veículos reais pela ponte. O espectro de veículos reais é substituído por um único veículo padrão, que produz um dano equivalente ao do espectro, resultando em uma variação de tensão uniforme.

Os resultados obtidos com a metodologia descrita a seguir serão apresentados no capítulo 7.

### 6.3.1. Metodologia de Cálculo do Peso do Veículo Padrão de Fadiga

A definição do modelo de cargas móveis para dano equivalente é realizada, como o próprio nome diz, pela aplicação do conceito de dano equivalente. A aplicação do conceito de dano equivalente consiste em se obter uma variação de tensão de amplitude constante (ver Figura 6.1) que produza o mesmo dano na estrutura que aquele causado pelo espectro de amplitude de tensões reais, considerando o número total de ciclos do espectro durante a vida útil de projeto (VUP).

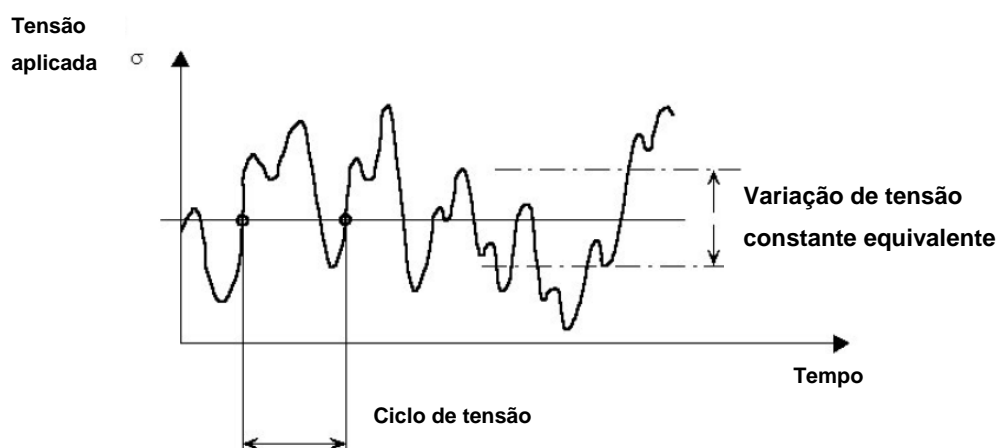


Figura 6.1 – Histórico de variações de tensões de amplitude variável e representação da variação de tensão equivalente (adaptado de ESDEP, 2000).

Essa variação de tensão equivalente pode ser obtida igualando-se o dano acumulado provocado pelo espectro de veículos reais ao dano causado pela própria variação de tensão equivalente.

$$D_{espectro} = D_{equiv.} \quad (6.1)$$

O dano acumulado resultante da passagem dos veículos durante a vida útil da ponte pode ser calculado pela expressão geral da regra de Palmgren-Miner (equação 2.2). Substituindo-se a equação (2.1) das curvas de fadiga nessa expressão, obtém-se:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = \sum_i \frac{n_i \Delta \sigma_i^m}{C} \quad (6.2)$$

onde,

$\Delta\sigma_i$  é a  $i$ -ésima variação de tensão;

$n_i$  é o número de ciclos de magnitude  $\Delta\sigma_i$ ;

O dano para a variação de tensão constante equivalente ( $\Delta\sigma_{eq}$ ) é obtido substituindo o somatório da multiplicação dos ciclos pelas variações de tensões correspondentes, pelo produto do número total de ciclos pela variação de tensão equivalente.

$$D_{eq} = \frac{n_t}{N_{eq}} = \frac{\Delta\sigma_{eq}^m \cdot n_t}{c} \quad (6.3)$$

onde  $n_t = \sum n_i$  é o número total de ciclos do espectro durante a vida útil de projeto.

$$n_t = VMD \times 365 \times VPU \quad (6.4)$$

No presente trabalho, adotou-se  $VMD=6000$  veículos e  $VUP$  igual a 75 anos, resultando em  $n_t = 1,64 \times 10^8$  veículos.

Igualando-se o dano resultante das variações de tensões provocadas pela passagem do espectro real de veículos, ao dano provocado pela variação de tensão constante equivalente, é possível obter a expressão desta última. Considerando as curvas S-N com somente uma inclinação  $m$ , a expressão para a variação de tensão equivalente será a dada pela equação 6.6:

$$\sum_i \frac{n_i \cdot \Delta\sigma_i^m}{c} = \frac{\Delta\sigma_{eq}^m \cdot n_t}{c} \quad (6.5)$$

$$\Delta\sigma_{eq} = \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot \Delta\sigma_i^m}{n_t} \right)^{-m} \quad (6.6)$$

No caso de pontes, o espectro de veículos reais será representado por um único veículo, que passará pela ponte o mesmo número de vezes que os diversos veículos pertencentes ao espectro. Esse veículo, denominado veículo padrão de fadiga, será aquele que produz o mesmo dano na estrutura que o espectro de veículos reais.

A variação de tensão equivalente ( $\Delta\sigma_{eq}$ ) será igual à variação de tensão provocada pela passagem do veículo padrão de fadiga. Diversas configurações possíveis para este veículo serão apresentadas no item 6.3.5.

Com a configuração do veículo padrão de fadiga definida, o peso total deste veículo (P) pode ser determinado considerando-se, inicialmente, que este possui peso total unitário (1kN) e obtendo a variação de tensão resultante da passagem desse veículo unitário pela ponte ( $\Delta\sigma_{st1}$ ). Assim, o peso total pode ser obtido igualando-se a variação de tensão equivalente à variação de tensão provocada pelo veículo padrão de fadiga unitário multiplicada pelo peso total do veículo.

$$\Delta\sigma_{eq} = P \times \Delta\sigma_{st1} \quad (6.7)$$

O fator pelo qual o veículo de fadiga unitário deve ser multiplicado, de forma que esse produza a variação de tensão equivalente, será igual à variação de tensão equivalente dividida pela variação de tensão provocada pelo veículo de fadiga unitário.

$$P = \frac{\Delta\sigma_{eq}}{\Delta\sigma_{st1}} = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot \Delta\sigma_i^m}{n_t}\right)^{-m}}{\Delta\sigma_{st1}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot \Delta\sigma_i^m}{n_t \cdot \Delta\sigma_{st1}^m}\right)^{-m} \quad (6.8)$$

A expressão pode ser simplificada para o caso de se utilizar as curvas S-N com somente uma inclinação:

$$P = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_{st1}}\right)^m}{n_t}\right)^{-m} \quad (6.9)$$

Observando a expressão acima, é possível concluir que para se definir o peso total do veículo padrão de fadiga que gerará um dano equivalente ao espectro de veículos na ponte é necessário se conhecer a variação de tensão gerada por cada veículo pertencente ao espectro e a quantidade de ciclos de tensão que esse gerará durante a vida útil da estrutura, assim como a variação de tensão provocada pelo veículo padrão de fadiga com peso unitário.

### 6.3.2. Variações de Tensão nos Elementos Estruturais

Em uma estrutura de ponte, os principais carregamentos atuantes podem ser divididos em dois, as cargas permanentes e as cargas móveis. Além desses carregamentos, no projeto também devem ser consideradas as ações do vento na

estrutura, frenagem e aceleração dos veículos, empuxo nos pilares, força centrípeta, no caso de pontes curvas, dentre outros.

As cargas permanentes incluem peso-próprio da estrutura, com as longarinas, laje e transversinas, e o peso próprio dos elementos acessórios, como o capeamento da pista e as barreiras laterais. A carga móvel é aquela gerada pela passagem dos veículos sobre a ponte.

No que diz respeito à análise de fadiga, estamos interessados na variação de tensão nos elementos estruturais. Como as cargas permanentes não variam durante a vida útil da estrutura, essas não entram no cálculo da variação de tensão. As demais ações, como o vento e frenagem e aceleração dos veículos, causam variação de tensão, uma vez que não atuam com a mesma intensidade durante toda a vida útil da ponte, no entanto, não são consideradas na análise de fadiga, uma vez que a variação de tensão provocada por esses carregamentos não é tão frequente e significativa como aquela provocada pelo carregamento móvel.

Dessa forma, o dano acumulado na estrutura será resultado da variação de tensão nos elementos estruturais da ponte provocado exclusivamente pela passagem da carga móvel. Como a tensão provocada na estrutura pela carga móvel é nula quando o veículo não está sobre ela, a variação de tensão considerada na verificação da fadiga será igual à tensão gerada pela passagem dos veículos pela ponte.

Durante a passagem da carga móvel pela ponte, as longarinas sofrem predominantemente os esforços de momento fletor e cortante. Tendo isso em vista, neste trabalho, será analisada somente a variação de tensão normal provocada pelos momentos fletores nas longarinas soldadas da ponte, sendo desprezado o efeito das tensões cisalhantes. Nos pontos de momento fletor máximo, não há interação entre as tensões normais e as tensões cisalhantes, portanto, seus efeitos podem ser considerados separadamente.

De forma a simplificar o estudo, foi também considerado que cada veículo trafegando pela ponte gera somente um ciclo de tensão. Na realidade, isso não ocorre. Devido aos efeitos dinâmicos, conforme apresentado no capítulo 3, a passagem de um veículo pela ponte pode gerar diversos ciclos de tensão. O aumento da quantidade de ciclos durante a passagem de um veículo é acentuado com a diminuição do vão da ponte. Para a faixa de vãos analisada, a consideração da ocorrência de somente um ciclo de tensão durante a passagem de cada veículo pode ser assumida como uma boa aproximação.

Na análise estática, a variação de tensão  $\Delta\sigma_i$  provocada pela passagem de cada tipo de veículo sobre a ponte é determinada através da equação da resistência dos materiais para vigas submetidas à flexão simples.

$$\Delta\sigma_i = \frac{\Delta M_i y}{I} \quad (6.10)$$

onde,

$\Delta M_i$  é a variação do momento fletor na seção analisada, provocada pela passagem do veículo;

$y$  é a distância entre o centro de gravidade da seção e a fibra onde se pretende calcular a tensão;

$I$  é momento de inércia da seção em torno do eixo paralelo à direção do momento fletor.

Neste trabalho, por se objetivar o desenvolvimento de um modelo de cargas para verificação de qualquer tipo de detalhe submetido a esforço normal, os detalhes construtivos que podem condicionar a segurança à fadiga da ponte não estão definidos, assim como sua posição na ponte. Dessa forma, toda a análise será realizada considerando-se a longarina mais solicitada, na seção submetida ao maior momento fletor.

Observando a equação (6.9) deduzida para o peso total do veículo padrão de fadiga, pode-se observar que não é necessária a transformação da variação de momentos em fletores em variação de tensão. Como a variação de tensão provocada pelo espectro de veículos e a variação de tensão equivalente são calculadas no mesmo ponto da estrutura, o fator  $\frac{y}{I}$  será igual para as duas parcelas. Dessa forma, o peso total do veículo padrão de fadiga da equação 6.9 pode ser reescrito segundo a equação 6.11:

$$P = \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot \left( \frac{\frac{\Delta M_i y}{I}}{\frac{\Delta M_{std1} y}{I}} \right)^m}{n_t} \right)^{-m} = \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot \left( \frac{\Delta M_i}{\Delta M_{std1}} \right)^m}{n_t} \right)^{-m} \quad (6.11)$$

### 6.3.3. Curvas S-N Adotadas

As curvas S-N para detalhes em estruturas de aço podem ser representadas por curvas com inclinação constante,  $m=3$ , ou por curvas com duas inclinações,  $m=3$  e  $m=5$  (ver itens 2.2 e 4.4.3).

Com o intuito de se desenvolver um modelo de cargas independente do detalhe analisado, os danos acumulados, necessários à definição da variação de tensão equivalente, serão calculados considerando-se curvas S-N simplificadas.

As curvas S-N simplificadas foram adotadas no desenvolvimento dos trens tipos de fadiga do Eurocódigo, conforme exposto por SANPAOLESI e CROCE (2005). São curvas com inclinação única,  $m=3$  ou  $m=5$ , e com o limite de *cut-off* não definido.

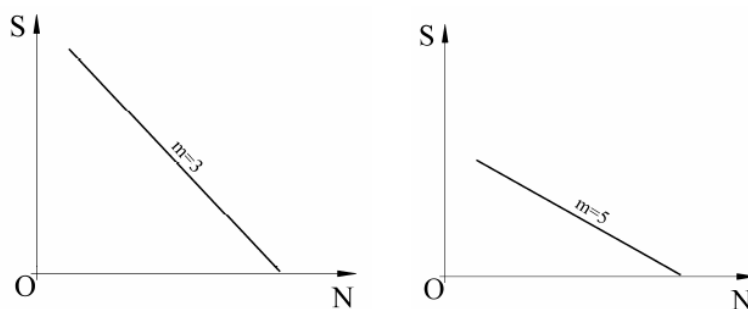


Figura 6.2 – Curvas S-N simplificadas com inclinação igual a  $m=3$  e  $m=5$  (SANPAOLESI e CROCE, 2005)

A razão de se adotar as possíveis curvas S-N simplificadas com inclinações  $m=3$  ou  $m=5$  advém do fato das curvas S-N do Eurocódigo (EN1993-1-9, 2005) possuem trechos com estas duas inclinações.

A não observância do limite de cut-off nas curvas S-N simplificadas pode ser justificada através da explicação dada pela norma britânica (BS-5400-10, 1980), em seu anexo A.2, já discutida no item 2.2. Dessa forma, a adoção de curvas S-N simplificadas torna a análise mais segura.

No cálculo da variação de tensão equivalente, os danos provocados pelo espectro de tensões e pela variação de tensão equivalente devem ser igualados. Nesse processo, o fator que identifica as categorias de detalhes (C) desaparece da equação. Dessa forma, para a definição da variação de tensão equivalente, o único fator que depende da categoria do detalhe é a inclinação da curva S-N correspondente a cada variação de tensão do espectro.

Com o uso das curvas S-N simplificadas, só haverá uma inclinação para cada curva, não se fazendo necessária a identificação do segmento da curva que a variação de tensão se encontra. Podemos somar a esse fato, a não necessidade de transformação das variações de momentos fletores em variação de tensões exposta no item 6.3.2.



Assim, a adoção dessas curvas S-N simplificadas faz desnecessário o cálculo da variação de tensão no detalhe, tornando a análise independente da categoria do detalhe e das características geométricas dos perfis das longarinas.

Com o objetivo de avaliar o efeito da inclinação das curvas na calibração dos modelos de carga móvel, serão estudados modelos de carga para a verificação à fadiga para os dois tipos de curvas simplificadas, com inclinações  $m$  iguais a 3 e 5.

#### 6.3.4. Cálculo dos Momentos Fletores Devido à Ação do Tráfego Real

Neste item serão apresentadas as premissas adotadas para o cálculo das variações de momento fletor provocadas pela passagem dos veículos do espectro, necessárias para definição do modelo de cargas móveis para verificação de fadiga.

Serão também apresentadas as variações de momento fletor considerando os coeficientes de impacto, para cada categoria de veículo.

##### 6.3.4.1. Posição Transversal dos Veículos na Ponte

Os veículos trafegam pela ponte em faixas, a maioria deles, pelo centro dessas. No entanto, durante a vida útil da ponte, os veículos podem passar em posições distintas na seção transversal, e geram, conseqüentemente, reações de magnitudes diferentes nas longarinas. O Eurocódigo 1 - Parte 2 (2002) apresenta uma distribuição de frequência da posição transversal dos veículos, em relação ao centro da faixa. O gráfico é reproduzido na Figura 6.3.

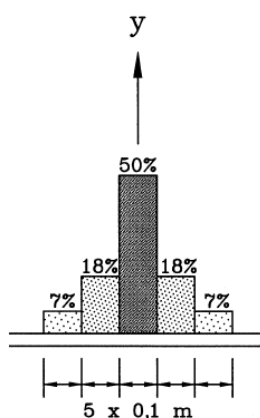


Figura 6.3 – Distribuição de frequência da posição transversal da linha de centro do veículo (EN1991-2, 2002)

Do gráfico apresentado, pode-se concluir que a metade dos veículos trafega centrada na faixa de tráfego e que os desvios em relação ao eixo da faixa de tráfego

não apresentam valores elevados. Pode-se observar também que a distribuição dos desvios com relação ao centro da faixa para a esquerda e para a direita são iguais.

Apesar da relação entre o dano provocado pelo veículo e sua posição transversal na pista não ser linear, neste estudo, será considerado que os veículos do espectro e a carga móvel para verificação da fadiga trafegam pelo centro da faixa. TOLEDO (2011), em seu trabalho, estudou o efeito da posição transversal dos veículos na pista e concluiu que os desvios especificados pelo Eurocódigo não afetam significativamente o dano acumulado nas vigas principais.

Assumindo que todos os veículos do espectro possuem a mesma bitola e que o veículo padrão de fadiga possui essa mesma configuração transversal, é possível proceder ao estudo da fadiga fazendo-se somente uma análise longitudinal da ponte.

Essa simplificação é permitida visto que os esforços provocados pela passagem dos veículos reais e pela carga móvel se distribuem pelas vigas na mesma proporção. Quando realizamos o cálculo do variação de tensão equivalente, ambos os lados da equação serão multiplicados pelo mesmo fator, permitindo que este seja anulado.

$$(X \times \Delta\sigma_{eq,total})^m = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot (X \times \Delta\sigma_{i,total})^m}{n_t} \quad (6.12)$$

$$\Delta\sigma_{eq,total}^m = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot \Delta\sigma_{i,total}^m}{n_t} \quad (6.13)$$

$$\Delta M_{eq,total}^m = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} n_i \cdot \Delta M_{i,total}^m}{n_t} \quad (6.14)$$

onde,

$X$  é o fator que representa a distribuição dos esforços pelas longarinas;

$\Delta\sigma_{eq,total}$  é a variação de tensão equivalente considerando que toda a carga móvel é absorvida por somente uma longarina;

$\Delta\sigma_{i,total}$  é a variação de tensão provocada pela passagem dos veículos do espectro considerando que toda a carga móvel é absorvida por somente uma longarina.

$\Delta M_{eq,total}$  é a variação de momento fletor equivalente considerando que toda a carga móvel é absorvida por somente uma longarina;

$\Delta M_{i,total}$  é a variação de momento fletor provocada pela passagem dos veículos do espectro considerando que toda a carga móvel é absorvida por somente uma longarina.

Assim, para fim da definição do modelo de cargas móveis de fadiga considerando o dano equivalente, os momentos fletores serão calculados considerando que todos os esforços devido à passagem dos veículos são absorvidos por somente uma longarina.

#### **6.3.4.2. Momentos Fletores Máximos para Cada Classe de Veículo**

As análises realizadas neste estudo serão feitas para a seção mais solicitada ao momento fletor. No caso de vigas biapoiadas, essa seção se localiza no meio do vão.

Para todos os vãos de ponte selecionados, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m e 40m, foi avaliada qual a posição longitudinal crítica de cada classe de veículo da base de dados, ou seja, aquela que gera maior momento fletor na seção do meio do vão das longarinas.

A determinação da posição crítica foi feita com base no conceito de linha de influência. A linha de influência é definida obtendo-se os esforços em uma seção específica, provocados por uma força unitária que percorre a estrutura. O esforço na seção em estudo pode ser calculado multiplicando-se a carga concentrada sobre a estrutura pela ordenada correspondente da linha de influência. No caso de cargas distribuídas, o esforço será obtido através da área do gráfico da linha de influência sob a carga distribuída.

A Figura 6.4 apresenta a linha de influência longitudinal de uma viga principal da ponte para a seção do meio do vão.

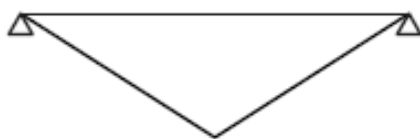


Figura 6.4 – Linha de influência longitudinal de uma viga principal biapoiada na seção do meio do vão

A equação que define o valor das ordenadas da linha de influência apresentada na Figura 6.4 é a seguinte:

$$y(x) = \begin{cases} \frac{x}{2} & \text{se } 0 \leq x \leq l/2 \\ \frac{(-x+l)}{2} & \text{se } l/2 < x \leq l \end{cases} \quad (6.15)$$

onde,

$x$  é a posição da carga concentrada na linha de influência;

$y(x)$  é o valor da ordenada na posição  $x$ ;

$l$  é o comprimento do vão considerado.

Os veículos pertencentes ao banco de dados são compostos por cargas concentradas, divididas em eixos. Dessa forma, a posição longitudinal crítica será aquela em que o somatório do produto das cargas concentradas nos eixos pelas ordenadas correspondentes for o máximo possível.

No geral, a posição longitudinal do veículo na ponte que gerará o maior momento fletor no meio do vão é aquela onde o eixo mais pesado está posicionado no centro da ponte. Contudo, o banco de dados do tráfego contempla um grande número de classes de veículos e categorias de pesos. Essas classes são compostas por veículos com quantidade de eixos que variam de dois a nove eixos. Considerando-se a faixa de comprimentos de vão, em algumas situações o comprimento do veículo excede o comprimento da ponte, sendo necessária uma avaliação mais detalhada em relação à posição longitudinal do veículo que gerará maior esforço na seção do meio do vão.

Considerando-se o elevado número de situações a serem analisadas, foi desenvolvida uma automatização para definição da posição longitudinal crítica de cada classe de veículo. A rotina de cálculo foi desenvolvida com o uso do software *Microsoft Visual Basic*, associado a uma planilha *Excel*. O Apêndice B apresenta o código desenvolvido.

Além da definição da posição crítica, a rotina de cálculo também possibilita o cálculo automatizado do momento fletor máximo no meio do vão. O momento fletor máximo é obtido multiplicando-se os valores das ordenadas da linha de influência para o meio do vão nas posições das cargas concentradas pelos pesos totais dos respectivos eixos.

A seguir são apresentados os momentos fletores máximos no meio do vão referentes à classe 3C, para um vão igual a 30m (Tabela 6.1). Serão também apresentados esses resultados considerando-se os coeficientes de impacto da atual normalização brasileira (NBR 7187, 2003) e da proposta de mudança da norma (TIMERMAN e BEIER, 2012), apresentados no capítulo 3. Os valores dos momentos fletores máximos para algumas das classes de veículos e comprimentos de vão, considerando os coeficientes de impacto, assim como as posições longitudinais críticas, dadas em relação ao início da ponte ( $x=0$ ), são apresentadas nos Apêndices C e D.

Tabela 6.1 – Momentos fletores máximos no meio do vão sem coeficiente de impacto – Veículo 3C

Faixa de Peso	M <sub>max</sub> (kN.m) sem coeficiente de impacto						
	10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m
1	128.50	215.97	304.62	393.27	481.92	570.57	659.22
2	187.01	312.93	440.46	567.98	695.51	823.03	950.56
3	245.52	409.90	576.30	742.70	909.10	1075.50	1241.90
4	304.03	506.86	712.14	917.41	1122.69	1327.96	1533.24
5	362.54	603.83	847.98	1092.13	1336.28	1580.43	1824.58
6	421.05	700.80	983.82	1266.85	1549.87	1832.90	2115.92
7	479.57	797.76	1119.66	1441.56	1763.46	2085.36	2407.26
8	538.08	894.73	1255.50	1616.28	1977.05	2337.83	2698.60
9	596.59	991.69	1391.34	1790.99	2190.64	2590.29	2989.94
10	655.10	1088.66	1527.19	1965.71	2404.24	2842.76	3281.29

Tabela 6.2 – Momentos fletores máximos no meio do vão com coeficiente de impacto da NBR 7187 (2003) – Veículo 3C

Faixa de Peso	M <sub>max</sub> (kN.m) com coeficiente de impacto da NBR7187						
	10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m
1	170.91	279.68	383.82	481.75	573.48	659.00	738.32
2	248.73	405.25	554.98	695.78	827.65	950.60	1064.62
3	326.54	530.82	726.14	909.81	1081.83	1242.20	1390.93
4	404.36	656.39	897.30	1123.83	1336.00	1533.80	1717.23
5	482.18	781.96	1068.46	1337.86	1590.17	1825.40	2043.53
6	560.00	907.53	1239.61	1551.89	1844.35	2117.00	2369.83
7	637.82	1033.10	1410.77	1765.91	2098.52	2408.59	2696.13
8	715.64	1158.67	1581.93	1979.94	2352.69	2700.19	3022.44
9	793.46	1284.24	1753.09	2193.97	2606.87	2991.79	3348.74
10	871.28	1409.81	1924.25	2407.99	2861.04	3283.39	3675.04

Tabela 6.3 – Momentos fletores máximos no meio do vão com coeficiente de impacto proposto para nova NBR 7187 (TIMERMAN e MARTIN, 2012) – Veículo 3C

Faixa de Peso	$M_{max}$ (kN.m) com nova proposta de coeficiente de impacto						
	10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m
1	173.90	286.41	396.87	504.43	609.62	712.87	814.50
2	253.09	415.00	573.85	728.53	879.82	1028.31	1174.47
3	332.27	543.59	750.83	952.63	1150.01	1343.74	1534.43
4	411.46	672.18	927.82	1176.74	1420.20	1659.17	1894.40
5	490.64	800.77	1104.80	1400.84	1690.39	1974.61	2254.37
6	569.83	929.36	1281.78	1624.94	1960.59	2290.04	2614.34
7	649.01	1057.96	1458.76	1849.04	2230.78	2605.48	2974.31
8	728.20	1186.55	1635.74	2073.15	2500.97	2920.91	3334.27
9	807.38	1315.14	1812.72	2297.25	2771.16	3236.34	3694.24
10	886.57	1443.73	1989.70	2521.35	3041.36	3551.78	4054.21

### 6.3.5. Configurações para os Veículos Padrão de Fadiga

Neste trabalho, foram selecionadas três configurações de veículo padrão de fadiga como proposta de modelo de cargas móveis para verificação de fadiga no Brasil, baseado no conceito de dano equivalente. Essas configurações foram escolhidas através de critérios próprios.

Para fins comparativos, além dessas três configurações de veículo padrão propostas, ainda foram feitas as calibrações do modelo de cargas móveis para equivalência de dano para as configurações de veículo padrão de fadiga das normas AASHTO e Eurocódigo 1. A configuração do modelo de cargas móveis europeu é a apresentada como FLM3. Para simplificar esta análise, as bitolas dos veículos padrão das normas estrangeiras foram alteradas, de forma a serem iguais à média das bitolas dos veículos pertencentes ao espectro, 1,90m.

#### 6.3.5.1. Configuração em Tandem Duplo (V1)

A primeira proposta de configuração é a de um modelo de cargas móveis próximo a um tandem duplo. Neste trabalho será denominado V1. A escolha dessa configuração deve-se ao fato de ROSSIGALI (2013), em seu trabalho visando o desenvolvimento de um novo modelo de cargas móveis para verificação do Estado Limite Último em pontes rodoviárias brasileiras, ter proposto essa configuração para a carga móvel (ver a Figura 4.3). A utilização de um modelo de cargas móveis para verificação de fadiga com mesma configuração que o modelo de cargas utilizado para

Estado Limite Último, com cargas proporcionais, seguiria a proposta da atual normalização brasileira para pontes de concreto.

O V1 terá uma bitola corresponde à bitola média dos veículos da base de dados, igual a 1,90m, com uma distância longitudinal entre eixos igual a 1,30m. O peso total do veículo será considerado distribuído igualmente nas quatro rodas.

#### **6.3.5.2. Veículo 3C (V2)**

A segunda proposta de configuração de veículo visa escolher como modelo de cargas móveis a configuração de veículo real que provoca o maior dano acumulado na estrutura, considerando o espectro de variações de tensões já apresentado. Após a análise dos dados disponíveis, conclui-se que o veículo 2S3 é aquele que resulta em um maior dano acumulado, no entanto, o veículo 3C é o mais frequente e também resulta em um dano acumulado elevado em relação aos demais veículos. Também por ter um comprimento menor, mais adequado à análise de vãos com comprimento reduzido, essa configuração foi a escolhida.

A Tabela 6.4, para fins de ilustração, apresenta o dano acumulado causado por cada classe de veículo, para um detalhe com  $\Delta\sigma_c$  igual a 112 MPa, segundo o Eurocódigo 3 – Parte 1-9 (2005). Nesse cálculo foi considerado que os veículos circulam pelo centro da faixa e que a seção transversal mista da viga principal extrema, no meio do vão, possui momento de resistência à flexão em relação às fibras inferiores, para cargas de curta duração, igual a  $w_{inf} = 6,46 \times 10^7 mm^3$ . O cálculo dos danos foi realizado considerando-se as curvas S-N propostas pelo Eurocódigo, desconsiderando o limite de *cut-off*. A Tabela 6.4 apresenta os danos acumulados em ordem decrescente conforme os resultados para o vão de 20m.

Este segundo modelo de cargas móveis será denominado V2 e é composto por 3 eixos, afastados transversalmente de 1,90m. As distâncias longitudinais entre os eixos serão as mesmas do veículo da classe 3C do banco de dados, ou seja, com 5,2m entre o primeiro e o segundo eixo e 1,3m entre o segundo e o terceiro eixo.

A distribuição do peso total pelos eixos para o V2 foi feita obtendo-se a distribuição média dentro das categorias de peso da classe de veículo 3C. Dessa forma, chegou-se a seguinte distribuição: 15% do peso total no primeiro eixo e 42,5% em cada um dos eixos traseiros.

Tabela 6.4 – Dano acumulado causado por cada classe de veículo para um detalhe com  $\Delta\sigma_c$  igual a 112, segundo o Eurocódigo 3 – Parte 1-9 (2005)

Classe de Veículo	Dano Total Vão=20m	Dano Total Vão=40m
<b>2S3-L</b>	<b>5.07E-03</b>	<b>1.17E-02</b>
3BB	5.06E-03	1.09E-02
3T4	3.15E-06	3.44E-04
3S3-L	2.84E-06	1.98E-04
<b>2S3-C</b>	<b>2.31E-06</b>	<b>1.05E-04</b>
3S3-C	1.36E-06	7.24E-05
3I3	9.28E-07	8.48E-05
3T6	4.41E-07	1.19E-04
<b>3C</b>	<b>3.09E-07</b>	<b>1.09E-05</b>
3M6	2.80E-07	3.58E-05
2I3	1.38E-07	9.34E-06
3I1	1.14E-07	9.07E-06
3D4	1.05E-07	1.17E-05
2S2	1.03E-07	9.41E-06
2I1	6.43E-08	4.22E-06
2C3	5.81E-08	3.86E-06
3C3	5.40E-08	5.29E-06
2I2	3.78E-08	3.12E-06
3S2	2.78E-08	2.82E-06
3CB	1.86E-08	1.12E-06
2CB	1.41E-08	7.79E-07
3C2	1.36E-08	1.62E-06
2C	1.29E-08	4.66E-07
2S1	9.71E-09	1.04E-06
4C	8.43E-09	2.96E-07
2C2	8.25E-09	9.89E-07
3I2	6.89E-09	8.81E-07
3S1	3.82E-09	1.55E-07
2CC	1.45E-09	5.20E-08

### 6.3.5.1. Veículo padrão da NBR 7188 (V3)

A terceira proposta para a configuração do veículo padrão de fadiga é uma adaptação do trem tipo TB45 da NBR7188 para verificação do Estado Limite Último. Essa proposta de modelo de cargas possuirá três eixos afastados de 1,5m. A distância transversal será igual a 1,90m. O peso total do modelo de carga será dividido igualmente entre as seis cargas concentradas.

A Figura 6.5 apresenta as configurações das três propostas de modelo de cargas móveis para verificação de fadiga no Brasil, segundo o nível 2 de verificação,



além das configurações dos veículos padrão de fadiga calibrados para a comparação com os modelos de cargas americano e europeu.

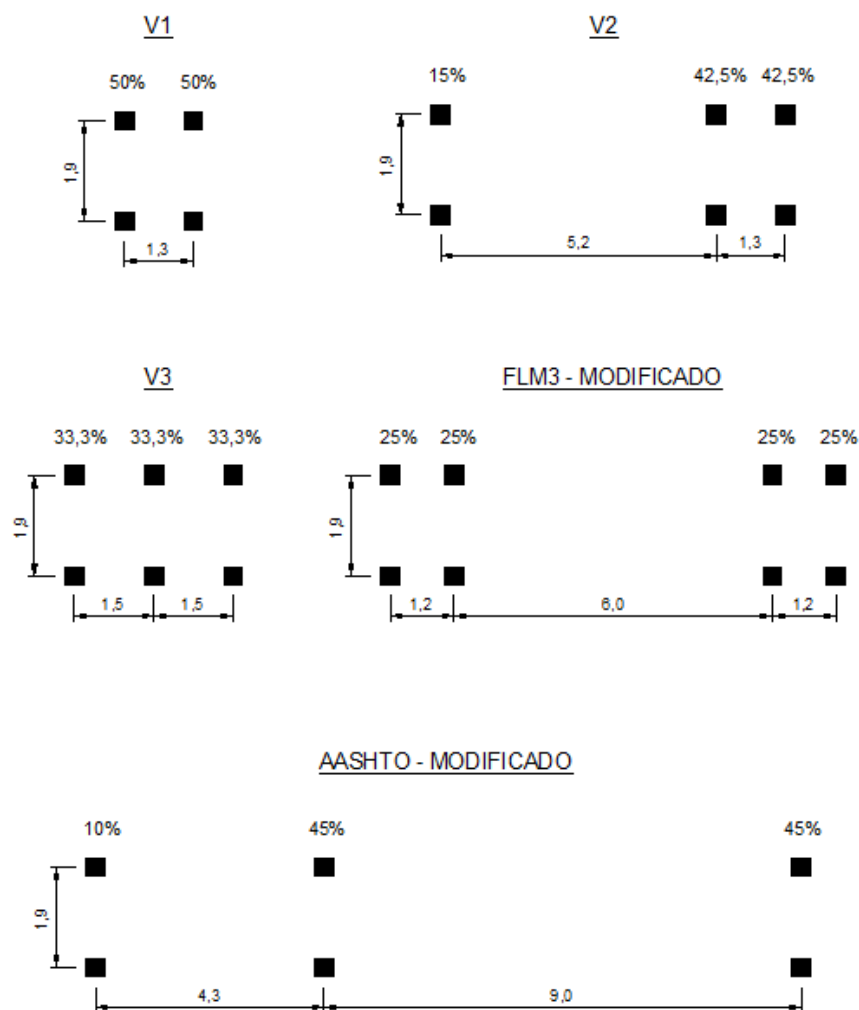


Figura 6.5 – Configurações das propostas de veículo padrão para verificação de fadiga no Brasil, segundo o nível de verificação 2

### 6.3.6. Momentos Fletores Máximos Provocados Pelos Modelos de Carga Móveis Unitários

Para calibração dos modelos de cargas móveis para equivalência de danos, devem ser de conhecimento os momentos fletores máximos gerados pela passagem dos modelos de cargas móveis com peso total unitário.

A definição da posição longitudinal crítica dos modelos de cargas móveis, ou seja, aquela que gera o maior momento fletor na seção do meio do vão, assim como o cálculo desses momentos fletores máximos, foram realizados seguindo o mesmo procedimento adotado para os veículos do espectro.

Através do conceito de linha de influência longitudinal, foi desenvolvida uma rotina de cálculo com o uso do software *Microsoft Visual Basic*, associado a uma planilha *Excel*. A planilha fornece os valores das posições críticas dos eixos dos veículos padrão e o valor do momento fletor máximo no meio de vão, considerando que todo o carregamento é resistido por apenas uma longarina.

A Tabela 6.5 e Tabela 6.6 fazem um resumo, respectivamente, das dimensões longitudinais dos veículos padrão utilizados neste trabalho e da distribuição proporcional do peso total dos modelos de carga móvel pelos eixos. A Tabela 6.7 apresenta as posições críticas para cada um dos modelos de carga móvel e os valores dos momentos fletores máximos no meio do vão.

*Tabela 6.5 – Dimensões longitudinais dos modelos de carga móvel propostos*

Modelo de Cargas	Nº de Eixos	d12 (m)	d23 (m)	d34 (m)
Tandem Duplo (V1)	2	1.30	-	-
Veículo 3C (V2)	3	5.20	1.30	-
Veículo NBR (V3)	3	1.50	1.50	
AASHTO	3	4.30	9.00	-
Eurocódigo (FLM3)	4	1.20	6.00	1.20

*Tabela 6.6 – Distribuição proporcional do peso total dos modelos de carga móvel pelos eixos*

Modelo de Cargas	% Peso Total			
	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4
Tandem Duplo (V1)	50%	50%	-	-
Veículo 3C (V2)	15%	43%	43%	-
Veículo NBR (V3)	33.33%	33.33%	33.33%	-
AASHTO	10%	45%	45%	-
Eurocódigo (FLM3)	25%	25%	25%	25%

*Tabela 6.7 – Posição longitudinal crítica e momento máximo no meio do vão provocado pelos modelos de carga móvel de peso total unitário*

Vão = 10m					
Modelo de Carga	$M_{max}$ (kN.m)	x1 (m)	x2 (m)	x3(m)	x4 (m)
Tandem Duplo	2.18	5.01	3.71	-	-
Veículo 3C	1.85	10.20	5.00	3.70	-
Veículo NBR	2.00	6.50	5.00	3.50	-
AASHTO	1.16	9.30	5.00	-4.00	-
Eurocódigo (FLM3)	1.10	5.00	3.80	-2.20	-3.40

Vão = 15m					
Modelo de Carga	M <sub>max</sub> (kN.m)	x1 (m)	x2 (m)	x3(m)	x4 (m)
Tandem Duplo	3.43	7.50	6.20	-	-
Veículo 3C	3.08	12.70	7.50	6.20	-
Veículo NBR	3.25	9.00	7.50	6.00	-
AASHTO	1.85	11.80	7.50	-1.50	-
Eurocódigo (FLM3)	1.95	9.20	8.00	2.00	0.80
Vão = 20m					
Modelo de Carga	M <sub>max</sub> (kN.m)	x1 (m)	x2 (m)	x3(m)	x4 (m)
Tandem Duplo	4.68	10.00	8.70	-	-
Veículo 3C	4.33	15.20	10.00	8.70	-
Veículo NBR	4.50	11.50	10.00	8.50	-
AASHTO	2.76	14.30	10.00	1.00	-
Eurocódigo (FLM3)	3.20	11.20	10.00	4.00	2.80
Vão = 25m					
Modelo de Carga	M <sub>max</sub> (kN.m)	x1 (m)	x2 (m)	x3(m)	x4 (m)
Tandem Duplo	5.93	12.50	11.20	-	-
Veículo 3C	5.58	17.70	12.50	11.20	-
Veículo NBR	5.75	14.00	12.50	11.00	-
AASHTO	4.01	16.80	12.50	3.50	-
Eurocódigo (FLM3)	4.45	13.70	12.50	6.50	5.30
Vão = 30m					
Modelo de Carga	M <sub>max</sub> (kN.m)	x1 (m)	x2 (m)	x3(m)	x4 (m)
Tandem Duplo	7.18	15.00	13.70	-	-
Veículo 3C	6.83	20.20	15.00	13.70	-
Veículo NBR	7.00	16.50	15.00	13.50	-
AASHTO	5.26	19.30	15.00	6.00	-
Eurocódigo (FLM3)	5.70	16.20	15.00	9.00	7.80
Vão = 35m					
Modelo de Carga	M <sub>max</sub> (kN.m)	x1 (m)	x2 (m)	x3(m)	x4 (m)
Tandem Duplo	8.43	17.50	16.20	-	-
Veículo 3C	8.08	22.70	17.50	16.20	-
Veículo NBR	8.25	19.00	17.50	16.00	-
AASHTO	6.51	21.80	17.50	8.50	-
Eurocódigo (FLM3)	6.95	18.70	17.50	11.50	10.30
Vão = 40m					
Modelo de Carga	M <sub>max</sub> (kN.m)	x1 (m)	x2 (m)	x3(m)	x4 (m)
Tandem Duplo	9.68	20.00	18.70	-	-
Veículo 3C	9.33	25.20	20.00	18.70	-
Veículo NBR	9.50	21.50	20.00	18.50	-
AASHTO	7.76	24.30	20.00	11.00	-
Eurocódigo (FLM3)	8.20	21.20	20.00	14.00	12.80

### 6.3.7. Aplicação do Modelo de Cargas Móveis para Dano Equivalente na Verificação de Fadiga

Para o usuário do modelo de cargas móveis para dano equivalente, a verificação da fadiga é simples. Como o espectro de veículos reais é substituído pelo modelo de carga móvel que produz um dano equivalente ao espectro, a verificação da resistência à fadiga se resume à verificação para a variação de tensão uniforme.

A verificação da resistência à fadiga, utilizando-se o modelo de cargas móveis para dano equivalente, deve ser realizada segundo o procedimento a seguir:

1. Identificação e classificação dos detalhes mais vulneráveis a falhas por fadiga e escolha das curvas S-N apropriadas;
2. Cálculo da variação de tensão na posição do detalhe, provocada pela passagem do modelo de carga móvel. A carga móvel deve transitar centrada na faixa de tráfego e a faixa de tráfego escolhida deve ser aquela que resulta na maior variação de tensão no detalhe.
3. Através da curva S-N adequada, determinar a quantidade de ciclos de variação de tensão constante (variação de tensão calculada na etapa 2), necessários à ruptura do elemento ( $N$ );
4. Considerando os coeficientes de segurança pertinentes (não estabelecidos neste trabalho), comparar o número de ciclos encontrados com a quantidade total de ciclos de tensão durante a VUP ( $n_t$ ), igual a  $1,64 \times 10^8$  ciclos. Caso  $n_t$  seja menor que  $N$ , a verificação de fadiga está satisfeita para o detalhe analisado. Caso contrário, a resistência à fadiga do detalhe deve ser aumentada e a verificação deve ser refeita. A verificação de resistência à fadiga também pode ser feita através da comparação de variação de tensão, conforme a equação 6.17 (ver Figura 4.1 b)

$$\gamma_f n_t < \frac{N}{\gamma_m} \quad (6.16)$$

$$\gamma_f \Delta\sigma_E < \frac{\Delta\sigma_{(nt)}}{\gamma_m} \quad (6.17)$$

onde  $\gamma_f$  e  $\gamma_m$  são os coeficientes de segurança parciais

#### 6.4. Modelo de Cargas Móveis para Equivalência de Variação de Tensão Máxima (Nível 1)

O modelo de cargas móveis para equivalência de variação de tensão máxima será desenvolvido como o objetivo de ser utilizado para verificar se a vida útil à fadiga da estrutura analisada pode ser considerada muito superior à requerida em projeto. Este modelo de cargas será definido como uma proporção do modelo de cargas para Estado Limite Último tomado como referência. As configurações para o modelo de cargas móveis estudadas foram aquelas apresentadas pela NBR7188 (1984), descrita no item 4.2, e a proposta por ROSSIGALI (2013), apresentada no item 4.3.

##### 6.4.1. Metodologia de Cálculo do Fator de Redução para o Modelo de Cargas Móveis

Quando trabalhamos com um espectro de variação de tensão com amplitudes variáveis, para considerarmos que a estrutura submetida aos ciclos de tensões possui resistência à fadiga ilimitada, a variação de tensão máxima deve estar abaixo do limite de fadiga.

Com base nesse princípio, o modelo de cargas móveis para equivalência de variação de tensão máxima será desenvolvido. Para tal, o modelo de cargas móveis deverá produzir uma variação de tensão na estrutura igual à variação de tensão máxima provocada pelo espectro de veículos reais.

$$\Delta\sigma_{cm} = \Delta\sigma_{max} \quad (6.18)$$

$$\frac{\Delta M_{cm.y}}{I} = \frac{\Delta M_{max.y}}{I} \quad (6.19)$$

onde,

$\Delta\sigma_{cm}$  é a variação de tensão na seção analisada, provocada pelo modelo de cargas móveis;

$\Delta\sigma_{max}$  é a máxima variação de tensão na seção analisada, provocada pelos veículos do espectro;

$\Delta M_{cm}$  é a variação do momento fletor na seção analisada, provocada pela passagem pelo modelo de cargas móveis;

$\Delta M_{max}$  é a máxima variação do momento fletor na seção analisada, provocada pela passagem dos veículos reais;

$y$  é a distância entre o centro de gravidade da seção e a fibra onde se pretende calcular a tensão;

$I$  é momento de inércia da seção em torno do eixo paralelo à direção do momento fletor.

Como os dois lados da equação são multiplicados por  $\frac{y}{I}$ , esse fator pode ser cortado em ambos os lados, reduzindo a análise para a variação dos momentos fletores. Essa simplificação torna este modelo de cargas móveis independente das características geométricas dos elementos analisados.

$$\Delta M_{cm} = \Delta M_{max} \quad (6.20)$$

Neste trabalho, a variação de tensão máxima será calculada através da primeira definição dada por SANPAOLESI e CROCE (2005), descrita em (a) no item 4.1. Para tal, os danos relativos à passagem de cada um dos veículos do espectro foram calculados para a ponte descrita no exemplo numérico, no capítulo 8. Os veículos foram organizados em ordem crescente de acordo com a variação de tensão gerada e os danos foram acumulados segundo essa ordem. A variação de tensão máxima será aquela abaixo da qual os danos acumulados perfazem 99% do dano total.

Para cada comprimento de vão analisado obtém-se uma variação de tensão máxima correspondente. A Tabela 6.8 apresenta os veículos do espectro que geram a máxima variação de tensão e a porcentagem do dano total correspondente às variações de tensão abaixo de  $\Delta\sigma_{max}$ , de acordo com o comprimento de vão.

Tabela 6.8 – Veículos do espectro que geram  $\Delta\sigma_{max}$  para cada vão considerado

Vão (m)	Classe de veículo	Categoria de peso	% Dano acumulado
10	3S3-L	11	99.66%
15	2S3-C	11	99.06%
20	3S3-L	10	99.17%
25	3M6	6	99.18%
30	3S3-L	11	99.66%
35	3M6	5	99.05%
40	3S3-C	10	99.02%

O modelo de cargas para a verificação de fadiga segundo o nível de verificação 1 será definido como aquele que gerará nas longarinas um momento fletor igual ao

provocado pela passagem do veículo que produz a máxima variação de tensão. O fator redutor que representa a proporção entre o modelo de cargas para a verificação de fadiga e o modelo de cargas para Estado Limite Último tomado como referência ( $\psi$ ) pode ser obtido da seguinte forma:

$$\psi = \frac{\Delta M_{max}}{\Delta M_{ref}} \quad (6.21)$$

onde,

$\psi$  é o fator redutor;

$\Delta M_{max}$  é a variação de momento fletor na seção analisada correspondente à máxima variação de tensão calculada;

$\Delta M_{ref}$  é a variação de momento fletor na seção analisada provocada pela passagem do modelo de cargas móveis para Estado Limite Último de referência.

#### **6.4.2. Configurações para Modelo de Cargas para Equivalência de Tensão Máxima**

Os modelos de carga móvel para verificação da fadiga segundo o nível 1 de verificação, serão calibrados como uma proporção dos modelos de carga móvel para verificação do Estado Limite Último apresentados pela norma brasileira (NBR7188, 1984) e ROSSIGALI (2013).

A calibração do modelo de cargas móveis da NBR7187 (2003) com os dados de tráfego atuais das rodovias brasileiras possibilitará uma comparação com o modelo de cargas atualmente utilizado para a verificação de fadiga em pontes de concreto. Esta verificação é feita considerando-se 50% da carga total do trem tipo, incluída a carga de multidão.

O modelo de cargas móveis apresentado pela norma brasileira, ilustrado na Figura 4.2, é composto de um veículo com três eixos, totalizando 450kN, e carga distribuída de 5kN/m<sup>2</sup>. Já o modelo de cargas proposto por ROSSIGALI (2013) consiste em um tandem duplo com 850kN de peso total e carga distribuída sobre a ponte de 2kN/m. A Figura 4.3 apresenta a configuração do modelo de cargas móveis de referência proposto por ROSSIGALI (2013).

#### **6.4.3. Cálculo dos Momentos Fletores**

Os modelos de cargas móveis propostos para análise da resistência à fadiga segundo a variação de tensão máxima serão compostos por cargas concentradas e

uma carga distribuída sobre a ponte. Por esse motivo, a abordagem adotada para o cálculo do momento máximo será diferente da exposta para o modelo de cargas baseado no conceito de dano equivalente. Não será possível fazer uma análise longitudinal da ponte, sendo necessário analisar a parcela do carregamento resistido por cada uma das longarinas em função da posição transversal do veículo na ponte.

A porcentagem do carregamento que será resistido pela viga da extremidade pode ser obtida através de uma linha de influência da repartição transversal da ponte. As pontes em grelhas com mais de duas vigas possuem boa capacidade de distribuição transversal da carga. Por exemplo, uma carga posicionada sobre a viga extrema, será resistida em aproximadamente 70% pela viga em questão, o restante será distribuído pelas outras longarinas.

A linha de influência da repartição transversal para a viga extrema pode ser obtida da seguinte maneira: Em um modelo estrutural, aplica-se uma carga distribuída longitudinal de  $1\text{ kN/m}$  em cada longarina, uma por vez. Para cada posição da carga distribuída, obtém-se o momento fletor na viga da extremidade. Esses valores são divididos pelo momento devido à carga unitária em uma viga biapoiada ( $qL^2/8$ ). As ordenadas da linha de influência serão iguais aos valores encontrados correspondentes a cada abscissa.

Esse estudo foi realizado em um modelo de grelhas por TOLEDO (2011). O resultado obtido para a linha de influência da viga extrema é apresentado na Figura 6.6.

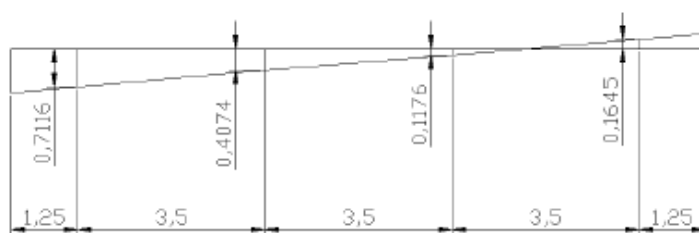


Figura 6.6 – Linha de influência transversal da viga de extremidade (TOLEDO,2011)

A parcela da carga concentrada resistida pela viga de extremidade é obtida multiplicando as ordenadas referentes às posições das cargas concentradas pelo respectivo carregamento. Quanto ao carregamento distribuído sobre a ponte, este pode ser reduzido a uma carga uniformemente distribuída sobre a longarina extrema com valor igual à carga distribuída por unidade de área multiplicada pela área positiva da linha de influência da repartição transversal, desconsiderando as barreiras laterais.

Como o modelo de cargas para verificação de fadiga de nível 1 é baseado em um modelo de cargas para Estado Limite Último, as cargas móveis dos dois modelos



devem ser aplicadas sobre o tabuleiro na mesma posição, ou seja, aquela adotada para a análise de Estado Limite Último. A posição transversal crítica, é aquela onde o veículo faceia o guarda rodas. Para o veículo padrão da atual norma brasileira (NBR 7188, 1984), a carga concentrada deve ser posicionada a 0,5m de distância do guarda rodas, já para o modelo de cargas móveis nº1 proposto por ROSSIGALI (2013), a carga concentrada deve ser posicionada no limite do guarda rodas.

Para o cálculo do momento fletor máximo provocado pelos veículos do espectro de veículos reais, deverá ser considerada a posição transversal mais frequente, nesse caso, o veículo centrado na faixa extrema. Com o objetivo de simplificar a análise, será considerado que todos os veículos do espectro possuem uma bitola de 1,9m, correspondente à média dos valores das bitolas dos veículos do banco de dados.

As figuras a seguir apresentam os valores das ordenadas da linha de influência para a viga extrema nos pontos de aplicação das cargas concentradas para os veículos do espectro (Figura 6.7), o modelo de cargas móveis da NBR7188 (Figura 6.8) e o modelo proposto nº 1 de ROSSIGALI (Figura 6.9). Na Figura 6.10 é apresentada a posição da carga distribuída a ser considerada na análise e os valores das ordenadas da linha de influência necessários ao cálculo da parcela da carga distribuída resistida pela viga de extremidade.

Na Tabela 6.8, são apresentados os momentos fletores máximos correspondentes aos veículos que geram a máxima variação de tensão. Esses valores foram calculados para a seção do meio do vão, considerando os veículos centrados na pista e na posição longitudinal crítica. Foram considerados dois coeficientes de impacto diferentes: o presente na norma brasileira atual (NBR7187, 2003) e o proposto para mudança desta norma.

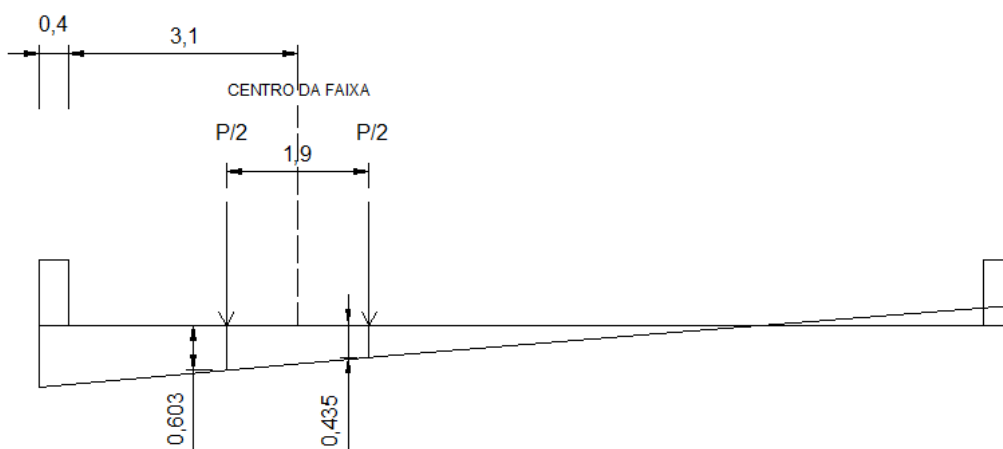


Figura 6.7 – Valores das ordenadas da linha de influência transversal para a viga de extremidade nas posições dos eixos dos veículos do espectro. Dimensões em metros

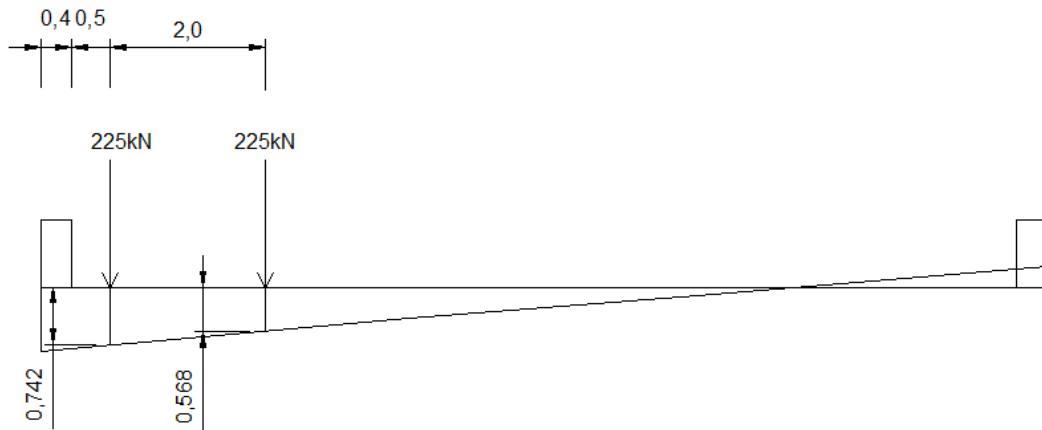


Figura 6.8 – Valores das ordenadas da linha de influência transversal para a viga de extremidade nas posições dos eixos do veículo padrão da NBR 7188 (1984). Dimensões em metros

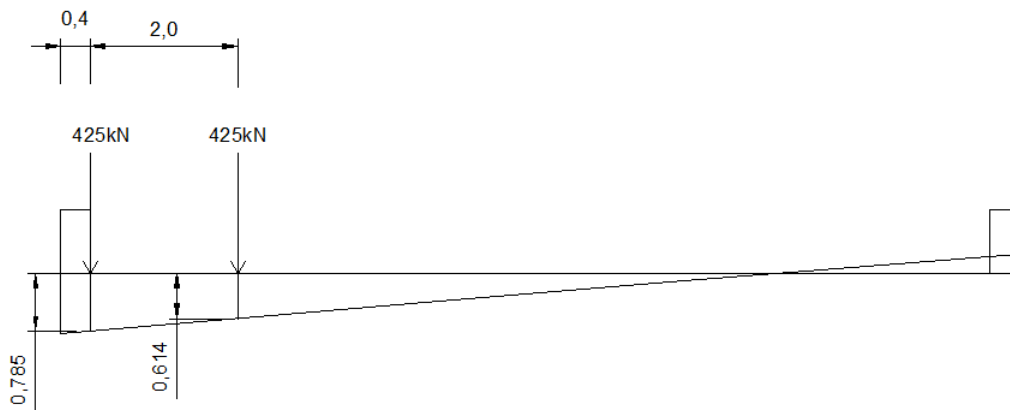


Figura 6.9 – Valores das ordenadas da linha de influência transversal para a viga de extremidade nas posições dos eixos do veículo padrão nº1 proposto por ROSSIGALI (2013). Dimensões em metros

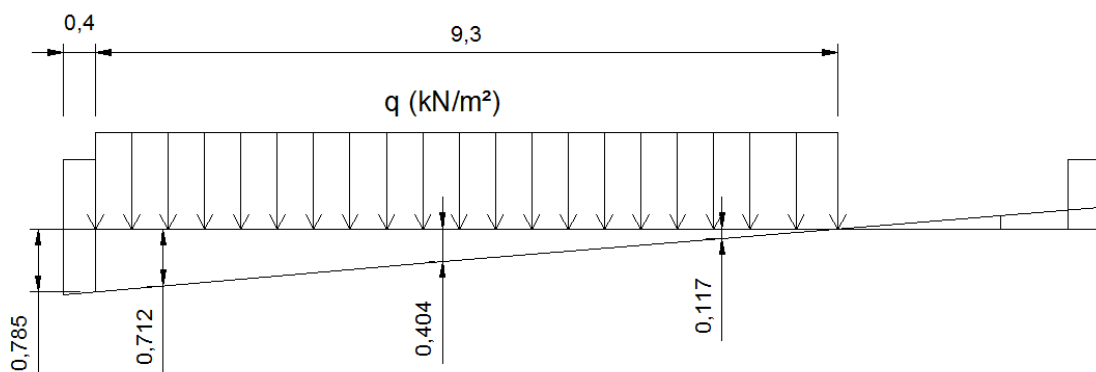


Figura 6.10 – Posição da carga distribuída sobre a linha de influência e valores das ordenadas nos pontos de interesse. Dimensões em metros

Tabela 6.9 – Momentos fletores referentes a  $\Delta\sigma_{max}$ , no meio do vão, com coeficiente de impacto da atual NBR 7187 (2003) e proposta de revisão (TIMERMAN e MARTIN,2012)

Vão (m)	Veículo para $\Delta\sigma_{max}$		$M_{max}$ (kN.m)	
	Classe de Veículo	Categoria de peso	Coef. de Imp. da NBR atual	Coef. de Imp. da nova NBR
10	3S3-L	11	657	669
15	2S3-C	11	1001	1025
20	3S3-L	10	1430	1478
25	3M6	6	1876	1965
30	3S3-L	11	2603	2767
35	3M6	5	2802	3031
40	3S3-C	10	3205	3536

#### 6.4.4. Aplicação do Modelo de Cargas Móveis para Equivalência de Variação de Tensão Máxima

A utilização do modelo de cargas móveis para equivalência de variação de tensão para verificação da resistência à fadiga de pontes resulta em uma análise conservadora, já que somente avalia se a vida útil de fadiga da estrutura é muito superior à requerida em projeto. A verificação da resistência a fadiga consiste, portanto, em avaliar se a variação de tensão causada pelo modelo de cargas móveis é inferior ao limite de fadiga.

Dessa forma, a verificação da resistência à fadiga deve ser realizada segundo o procedimento a seguir:

1. Identificação e classificação dos detalhes mais vulneráveis a falhas por fadiga e escolha das curvas S-N apropriadas. Pode-se optar pelo uso das curvas S-N com uma ou duas inclinações;
2. Cálculo da variação de tensão na posição do detalhe provocada pela passagem modelo de carga móvel para Estado Limite Último adequado. A carga móvel deve transitar faceando o guarda rodas e a carga distribuída deve também ser considerada em toda a ponte, desconsiderando as áreas que diminuem o momento fletor gerado na longarina em estudo;
3. Multiplicar a variação de tensão máxima obtida pelo fator redutor  $\psi$  especificado;
4. Obter, através da curva S-N adotada para cada detalhe, a variação de tensão correspondente ao limite de fadiga ( $\Delta\sigma_D$ ). Considerando os coeficientes de

segurança adequados, avaliar se a variação de tensão provocada pelo veículo padrão de fadiga é inferior ao limite de fadiga;

$$\gamma_f \Delta\sigma_{m\acute{a}x} \leq \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_m} \quad (6.22)$$

5. Caso a equação 6.22 seja verdadeira, a verificação de fadiga está satisfeita para o detalhe analisado, indicando que a vida útil é muito superior à requerida pelo projeto. Caso contrário, a resistência à fadiga do detalhe deve ser avaliada utilizando o modelo de cargas móveis pelo dano equivalente.

## **7. ANÁLISES E RESULTADOS**

Neste item, serão apresentados os resultados obtidos para a calibração dos modelos de cargas móveis propostos para análise de fadiga no Brasil. Os modelos de carga foram calibrados a partir dos momentos fletores máximos no meio do vão, gerados pelo espectro de veículos reais.

Para a análise dos modelos de cargas móveis para dano equivalente, os momentos fletores máximos foram calculados considerando-se que todo o carregamento é resistido por uma única longarina, já que se concluiu que o desenvolvimento destes modelos de carga para verificação da fadiga pode ser feito a partir de uma análise longitudinal da ponte. Já para o desenvolvimento do modelo de cargas móveis para equivalência de variação de tensão máxima, os momentos fletores na viga extrema foram calculados considerando os veículos do espectro centrados na faixa de tráfego e o veículo padrão faceando o guarda rodas.

Os modelos de carga calibrados já terão a parcela dinâmica incluída, não sendo necessário que o usuário multiplique as tensões geradas pelo veículo padrão de fadiga por um coeficiente de impacto. Serão feitas as calibrações considerando-se dois coeficientes de impacto: o recomendado pela atual normalização brasileira, NBR7187 (2003), e a proposta de revisão dessa norma, apresentada por TIMERMAN e MARTIN (2012).

Serão propostos dois modelos de carga, desenvolvidos através de duas abordagens distintas de verificação da resistência à fadiga. No item 7.1 serão analisados os resultados obtidos para os modelos de carga desenvolvidos por equivalência de dano, enquanto no 7.2 serão apresentados os resultados para a calibração dos modelos de carga móvel através da equivalência de variação de tensão máxima.

Para o modelo de cargas móveis por equivalência de dano, será analisada também a influência da inclinação das curvas S-N na calibração dos modelos.

### **7.1. MF3 - Modelo de Equivalência de Danos**

#### **7.1.1. Resultados e Discussões**

O modelo de cargas móveis por equivalência de dano foi desenvolvido igualando-se o dano provocado pela passagem do espectro de veículos reais ao dano causado pela passagem do modelo de cargas móveis. Esse modelo deverá ser utilizado para uma avaliação da resistência à fadiga de nível 2, conforme descrito no item 4.1. A verificação da resistência à fadiga é realizada através da comparação da

vida útil de projeto calculada com relação à vida útil esperada, adotada igual a 75 anos.

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos para o peso total  $P$  dos modelos de carga móvel de acordo com o comprimento do vão da ponte. Serão apresentadas as análises realizadas para consideração das curvas S-N com inclinação  $m$  igual a 3 e 5, além da variação do coeficiente de impacto.

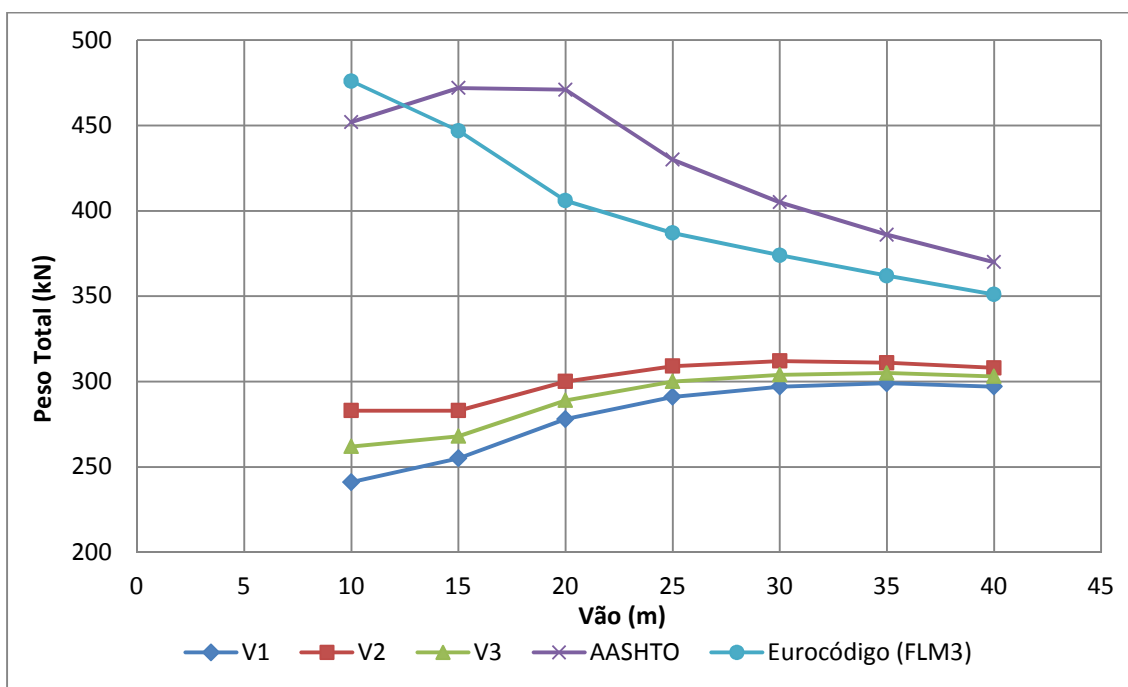


Figura 7.1 - Peso total do modelo de cargas móveis MF3, considerando  $m=3$  e o coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003)

De forma geral, em todos os cenários analisados os modelos de carga móvel apresentam o mesmo comportamento. Para todas as configurações de veículo, as curvas são assintóticas e tendem para um mesmo ponto. Para vãos maiores, a configuração dos modelos de carga, dentro do universo analisado, não possui muita influência sobre o peso total do veículo padrão necessário para que este provoque um dano equivalente ao espectro de veículos reais.

Dentro da faixa de vãos analisada, as configurações de modelo de cargas móveis propostas pelas normas AASHTO e Eurocódigo resultaram em pesos totais mais elevados que os obtidos com os demais modelos de carga. A resposta para esse comportamento está nos momentos fletores produzidos pelos veículos unitários destes modelos de carga, os quais são reduzidos com relação aos impostos pelos demais modelos. Por terem um comprimento maior, na situação onde os vãos são pequenos, alguns eixos do veículo padrão da norma AASHTO e do Eurocódigo ficam afastados

do centro da ponte, ou até mesmo fora dela, como por exemplo, pontes com vão de 10m, resultando em momentos fletores menores, e conseqüentemente um dano por ciclo menor.

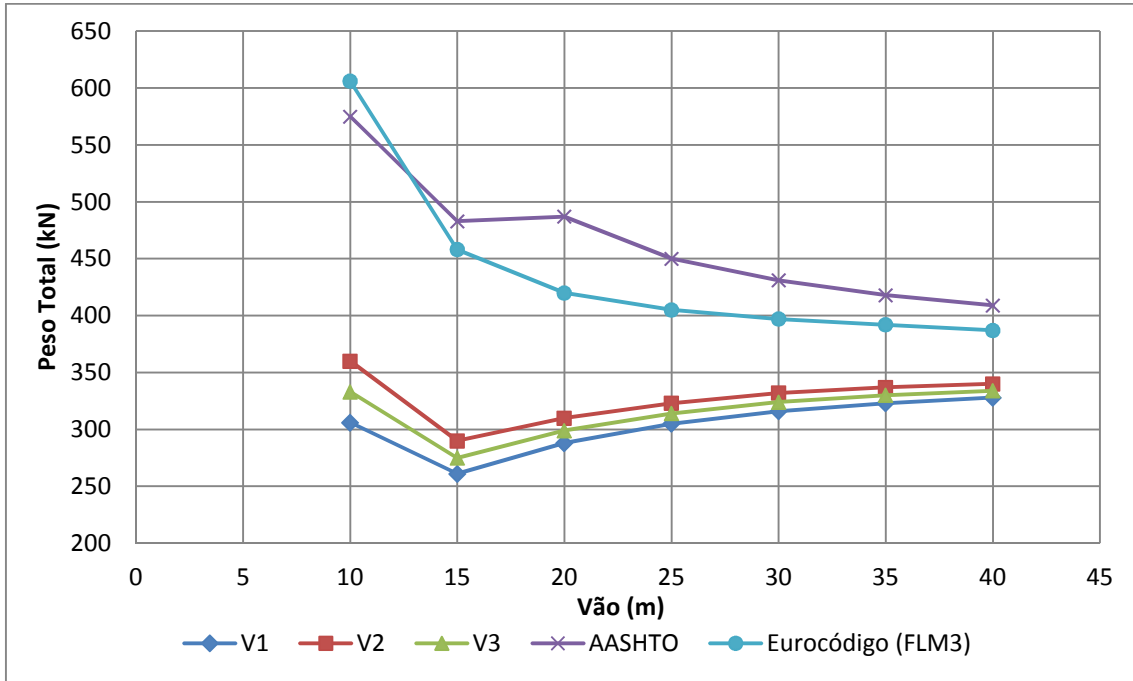


Figura 7.2 - Peso total do modelo de cargas móveis MF3, considerando  $m=3$  e a proposta de revisão do coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003)

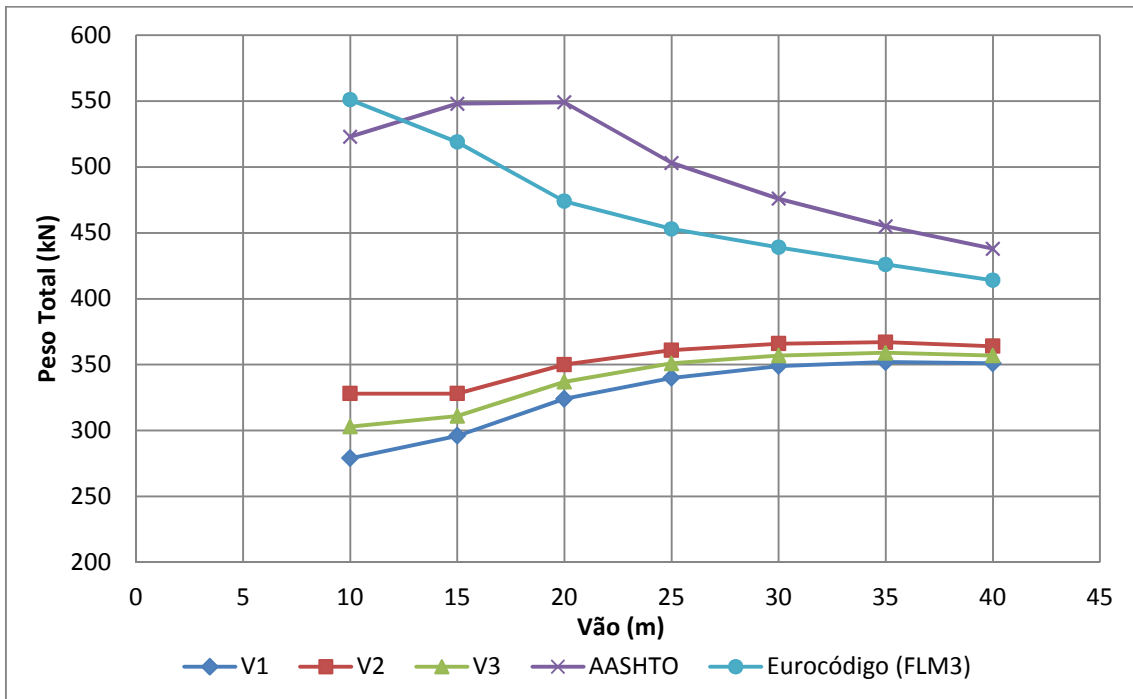


Figura 7.3 - Peso total do modelo de cargas móveis MF3, considerando  $m=5$  e o coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003)

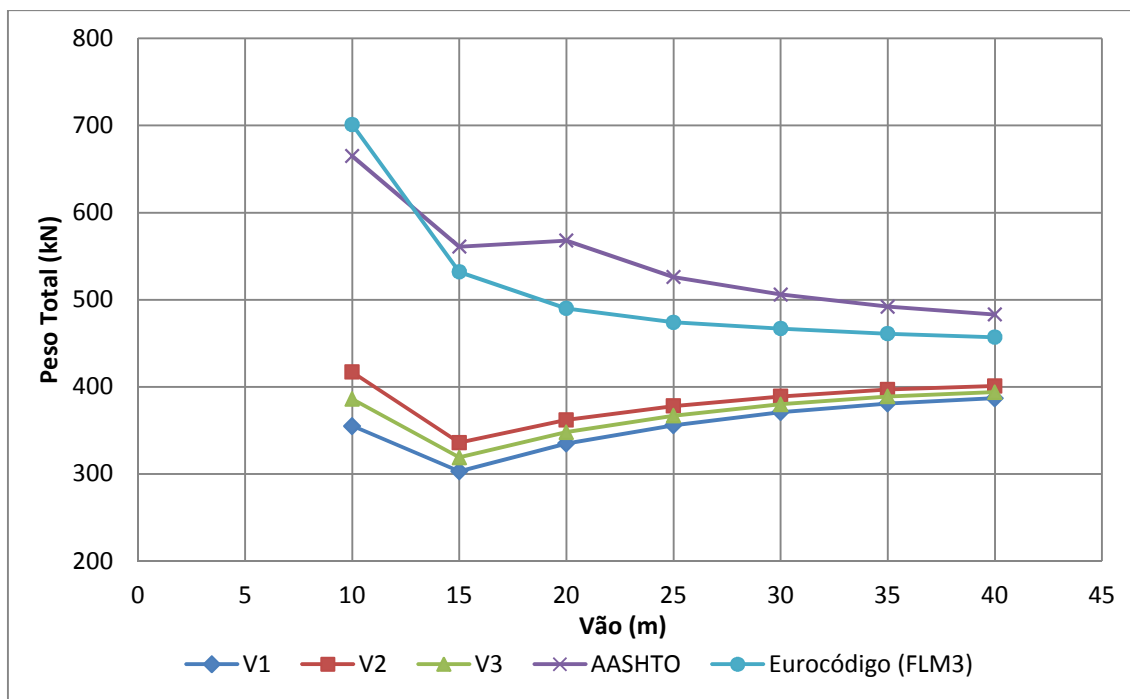


Figura 7.4 - Peso total do modelo de cargas móveis MF3, considerando  $m=5$  e a proposta de revisão do coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003)

No que diz respeito ao coeficiente de impacto adotado, como já apresentado no item 3.3.4 deste trabalho, a proposta de revisão do coeficiente de impacto da norma NBR7187 (2003) resulta em valores maiores que aqueles obtidos com a atual formulação, principalmente para vãos inferiores a 10m, onde ainda se aplica um coeficiente adicional de amplificação dos esforços dinâmicos. Esse fato se reflete na calibração dos modelos de cargas móveis para a verificação da fadiga. Quando se utiliza a nova proposta de coeficiente de impacto, os pesos totais são mais elevados, resultando em modelos de carga mais conservadores. Tendo isso em vista, a proposta do modelo de cargas MF3 será calibrada levando-se em consideração os resultados obtidos com a revisão proposta para o coeficiente de impacto da NBR7187 (2003).

Com relação à influência da inclinação da curva S-N simplificada adotada, os pesos totais dos veículos padrão obtidos com a utilização da inclinação  $m=5$  são mais elevados. SANPAOLESI e CROCE (2005) concluíram que para o espectro de veículos utilizado no desenvolvimento dos modelos de carga do Eurocódigo 1, os modelos calibrados com curvas S-N com inclinação igual a 5 não apresentavam erros significativos e reproduziam bem o dano real na estrutura.

Juntando o fato de nas estruturas de pontes usuais, a maior parte dos ciclos de variação de tensões provocados pelos veículos reais se encontrarem abaixo do limite de fadiga, ou seja, na região onde as curvas S-N com duas inclinações apresentam inclinação  $m=5$ , decidiu-se que o modelo final de cargas móveis para verificação de



fadiga por equivalência de danos será calibrado considerando-se os resultados obtidos com a inclinação das curvas S-N igual a 5.

### 7.1.2. Comparação dos Modelos de Carga Calibrados com Dados do Tráfego Real com os Modelos de Cargas Móveis da AASHTO e Eurocódigo 1

O estudo realizado para o desenvolvimento de um modelo de cargas para verificação da fadiga em pontes de rodovias brasileira pode também ser utilizado para verificar a validade da utilização dos modelos de carga das normas estrangeiras para verificação de pontes da malha rodoviária nacional.

O modelo de cargas da norma AASHTO (2007), considerando um coeficiente de impacto igual a 1,15, conforme especificado pela norma americana, será comparado aos resultados obtidos com a configuração do veículo padrão desta norma para o cenário selecionado no item 7.1.3. O peso total do veículo padrão de fadiga da norma AASHTO em vigor é igual ao somatório das cargas em cada um dos eixos, multiplicado pelo coeficiente de impacto.

$$P_{AASHTO} = (35 + 145 \times 2) \times 1,15 = 374 \text{ kN} \quad (7.1)$$

O modelo de cargas móveis FLM3 do Eurocódigo 1 (2002) será também comparado com os resultados obtidos com o conceito de dano equivalente, segundo o cenário selecionado. Para que seja possível fazer essa comparação, o modelo de cargas FLM3 será ajustado pelos fatores  $\lambda$ . Será considerada uma vida útil de fadiga de 75 anos, peso médio dos veículos igual 328 kN e um volume médio diário de 6000 veículos na faixa lenta ( $2,19 \times 10^6$  veículos/ano). A Tabela 7.1 apresenta os valores dos fatores  $\lambda$  calculados e o peso total do veículo padrão do FLM3 do Eurocódigo ajustado de acordo com o método do coeficiente  $\lambda$ .

Tabela 7.1 – Peso total do veículo FLM3 do Eurocódigo ajustado pelo coeficiente  $\lambda$

Vão (m)	P total (kN)	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_3 \times \lambda_4$	$\lambda_{max}$	P total x $\lambda$ (kN)
10	480	2.55	0.92	0.94	1.00	2.21	2.50	1061
15	480	2.50	0.92	0.94	1.00	2.17	2.33	1040
20	480	2.45	0.92	0.94	1.00	2.12	2.17	1019
25	480	2.40	0.92	0.94	1.00	2.08	2.00	960
30	480	2.35	0.92	0.94	1.00	2.04	2.00	960
35	480	2.30	0.92	0.94	1.00	1.99	2.00	957
40	480	2.25	0.92	0.94	1.00	1.95	2.00	936

As figuras a seguir apresentam a comparação dos resultados para os pesos totais do modelo de cargas obtidos com os dados das rodovias brasileiras através da equivalência de danos e os modelos de cargas móveis das atuais normas internacionais.

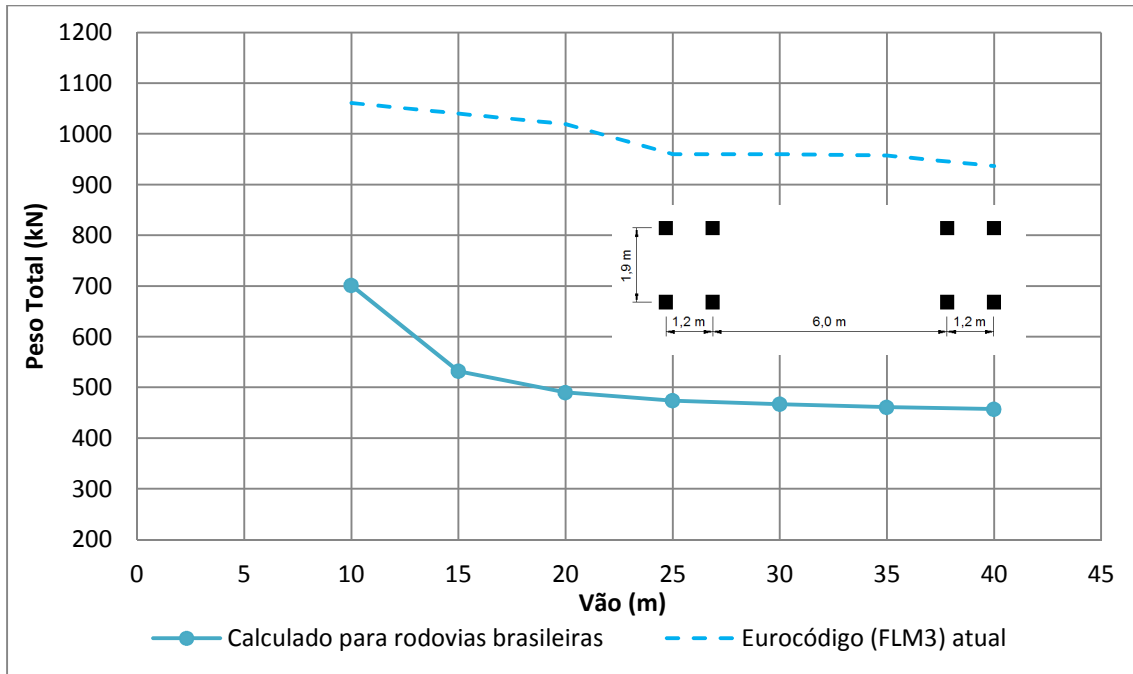


Figura 7.5 - Comparação entre o peso total do veículo padrão FLM3 do Eurocódigo e peso total do veículo padrão com a mesma configuração, calibrado com os dados das rodovias brasileiras

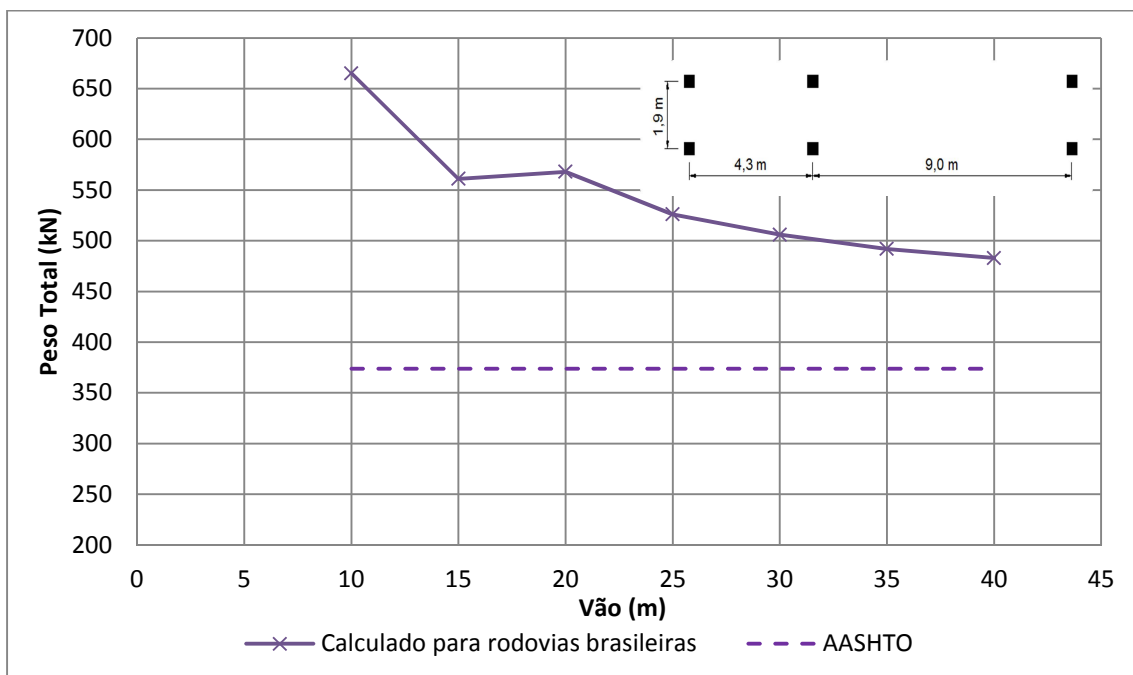


Figura 7.6 - Comparação entre o peso total do veículo padrão da AASHTO e peso total do veículo padrão com a mesma configuração, calibrado com os dados das rodovias brasileiras

Observando o gráfico apresentado na Figura 7.5, é possível concluir que o modelo de cargas móveis para verificação de fadiga composto por um único veículo proposto pela atual normalização europeia, desenvolvido por equivalência de dano (FLM3), quando ajustado pelo método do coeficiente  $\lambda$  aos dados do tráfego em rodovias brasileiras, levam a uma análise conservadora da resistência à fadiga em pontes no Brasil.

Já o modelo de cargas móveis proposto pela norma AASHTO (2007) não é adequado à verificação da resistência a fadiga para pontes brasileiras. O peso total do veículo padrão, com a configuração proposta pela AASHTO, necessário para que este produza o mesmo dano que aquele provocado pelo espectro de veículos reais, deveria ser maior que o peso total do veículo padrão atual da norma, conforme apresentado no gráfico da Figura 7.6. A não adequação deste modelo de cargas à análise de fadiga em pontes no Brasil é devida, provavelmente, à diferença na composição do tráfego nas estradas dos dois países e a ausência de fatores de ajuste, como aqueles propostos pelo Eurocódigo.

### **7.1.3. Calibração do Modelo de Cargas**

A escolha da configuração do modelo de cargas móveis que melhor se adapta às características do tráfego nas rodovias brasileiras será baseada nos valores obtidos para o peso total dos veículos, de acordo com o comprimento de vão considerado, no cenário selecionado. Esse cenário é aquele onde foi utilizada a inclinação  $m$  da curva S-N igual a 5 e foi considerado como coeficiente de impacto aquele definido pela proposta de revisão da NBR7187(2003).

Dentre as configurações estudadas para o modelo de cargas móveis (V1, V2 e V3) todas apresentaram comportamento semelhante com relação à variação do peso total do veículo com o comprimento do vão. Todas as configurações mostram um valor para o peso total do veículo padrão um pouco mais elevado para o vão de 10m, comparado ao resultado para o vão de 15m, devido ao coeficiente de impacto adicional aplicado a esse comprimento de vão, e para os demais vãos seguem uma curva suave, tendendo para um valor próximo à 400kN.

Observa-se que todas as configurações estudadas apresentam bom ajuste às características do tráfego rodoviário brasileiro e à faixa de vãos analisada, a escolha da configuração do modelo de cargas móveis para verificação de fadiga em rodovias brasileiras será baseada na praticidade de utilização. Como um novo modelo de cargas móveis para Estado Limite Último foi proposto por ROSSIGALI (2013), tendo como configuração um tandem duplo (V1), seria adequada a adoção dessa mesma

configuração para verificação do Estado Limite de Fadiga, como forma de facilitar e agilizar a análise de fadiga nas estruturas de pontes. Além disso, a simplicidade deste modelo de cargas torna mais fácil uma possível consideração de eixos adicionais no caso de pontes de vãos maiores, assim como proposto para o FLM3 do Eurocódigo 1 (2002).

A Tabela 7.2 apresenta os valores dos pesos totais obtidos para todos os vãos, considerando a configuração de tandem duplo, coeficiente de impacto proposto pela revisão da norma brasileira e curvas S-N com inclinação  $m=5$ .

*Tabela 7.2 – Resultados para veículo tipo tandem duplo, coeficiente de impacto proposto pela revisão da NBR7187(2003) e curvas S-N com inclinação  $m=5$*

Vão (m)	P total (kN)	P eixo1 (kN)	P eixo2 (kN)
10	355	178	178
15	303	152	152
20	335	168	168
25	356	178	178
30	371	186	186
35	381	191	191
40	387	194	194

Observando os pesos totais obtidos com a configuração de tandem duplo, conclui-se que os resultados, para todos os vãos, estão entre 300 e 400 kN. O peso total do veículo padrão de fadiga MF3 pode, então, ser adotado de forma conservadora igual a 400 kN para toda a faixa de vãos analisada. Dessa forma, o modelo de cargas móveis para verificação de fadiga em pontes biapoiadas com vãos de 10m a 40m, desenvolvido através da equivalência de danos, será proposto como um veículo de dois eixos, com a configuração das cargas móveis do tipo V1, onde a carga em cada eixo será igual a 200 kN. A Figura 7.7 apresenta a configuração do veículo padrão proposto para verificação da resistência à fadiga no Brasil, segundo o nível 2 de verificação.

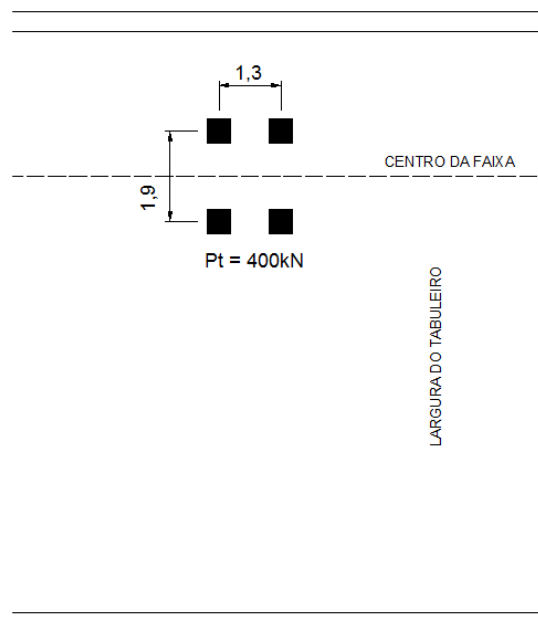


Figura 7.7 - Veículo padrão proposto para verificação da resistência à fadiga no Brasil, segundo o nível 2 de verificação

## 7.2. MF1 – Modelo de Equivalência de Variação de Tensão Máxima

O modelo de cargas móveis para equivalência de variação de tensão máxima (MF1) foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar ao projetista uma verificação da resistência à fadiga conservadora. Este modelo de cargas possibilitará verificar se a vida útil de fadiga da estrutura pode ser considerada muito superior à requerida em projeto.

Para tal, o modelo será desenvolvido considerando-se somente os efeitos da passagem do veículo que gera a variação de tensão máxima na ponte, ou seja, aquela onde 99% do dano de fadiga é causado pelas variações de tensão abaixo da variação de tensão máxima. Para a definição do fator pelo qual o modelo de cargas de referência deve ser multiplicado de forma a ser utilizado para a análise de fadiga, a variação de tensão máxima é dividida pela variação de tensão provocada pelo modelo de cargas móveis para Estado Limite Último tomado como referência.

Os máximos momentos fletores gerados pelos modelos de cargas móveis para Estado Limite Último da norma NBR 7188 (1984) e pelo modelo de cargas nº1 proposto por ROSSIGALI (2013) são apresentados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Momentos fletores máximos gerados pelos modelos de cargas móveis para Estado Limite Último da NBR7188 (1984) e proposto por ROSSIGALI (2013)

Vão (m)	$M_{max}$ (kN.m) – Modelo de Cargas da NBR 7188 (1984)			$M_{max}$ (kN.m) – Modelo da Cargas proposto por ROSSIGALI (2013)		
	Parcela Carga Conc.	Parcela Carga Distr.	$M_{max}$ total	Parcela Carga Conc.	Parcela Carga Distr.	$M_{max}$ total
10	589.50	224.94	814.44	1293.20	89.98	1383.18
15	957.94	506.11	1464.05	2036.42	202.44	2238.86
20	1326.37	899.75	2226.12	2779.64	359.90	3139.54
25	1694.81	1405.86	3100.67	3522.86	562.34	4085.20
30	2063.25	2024.44	4087.69	4266.08	809.78	5075.85
35	2431.69	2755.48	5187.17	5009.29	1102.19	6111.49
40	2800.12	3599.00	6399.12	5752.51	1439.60	7192.11

A seguir serão apresentados os resultados obtidos com os dados do tráfego nas rodovias brasileiras para os fatores redutores pelos quais os modelos de carga de referência devem ser multiplicados para a análise de fadiga, de acordo com o comprimento do vão. A Figura 7.8 ilustra os resultados considerando o coeficiente de impacto da atual norma NBR 7187 (2003) e a Figura 7.9 apresenta aqueles relativos ao emprego da proposta de revisão do coeficiente de impacto.

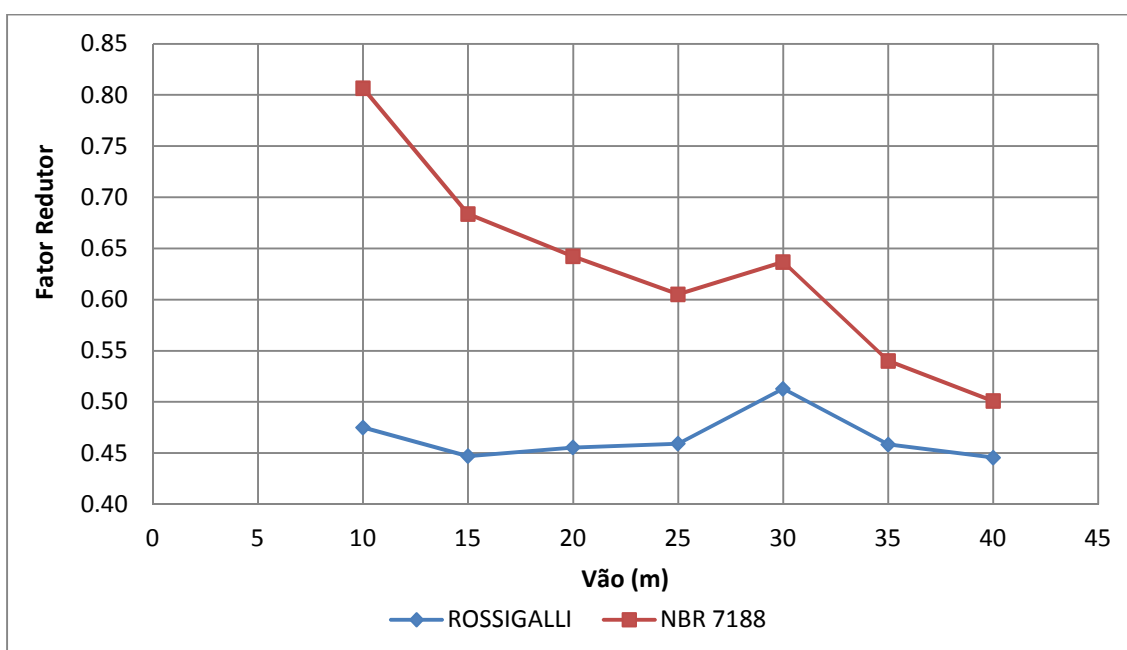


Figura 7.8 – Fator redutor das cargas totais dos modelos de carga de referência, considerando o coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003)

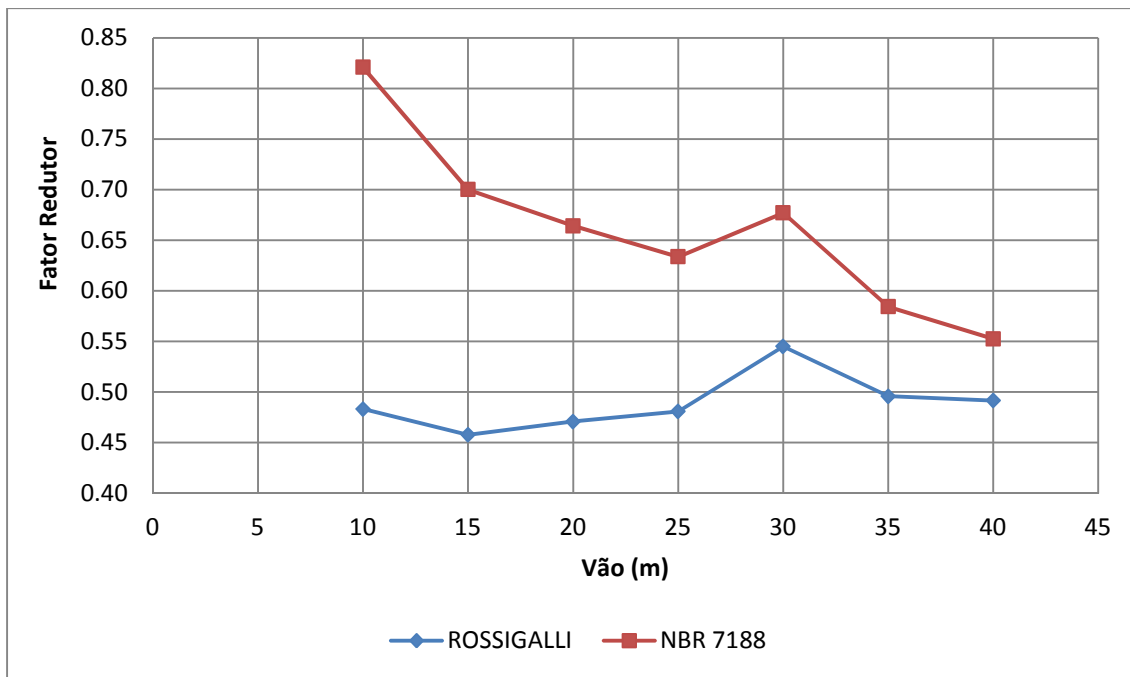


Figura 7.9 – Fator redutor das cargas totais dos modelos de carga de referência, considerando a proposta de revisão do coeficiente de impacto da norma NBR 7187 (2003)

Observando os gráficos apresentados, pode-se concluir que quando utilizado o modelo de cargas móveis da norma brasileira como referência, os valores dos fatores redutores variam bastante com relação ao comprimento do vão, apresentando valores entre 0,80 e 0,50 para a análise considerando o coeficiente de impacto da NBR7187 (2003) e 0,82 e 0,55 para a análise considerando a proposta de revisão do coeficiente de impacto. Para o modelo de cargas móveis proposto por ROSSIGALLI (2013), esses fatores redutores não apresentam uma variação tão acentuada com relação ao vão. Nesse caso, os valores variam de aproximadamente 0,45 a 0,55.

É importante destacar os saltos nos valores dos fatores redutores para os vãos de 10m e 30m. Para esses comprimentos de vãos, a porcentagem de dano acumulado para obtenção da variação de tensão máxima foi de 99,66%, ou seja, superior à porcentagem obtida para os demais vãos, que variaram de 99,02% a 99,17%. Dessa forma, pode-se adotar para esses vãos fatores redutores menores com relação aos apresentados nos gráficos, seguindo a tendência.

No que diz respeito aos resultados obtidos com o modelo de cargas móveis da norma brasileira, é possível observar que os fatores redutores são tão maiores quanto menores os vãos. Pode-se afirmar ainda que, para a faixa de vãos estudada, uma verificação de resistência a fadiga de nível 1 para longarinas de pontes rodoviárias, admitindo 50% da carga total do modelo de cargas para Estado Limite Último da

NBR7188 (1984) não conduz à uma análise adequada dos efeitos de fadiga nas pontes, considerando o atual perfil de tráfego comercial nas rodovias brasileiras.

Devido a suave variação do fator redutor com relação ao vão, o modelo de cargas móveis proposto por ROSSIGALI (2013) se mostra como uma boa opção para verificação da resistência à fadiga de nível 1. Além disso, é um modelo de cargas desenvolvido para representar os efeitos do tráfego de veículos reais. Para a definição do fator redutor adequado, serão utilizados os resultados relativos à análise considerando o coeficiente de impacto proposto para revisão da NBR 7187 (2003).

Dessa forma, o modelo de cargas móveis proposto para verificação da resistência à fadiga de nível 1 (MF1) será um conjunto de cargas concentradas com a configuração de um tandem duplo e uma carga distribuída. A proporção das cargas totais será definida excluindo-se os saltos observados, e justificados, para os vão de 10m e 30m. Assim, o fator redutor  $\psi$  será igual a 0,50 para todos os vãos, ou seja, o peso total do tandem duplo será de 425kN e a carga distribuída será igual à 1,0 kN/m<sup>2</sup>. A Figura 7.10 apresenta o modelo de cargas móveis proposto para verificação da resistência à fadiga no Brasil, segundo o nível 1 de verificação.

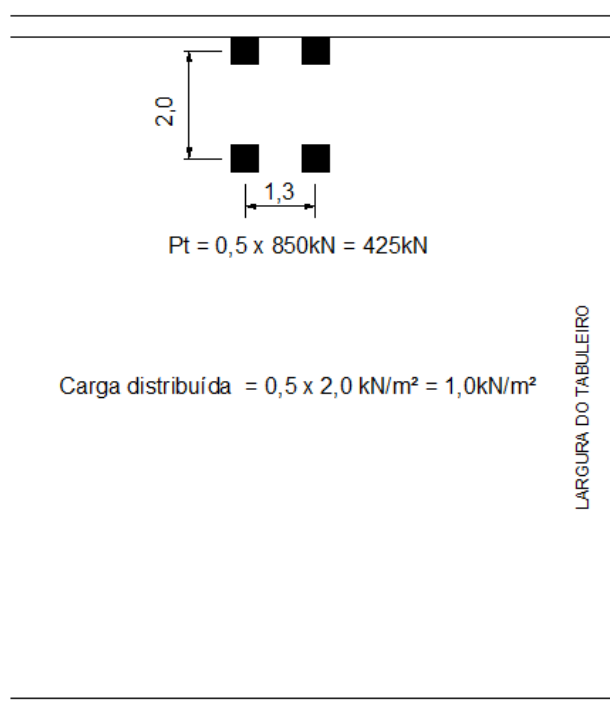


Figura 7.10 – Modelo de cargas móveis proposto para verificação da resistência à fadiga no Brasil, segundo o nível 1 de verificação



## 8. EXEMPLO NUMÉRICO PARA VERIFICAÇÃO DE FADIGA

### 8.1. Introdução

Esse exemplo numérico pretende comparar os resultados para o dano em um detalhe típico de uma longarina de ponte mista, extraída do trabalho de TOLEDO (2001), obtidos através de três cálculos distintos: considerando os dados do espectro real de veículos, considerando o modelo de cargas móveis calibrado através do conceito de dano equivalente, para cada um dos vãos considerados, e finalmente utilizando a proposta para o modelo de cargas móveis para dano equivalente calibrado de forma a atender todo o intervalo de comprimento de vãos, proposto no item 7.1.3. A Tabela 8.1 resume as situações analisadas.

*Tabela 8.1 – Veículos utilizados em cada situação analisada*

Situação Analisada	Veículo Considerado
1	Espectro de veículos reais
2	V1 com peso total de 387 kN
3	V1 com peso total de 400 kN

Além disso, será feita uma aplicação do modelo de cargas móveis desenvolvido para equivalência da variação de tensão máxima (MF1) na ponte analisada.

Os modelos de carga móveis utilizados para o cálculo do dano serão aqueles obtidos com a configuração de veículo padrão tipo V1 para o cenário onde os modelos foram calibrados considerando as curvas S-N com inclinação  $m$  igual a 5 e o coeficiente de impacto calculado conforme proposta de TIMERMAN e MARTIN (2012).

O cálculo do dano total acumulado devido ao espectro de veículos reais será desenvolvido considerando o coeficiente de impacto proposto para a revisão da NBR 7187(2003), de forma a tornar a análise compatível com os modelos de cargas móveis desenvolvidos. Foi considerado, ainda, que os veículos trafegam de forma isolada na ponte e no centro da faixa mais extrema.

Os momentos fletores na longarina mais solicitada foram calculados através da linha de influência da repartição transversal apresentada no item 6.4.3. Nesse item também estão apresentadas as figuras com as ordenadas da linha de influência da viga extrema necessárias para o cálculo dos danos e para verificação da fadiga utilizando-se o MF1.

## 8.2. Características Geométricas da Estrutura

A geometria da ponte selecionada para este exemplo numérico foi extraída e adaptada do estudo de TOLEDO (2011). Trata-se de uma ponte mista, biapoiada e reta, com 40m de vão. Existem ainda transversinas nos apoios e ao longo do vão.

A seção transversal é composta por quatro longarinas de alma cheia, soldadas, e laje de concreto armado moldado no local, conectada às longarinas através de conectores de cisalhamento do tipo *Stud*. A Figura 8.1 apresenta um esquema da seção transversal da ponte considerada neste exemplo numérico

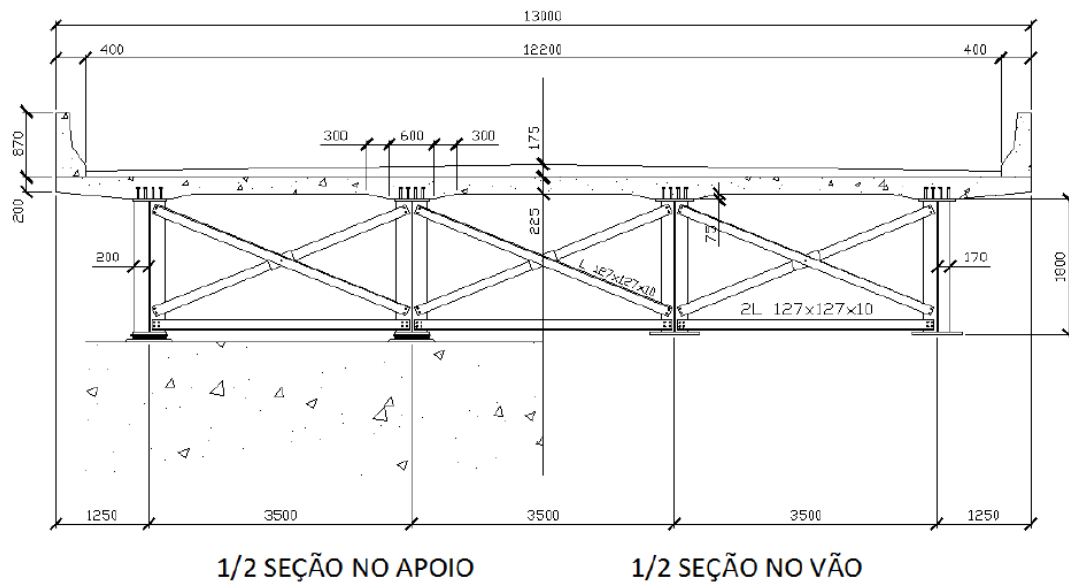


Figura 8.1 – Seção transversal da ponte (mm) (TOLEDO, 2011)

Esta ponte é classificada como pertencente a uma rodovia Classe I de pista simples, com duas faixas de tráfego e dois acostamentos laterais. A largura da pista de rolamento para essa classe de rodovia deve ser igual a 7,20m, com acostamentos de 2,5m e barreiras laterais com 0,4m cada, totalizando um tabuleiro de ponte com 13m de largura. Na Figura 8.2 está ilustrada a vista da ponte em planta.

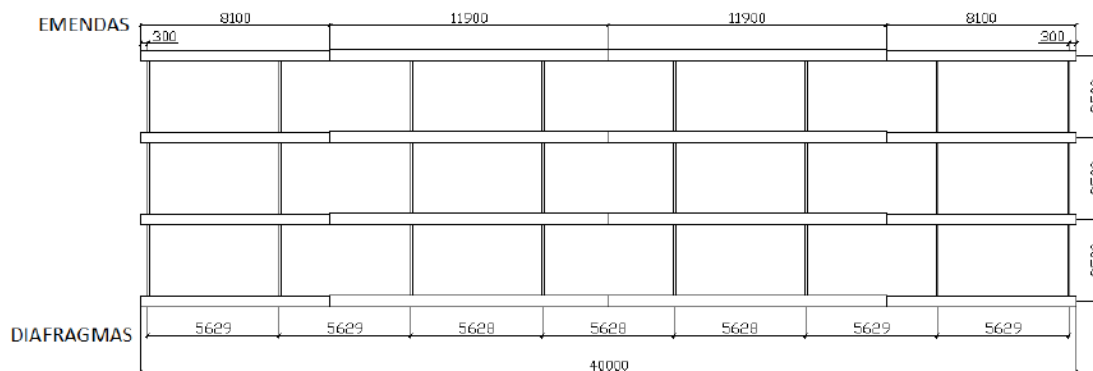


Figura 8.2 – Vista da ponte em planta (mm) (TOLEDO, 2011)

### 8.3. Propriedades Geométricas dos Componentes Estruturais

#### 8.3.1. Vigas Principais

As longarinas que compõem a seção transversal da ponte são soldadas e as dimensões do perfil utilizado estão apresentadas na Tabela 8.2 e ilustradas na Figura 8.3.

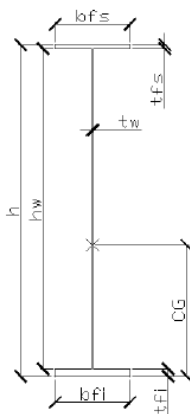


Figura 8.3 – Indicação das dimensões da seção transversal das longarinas

Tabela 8.2 – Dimensões da seção transversal das longarinas

Propriedade	Dimensões (mm)
$b_{fs}$	500,0
$t_{fs}$	20,0
$t_w$	13,0
$h_w$	1740,0
$h$	1800,0
$b_{fi}$	670,0
$t_{fi}$	40,0
CG	656,68

### 8.3.2. Laje de Concreto Armado

A laje de concreto armado é feita com concreto C25 e possui seção transversal variável, com mísulas nas regiões onde há a conexão com as longarinas. As dimensões são ilustradas na Figura 8.4.

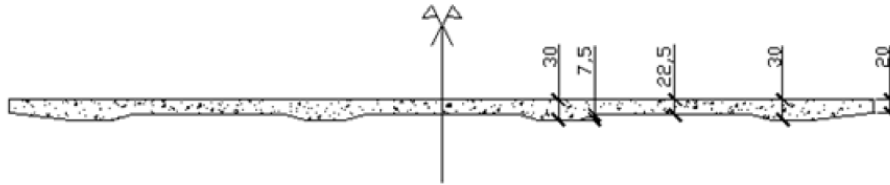


Figura 8.4 – Seção transversal da laje de concreto armado (TOLEDO, 2011)

### 8.3.3. Propriedades da Seção Mista

Para o cálculo das tensões atuantes nos detalhes, é necessário o cálculo das propriedades geométricas da seção transversal mista, através da definição de uma seção homogeneizada, onde se transforma a seção de concreto em uma seção equivalente de aço.

Primeiramente é necessária a definição da largura efetiva da laje. Segundo a NBR8800 (2008), a largura efetiva será o menor entre os seguintes valores:

$$b_e = \text{mínimo} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{8} \times L = \frac{1}{8} \times 40 = 5m \\ \frac{1}{2} \times L_v = \frac{1}{2} \times 3,5 = 1,75m \end{array} \right. \quad (8.1)$$

onde  $L$  é o comprimento do vão e  $L_v$  é a distância transversal entre as longarinas.

Assim, a seção homogeneizada pode ser calculada dividindo-se a área original de concreto pela seguinte relação:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2 \times 10^5}{5600 \times 0,75 \times \sqrt{25}} = 8,4 \quad (8.2)$$

A seção transversal para cálculo das propriedades geométricas das vigas de extremidade, ou seja, aquelas mais solicitadas à flexão, para cargas de curta duração, é apresentada na Figura 8.5.

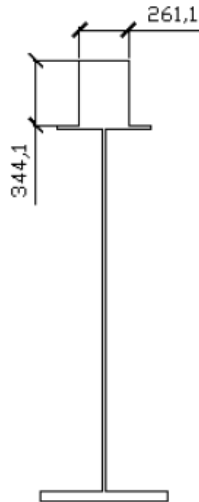


Figura 8.5 – Seção transversal homogeneizada para vigas extremas para cargas de curta duração (TOLEDO, 2011)

O módulo de resistência à flexão em relação às fibras inferiores, necessário ao cálculo da tensão, é definido da seguinte forma:

$$w_{inf} = \frac{I_{x,eq}}{y} = \frac{9,36 \times 10^{10} \text{mm}^4}{1448,4 \text{mm}} = 6,46 \times 10^7 \text{mm}^3 \quad (8.3)$$

onde  $I_{x,eq}$  é o momento de inércia em torno do eixo x para a seção mista e y é a distância do centro de gravidade da seção à fibra inferior mais extrema.

#### 8.4. Curvas S-N Consideradas e Detalhe Analisado

De forma a tornar o exemplo numérico compatível com a análise desenvolvida para definição do modelo de cargas móveis, o cálculo do dano foi realizado utilizando-se a curva S-N propostas pelo Eurocódigo 3 – parte 1-9 (2005) correspondente ao detalhe selecionado, ou seja, curvas com duas inclinações. Além disso, ainda foi desconsiderado o limite de *cut-off*. Dessa forma, todos os ciclos de variação de tensão contribuem para o cálculo do dano.

Neste exemplo numérico, a análise de fadiga será feita para apenas uma categoria de detalhe. Foi selecionado o detalhe de ligação entre a mesa inferior e a alma do perfil. Essa ligação é feita através de solda de filete, de forma automática e com interrupções, se enquadrando na categoria 112 ( $\Delta\sigma_c = 120 \text{MPa}$ ), segundo o Eurocódigo 3 – Parte1-9 (2005).

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
112		<p>3) Soldadura automática ou totalmente mecânica de ângulo ou de topo executada nos dois lados, mas com paragem/recomeço.</p> <p>4) Soldadura automática ou totalmente mecânica de topo executada apenas num dos lados, com uma contrachapa contínua no lado oposto, sem paragem/recomeço.</p>	<p>4) No caso em que este pormenor apresentar traços de paragem/recomeço utiliza-se a categoria 100.</p>

Figura 8.6 – Ilustração da categoria de detalhe 112 e descrição das características (EN1993-1-9, 2005)

## 8.5. Resultados e Discussões

### 8.5.1. Cálculo dos Danos

Utilizando a curva S-N para a categoria de detalhe 112, foram calculados o número de ciclos para a ruptura por fadiga ( $N$ ) para cada variação de tensão relativa aos veículos do espectro e aos modelos de cargas móveis. Sabendo-se o número de ciclos de cada amplitude de tensão que a ponte está submetida por ano ( $n$ ), foi calculado o dano por ano e posteriormente a vida útil em anos. O saldo de vida útil será igual à vida útil calculada menos a vida útil de projeto, igual a 75 anos.

A Tabela 8.3 apresenta os resultados do cálculo do dano e da vida útil para cada uma das situações analisadas. A tabela com o cálculo detalhado do dano para o espectro de veículos reais encontra-se no Apêndice E.

Tabela 8.3 – Resultado para cálculo do dano por ano e vida útil para cada situação

Situação	Momento Fletor (kN.m)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$n$	$N$	Dano por ano	Vida Útil (anos)	Saldo de vida útil (anos)
1	-	-	-	-	1.20E-03	832	757
2	3744	30.06	1.64E+08	1.83E+09	1.20E-03	834	759
3	3870	31.07	1.64E+08	1.55E+09	1.41E-03	707	632

Com base nos resultados apresentados na Tabela 8.3, é possível confirmar que o dano acumulado resultante da passagem dos veículos do espectro é igual ao dano calculado considerando-se somente a passagem do modelo de cargas móveis calibrado para o comprimento de vão analisado. Esse resultado deve-se ao fato de todos os ciclos de variação de tensão serem inferiores ao limite de fadiga  $\Delta\sigma_D$ , ou seja, estarem no trecho da curva S-N com inclinação igual a 5.

Pode-se observar também que o dano causado pelo modelo de cargas móveis proposto para todos os vãos (situação 3, ver Tabela 8.1), resulta em um dano maior

que aquele gerado pelo espectro de veículos reais, sendo, portanto, um modelo de cargas para análise de fadiga conservador, caso todos os ciclos de variação de tensão correspondam a uma inclinação da curva S-N igual a 5.

Observa-se que nas situações 2 e 3, o número total de ciclos de tensão durante a vida útil da estrutura é inferior ao número de ciclos de amplitude constante necessários à ruptura. A garantia de segurança conforme a equação 6.16 dependerá dos valores dos coeficientes de segurança adotados.

No que diz respeito a vida útil de fadiga calculada, percebe-se que os resultados obtidos para o detalhe de ligação entre a mesa inferior e a alma do perfil da longarina externa, para as três análises, são bastante superiores à vida útil requerida em projeto, de 75 anos. Entretanto, da mesma forma, a margem de segurança dependerá dos coeficientes de segurança.

### 8.5.2. Verificação de Fadiga Através do MF1

A variação de tensão provocada pela passagem do modelo de cargas proposto MF1 foi calculada dividindo-se o momento máximo na longarina extrema pelo módulo de resistência à flexão em relação às fibras inferiores. Este cálculo é apresentado na equação 8.4.

$$\Delta\sigma = \frac{M_{max}}{W_{inf}} = \frac{3596,06 \times 10^6}{6,46 \times 10^7} = 55,62 \text{ MPa} \quad (8.4)$$

Para a categoria de detalhe selecionada (112), o limite de fadiga para amplitude constante  $\Delta\sigma_D$  é igual a 97,84 MPa. Com isso, concluímos que  $\Delta\sigma_{max} \leq \Delta\sigma_D$ , no entanto, a resistência à fadiga considerando uma vida útil muito superior à requerida em projeto só pode ser garantida fazendo-se uso dos coeficientes de segurança pertinentes, de acordo com a equação 6.22.

## **9. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **9.1. Conclusões**

Neste estudo, foram propostos dois modelos de cargas móveis para verificação do Estado Limite de Fadiga em obras de arte especiais no Brasil. Os modelos de carga foram calibrados através de dados do tráfego atual nas rodovias brasileiras obtidos por ROSSIGALI (2013), considerando-se um volume médio diário de 6000 veículos e um vida útil projetada de 75 anos. As propostas de modelos de cargas se aplicam às vigas principais longitudinais de pontes de aço, com longarinas biapoioadas e vãos com comprimento que variam de 10m a 40m.

Para o desenvolvimento dos modelos de carga móveis para verificação da resistência à fadiga, foram seguidas duas abordagens distintas. A primeira abordagem procurou desenvolver um modelo de cargas móveis que reproduzisse o mesmo dano que aquele gerado na estrutura da ponte devido à passagem do espectro de veículos reais. Já a segunda abordagem se baseou no conceito de vida útil de fadiga muito superior à requerida em projeto, onde a calibração do modelo foi realizada através da equivalência da variação de tensão máxima.

Os modelos de cargas móveis para verificação de fadiga já incluem o coeficiente de impacto adequado à faixa de vãos analisada. Tendo isso em vista, foi estudada a influência do coeficiente de impacto na calibração dos modelos de carga, analisando-se duas formulações para a majoração das cargas para os efeitos dinâmicos: aquela apresentada pela atual norma brasileira (NBR7187, 2003) e uma proposta de revisão, apresentada por TIMERMAN e MARTIN (2012).

Os resultados apontaram que os modelos de carga calibrados com o coeficiente de impacto proposto por TIMERMAN e MARTIN (2012) são mais conservadores que aqueles calibrados com o atual coeficiente de impacto da NBR7187 (2013), principalmente para vãos menores que 10m.

Para os modelos de cargas móveis desenvolvidos por equivalência de danos, ainda foi estudada a influência da inclinação das curvas S-N adotadas para a calibração dos modelos. Buscando um modelo de cargas independente do detalhe analisado, foram utilizadas curvas S-N simplificadas, com única inclinação ( $m=3$  ou  $m=5$ ) e sem a consideração do limite de *cut-off*. Conclui-se através dos resultados que a calibração dos modelos de carga com considerando as curvas S-N com inclinação igual a 5 conduzem a veículos padrão com peso total mais elevado.

Foram estudadas algumas configurações possíveis para os veículos padrão do modelo de cargas para equivalência de dano, buscando a que melhor se ajustasse à composição do tráfego brasileiro. São elas: um tandem duplo, o veículo 3C do



espectro de veículos reais e o atual veículo padrão da NBR 7188 (1984). Foi escolhida a configuração de um tandem duplo, pois apresentou boa adaptação aos dados disponíveis além de ser a mesma configuração da proposta de ROSSIGALI (2013) para o veículo padrão para verificação do Estado Limite Último.

A calibração desse modelo de cargas, denominado MF3, foi feita para a situação onde o coeficiente de impacto é aquele formulado por TIMERMAN e MARTIN (2005) e a inclinação da curva S-N é igual a 5, de forma que atendesse a todos os comprimentos de vãos da faixa analisada (10m a 40m), resultando em um peso total do veículo padrão de fadiga de 400kN, dividido igualmente entre as quatro rodas.

No exemplo numérico, foram calculados os danos resultantes da passagem do espectro de veículos reais e do modelo de cargas móveis (MF3) e se concluiu que o modelo proposto é adequado à avaliação da resistência à fadiga para equivalência de dano em detalhes onde a maioria dos ciclos de variação de tensão está na região da curva S-N com inclinação  $m$  igual a 5.

Foram ainda realizadas calibrações utilizando as configurações dos modelos de cargas móveis da norma AASHTO (2007) e do Eurocódigo 1 (2002) (FLM3) com os dados do tráfego nas rodovias brasileiras, e se concluiu que a verificação de fadiga no Brasil pode ser feita de forma conservadora através do modelo de cargas FLM3 do Eurocódigo, desde que calibrado através do método de coeficiente  $\lambda$  com os dados do tráfego brasileiro. Os resultados também mostraram que para a geometria do modelo de cargas da norma AASHTO (2007), o peso total do veículo calculado para representar o dano em função do vão da ponte devido ao tráfego nas rodovias brasileiras é superior aquele indicado pela norma, portanto, não sendo esta norma adequada à composição do tráfego no Brasil.

Para o modelo de cargas para equivalência de variação de tensão máxima, a proposta foi a utilização de um modelo de cargas móveis já existente para verificação do Estado Limite Último e adaptação deste à análise de fadiga, através de fator redutor. Foram estudadas as seguintes configurações dos modelos de carga: o TB45 da norma NBR 7188 (1984) e modelo proposto nº 1 de ROSSIGALI (2013).

O modelo de cargas móveis proposto por ROSSIGALI (2013) foi o que apresentou menor variação do fator redutor com relação ao vão da ponte, além de ser um modelo de cargas móveis desenvolvido para representar os efeitos do tráfego de veículos reais, e, portanto, foi a configuração selecionada para a proposta de modelo de cargas móveis para variação de tensão máxima, denominado MF1.

Com base nos resultados obtidos para o fator redutor de acordo com o vão da ponte, chegou-se a uma proporção de 50% do modelo de cargas móveis para análise de fadiga para variação de tensão máxima (MF1) com relação ao modelo para Estado

Limite Último proposto por ROSSIGALI (2013). Dessa forma, o MF1 consiste em um tandem duplo de 425kN de peso total e uma carga distribuída de 1kN/m<sup>2</sup>.

Os resultados para a calibração dos modelos de carga segundo a equivalência de variação de tensão máxima para o trem-tipo da NBR7188 (1984), utilizando a proposta de revisão do coeficiente de impacto, resultaram em fatores redutores que variam de 0,82 (vão de 10m) a 0,55 (vão de 40m). Isto indica que o fator redutor de 0,5 indicado pela NBR6118 (2007) para verificação de fadiga em longarinas de pontes rodoviárias de concreto não é suficiente para a garantia de vida útil à fadiga muito superior à requerida em projeto, para pontes com vãos menores do que 40m.

## 9.2. Trabalhos Futuros

O desenvolvimento de um modelo de cargas móveis para verificação da resistência à fadiga é um estudo complexo, que envolve a análise de muitos parâmetros, alguns dos quais não foram abordados neste trabalho. Dessa forma, sugere-se que, para o aprimoramento dos modelos de cargas móveis propostos, sejam ainda abordadas as seguintes questões:

- Extrapolação dos dados do tráfego real dos veículos nas pontes para o período de vida útil das estruturas, buscando reproduzir a tendência de aumento do volume de veículos e peso total;
- Calibração dos modelos de carga com coeficientes de impacto que representem melhor a resposta dinâmica da ponte à passagem dos veículos, como por exemplo através dos resultados dos trabalhos de MELO (2007) e MENDONÇA (2009);
- Análise do efeito da presença de mais de um veículo sobre a ponte através da simulação de tráfego. Deve-se analisar a probabilidade de cruzamento de veículos, assim como o tráfego de mais de um veículo na mesma faixa;
- Aplicação do modelo de cargas desenvolvido para equivalência de danos em estruturas com características diversas, buscando avaliar a adequação do modelo de cargas calibrado com curvas S-N de inclinação  $m$  igual 5 para detalhes onde os ciclos de variação de tensão possuem amplitudes, na sua maioria, superiores ao limite de fadiga. Esta adequação provavelmente será viabilizada mediante um fator de ajuste ao modelo de cargas desenvolvido com base na curva SN com  $m=5$ .

## **BIBLIOGRAFIA**

AASHTO, LRFD *Bridge design specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials, USA, 2007.

ABNT, *NBR-6118:2007 – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 2007.

ABNT, *NBR-7187:2003 – Projeto de Pontes de Concreto Armado e de Concreto Protendido, Procedimento*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 2003.

ABNT, *NBR-7188:1984 – Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 1984.

ABNT, *NBR-8800:2008 – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 2008.

BARONI, H. J. M., *Simulação da Vida Útil de Fadiga de Concreto em Vigas de Tabuleiro de Pontes em Função do Fluxo de Veículos Pesados*. Tese de D.Sc., UFRS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2010

BOLOTIN, V.V., *Mechanics of Fatigue*, Estados Unidos, CRC Press, 1999.

BRANCO, C. M., FERNANDES, A .A., CASTRO, P. M. S. T., *Fadiga de Estruturas Soldadas*, Lisboa, Portugal, Editora Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

BS-5400, *Fatigue Design Rules for Metallic Bridges*, British Standards Institution, 1980

CEB, *Fatigue Design Concepts*, Plenary Session, Session 4, Fatigue, Treviso, Comité Euro-international du Béton, 1987.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES (2013). Boletim Estatístico da CNT, disponível em: <<http://www.cnt.org.br>>. Acesso em 01 ago. 2013.

DNIT, *Quadro de fabricantes de veículos*. Diretoria de Infra-estrutura Rodoviária. Coordenação Geral de Operações Rodoviárias, Brasília, DF, Brasil, outubro de 2009.

ECCS, *Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures*, European Convention for Constructional Steelwork, ECCS, first edition, 1985.

EN1991-2, *Eurocode 1 – Actions on structures – Part 2: Traffic Loads on Bridges*. European Committee for Standardization, Brussels, 2002.

EN1993-1-9, *Eurocode 3 – Design of Steel Structures – Parte 1-9: Fatigue*. European Committee for Standardization, Brussels, 2005.

EN1993-2, *Eurocode 3 – Design of Steel Structures – Parte 2: Steel Bridges*. European Committee for Standardization, Brussels, 2006.

ESDEP (2000), *European Steel Design Education Programme*, ESDEP, disponível em: <<http://www.esdep.org>>. Acesso em 15 dez. 2012.

FISHER, J.W. et al., “Hoan Bridge Forensic Investigation Failure Analysis Final Report”. In: *Wisconsin Department of Transportation and The Federal Highway Administration, USA*, 2001

MADDAH, N., *Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges based on Actual Traffic Loads*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse, 2013.

MALAKATAS, N., “Actions on Bridge Decks and Piers (EN 1991)”. In: *EU-Russia Regulatory Dialogue Construction Sector Subgroup*, St. Petersburg, Russia, April 2013.

MELO, E. S., *Interação Dinâmica Veículo-Estrutura em Pequenas Pontes Rodoviárias*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

MENDES, P. T. C., *Contribuição para um Modelo de Gestão de Ponte de Concreto Aplicado à Rede de Rodovias Brasileiras*. Tese de D.Sc., EPUSP, São Paulo, SP, Brasil, 2009.

MENDONÇA, R. F., *Geração de Dados para Modelo Dinâmico de Cargas Móveis em Pontes*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

MICROSOFT OFFICE EXCEL, MICROSOFT, 2007.

PFEIL, M. S., MELO, E. S., BATTISTA, R. C., “Efeitos dinâmicos de veículos em pontes rodoviárias”, In: *II Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Outubro de 2007.

ROSSIGALI, C. E., *Estudos Probabilísticos para Modelos de Cargas Móveis em Pontes Rodoviárias no Brasil*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

ROSSIGALI, C. E., *Atualização do Modelo de Cargas Móveis para Pontes Rodoviárias de Pequenos Vãos no Brasil*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

SANPAOLESI L., CROCE, P., *Handbook 4: Design of Bridges – Guide to basis of bridge design related to Eurocodes supplemented by practical examples*, JRC Scientific and Technical Reports, 2005.

SCHILLING, C. G.. “Stress Cycles for Fatigue Design of Steel Bridges”, *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 110(6):1222–1234, 1984.

SMITH, I. F. C., CASTIGLIONI, C. A., KEATING, P. B., “An Analysis of Fatigue Recommendations Considering New Data”, In: *IABSE Proceedings P-137/89*, pp. 97-108, 1989.

TIMERMAN, J., MARTIN, B., “Considerações Sobre a Revisão da ABNT NBR 7188 - Carga Móvel Rodoviária e de Pedestres em Pontes, Viadutos, Passarelas e outras Estruturas”. In: *V Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Maio de 2012.

TOLEDO, R. L. S., *Avaliação de vida útil à fadiga em ponte mista aço-concreto considerando o espectro de veículos reais*, Projeto de graduação, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

WÖHLER, A., “Über die versuche zur ermittlung der festigkeit von achsen, welche in den werkstätten der niederschlesisch-märkischen eisenbahn zu frankfurt a.d.o. angestellt sind”. *Z. f. Bauwesen* nº13, pp. 233-258, 1863.

## APÊNDICE A – Dados da Composição do Tráfego

### A.1) Histogramas de Peso Total por Classe de Veículo

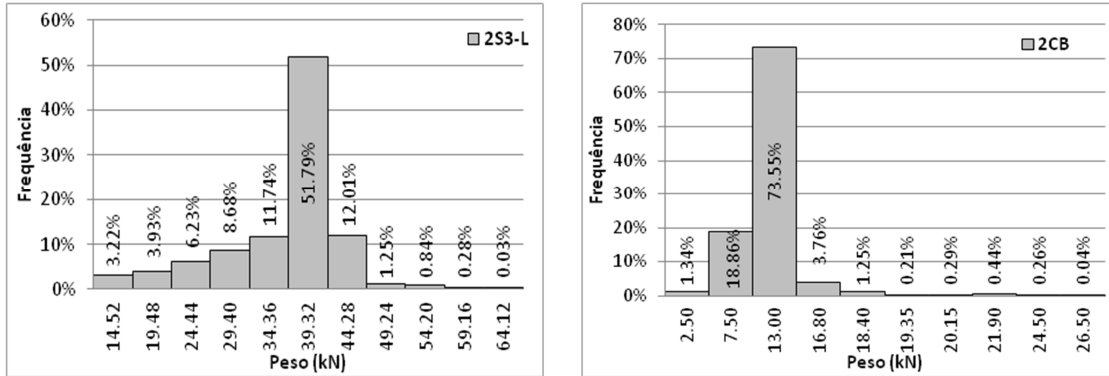


Figura A.1 – Histograma de peso das classes 2S3-L e 2CB



Figura A.2 – Histograma de peso das classes 3S3-L e 3T4

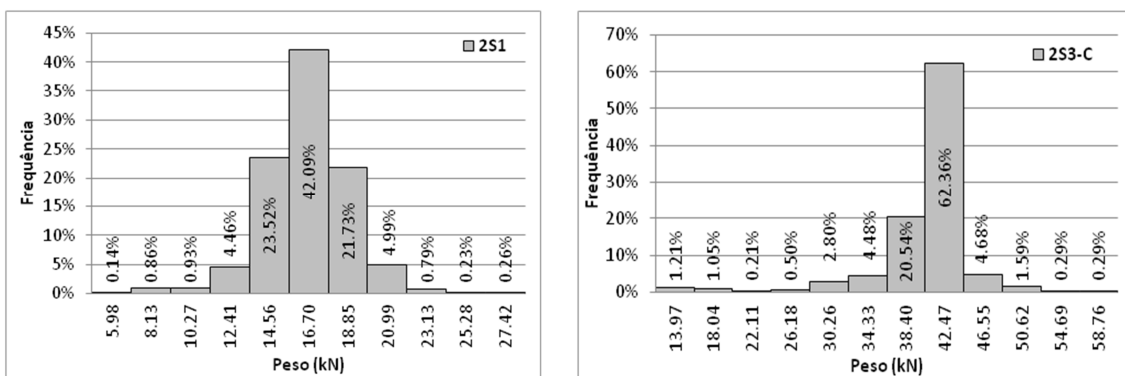


Figura A.3 – Histograma de peso das classes 2S1 e 2S3-C

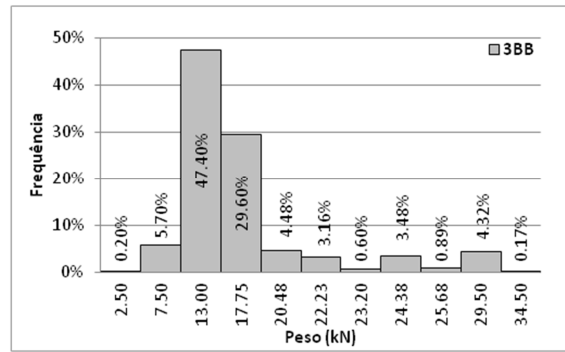
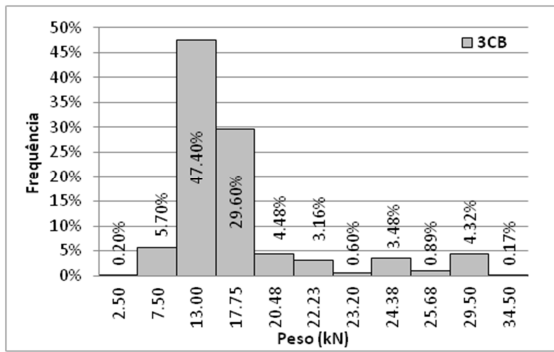


Figura A.4 – Histograma de peso das classes 3CB e 3BB

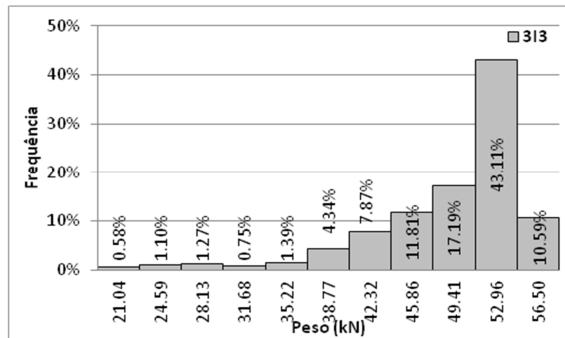
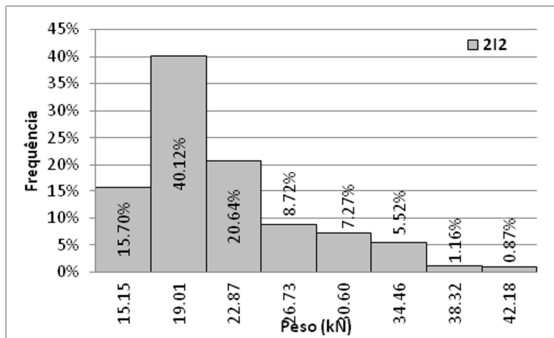


Figura A.5 – Histograma de peso das classes 2I2 e 3I3

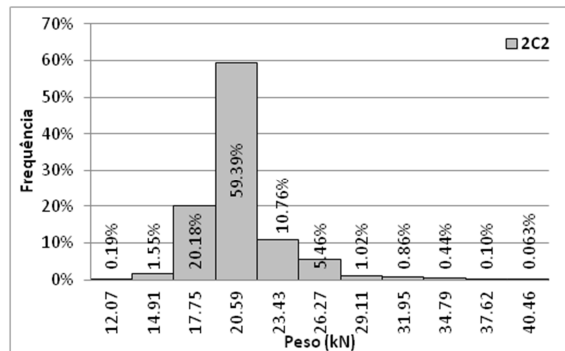
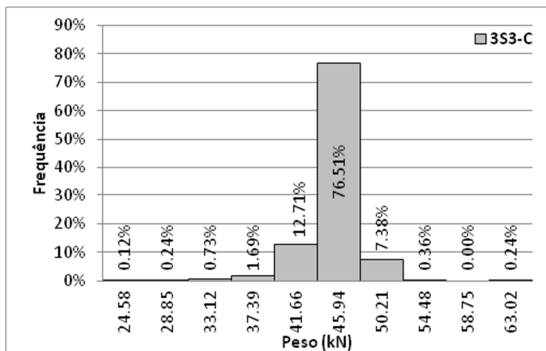


Figura A.6 – Histograma de peso das classes 3S3-C e 2C2

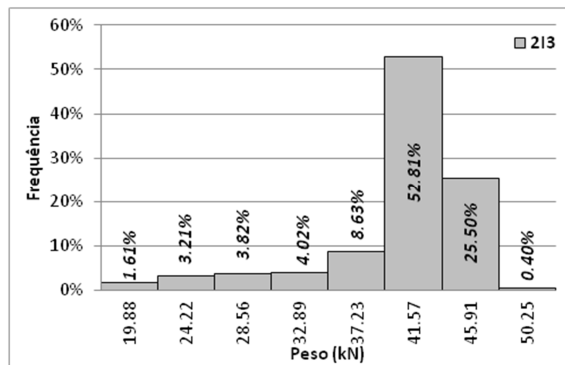
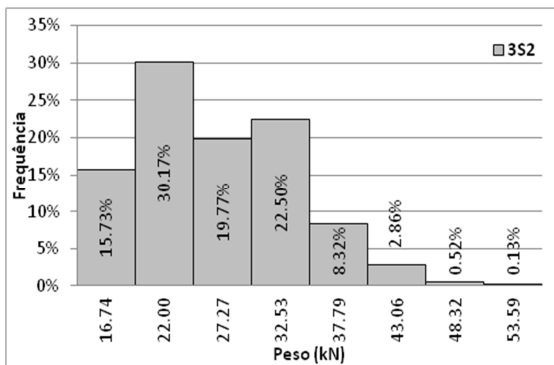


Figura A.7 – Histograma de peso das classes 3S2 e 2I3

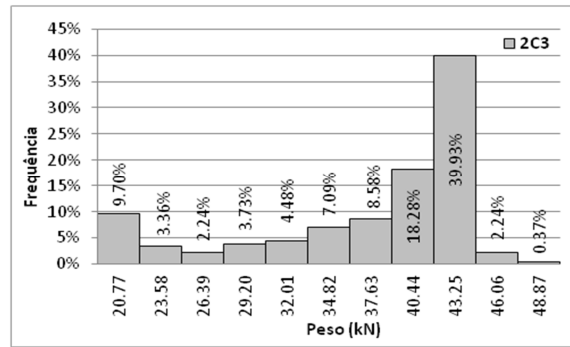
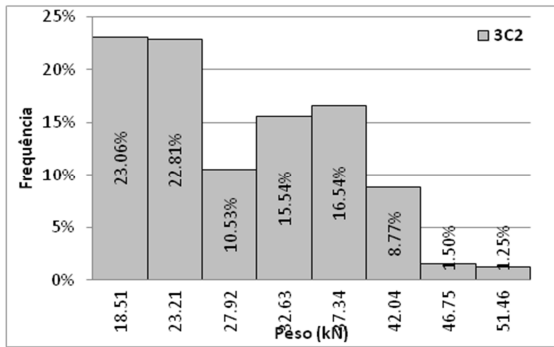


Figura A.8 – Histograma de peso das classes 3C2 e 2C3

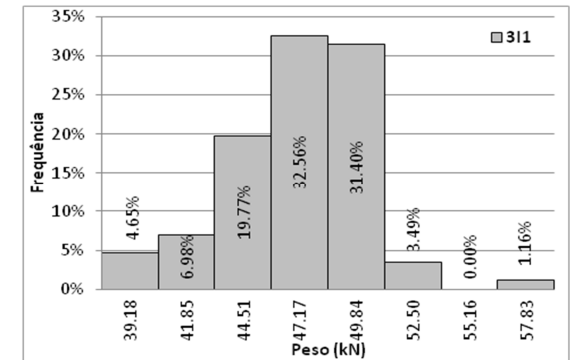
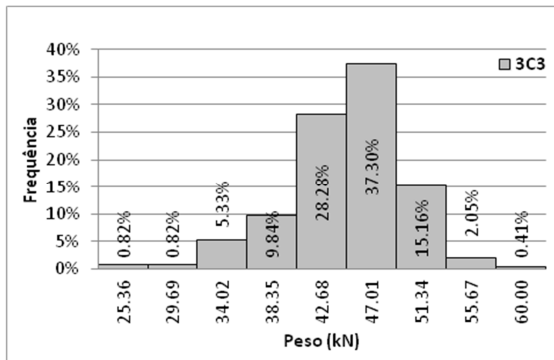


Figura A.9 – Histograma de peso das classes 3C3 e 3I1

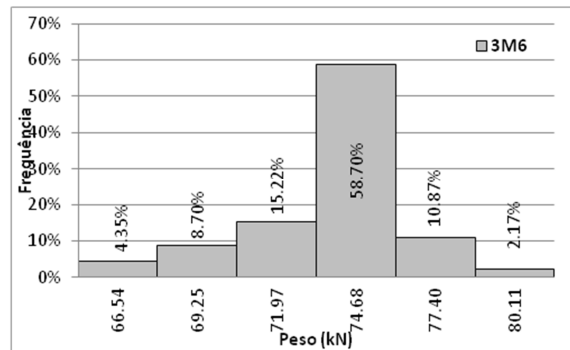
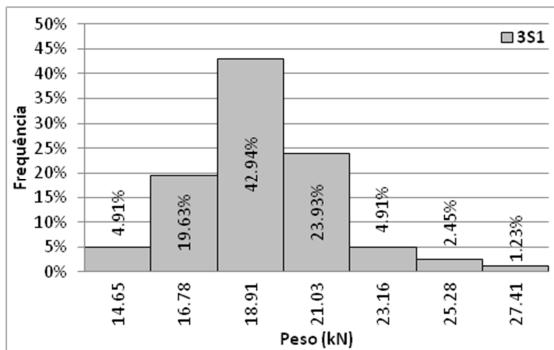


Figura A.10 – Histograma de peso das classes 3S1 e 3M6

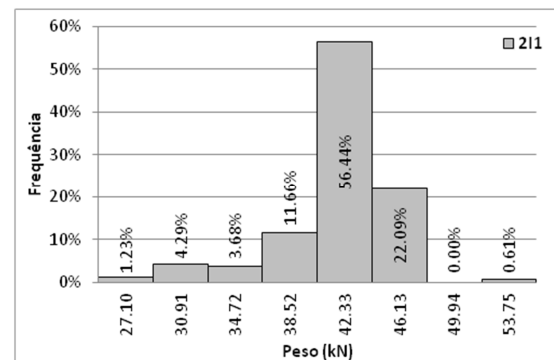
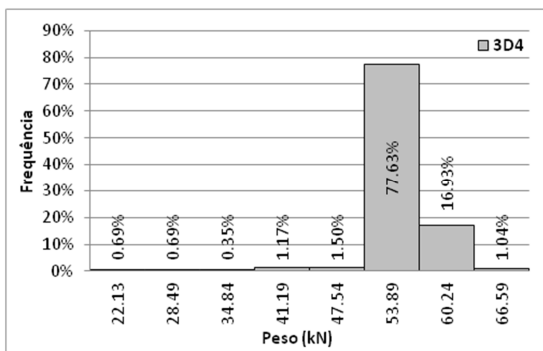


Figura A.11 – Histograma de peso das classes 3D4 e 2I1



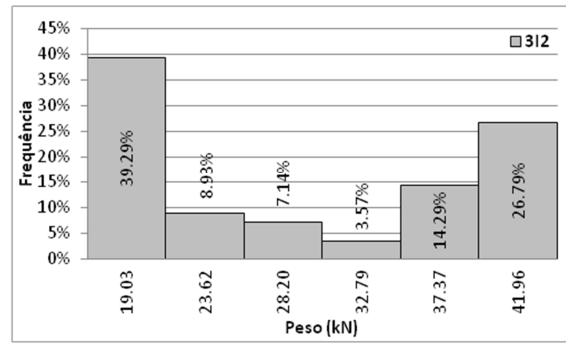
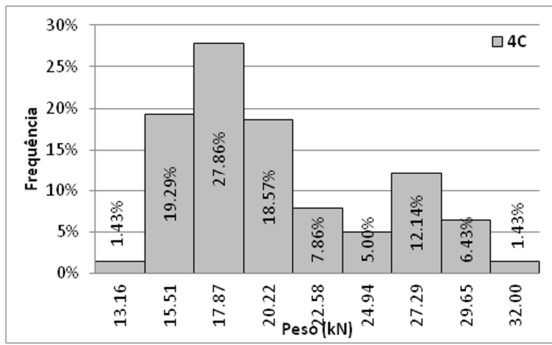


Figura A.12 – Histograma de peso das classes 4C e 3I2

## A.2) Frequências Relativa e Absoluta das Classes de Veículos, por Faixa de Peso

Tabela A.1 – Frequências das classes de veículos por faixa de peso

Classe de Veículo	Faixa de Peso	Peso Total (kN)	Frequência Relativa	Frequência Absoluta
3C	1	70.92	2.676%	0.458%
3C	2	102.02	21.754%	3.723%
3C	3	133.12	22.441%	3.841%
3C	4	164.22	18.257%	3.125%
3C	5	195.32	17.862%	3.057%
3C	6	226.42	16.201%	2.773%
3C	7	257.52	0.712%	0.122%
3C	8	288.62	0.079%	0.014%
3C	9	319.72	0.012%	0.002%
3C	10	350.82	0.006%	0.001%
2C	1	41.39	1.374%	0.171%
2C	2	61.22	12.494%	1.552%
2C	3	81.05	35.034%	4.352%
2C	4	100.89	32.345%	4.018%
2C	5	120.72	13.751%	1.708%
2C	6	140.55	4.257%	0.529%
2C	7	160.39	0.670%	0.083%
2C	8	180.22	0.067%	0.008%
2C	9	200.05	0.008%	0.001%
2S2	1	81.52	0.051%	0.006%
2S2	2	115.03	0.608%	0.073%
2S2	3	148.55	21.125%	2.528%
2S2	4	182.07	40.434%	4.839%
2S2	5	215.58	19.520%	2.336%
2S2	6	249.10	9.498%	1.137%
2S2	7	282.62	4.711%	0.564%
2S2	8	316.13	3.453%	0.413%
2S2	9	349.65	0.431%	0.052%
2S2	10	383.17	0.093%	0.011%
2S2	11	416.68	0.076%	0.009%
2CC	1	18.93	2.351%	0.260%
2CC	2	37.28	18.029%	1.995%
2CC	3	55.62	49.610%	5.490%
2CC	4	73.96	23.578%	2.609%
2CC	5	92.31	5.727%	0.634%
2CC	6	110.65	0.339%	0.037%
2CC	7	128.99	0.197%	0.022%
2CC	8	147.34	0.169%	0.019%

Classe de Veículo	Faixa de Peso	Peso Total (kN)	Frequência Relativa	Frequência Absoluta
2S3-L	1	145.20	3.224%	0.267%
2S3-L	2	194.80	3.925%	0.325%
2S3-L	3	244.40	6.231%	0.516%
2S3-L	4	294.00	8.676%	0.718%
2S3-L	5	343.60	11.745%	0.972%
2S3-L	6	393.20	51.791%	4.286%
2S3-L	7	442.80	12.009%	0.994%
2S3-L	8	492.40	1.246%	0.103%
2S3-L	9	542.00	0.841%	0.070%
2S3-L	10	591.60	0.280%	0.023%
2S3-L	11	641.20	0.031%	0.003%
2CB	1	25.00	1.344%	0.107%
2CB	2	75.00	18.862%	1.500%
2CB	3	130.00	73.549%	5.849%
2CB	4	168.00	3.764%	0.299%
2CB	5	184.00	1.247%	0.099%
2CB	6	193.50	0.206%	0.016%
2CB	7	201.50	0.290%	0.023%
2CB	8	219.00	0.438%	0.035%
2CB	9	245.00	0.262%	0.021%
2CB	10	265.00	0.037%	0.003%
3S3-L	1	181.79	0.312%	0.015%
3S3-L	2	234.77	0.507%	0.024%
3S3-L	3	287.75	1.873%	0.087%
3S3-L	4	340.74	4.292%	0.200%
3S3-L	5	393.72	10.808%	0.503%
3S3-L	6	446.70	47.405%	2.205%
3S3-L	7	499.68	32.345%	1.505%
3S3-L	8	552.66	1.288%	0.060%
3S3-L	9	605.65	0.858%	0.040%
3S3-L	10	658.63	0.195%	0.009%
3S3-L	11	711.61	0.117%	0.005%
3T4	1	221.34	0.694%	0.032%
3T4	2	284.85	0.694%	0.032%
3T4	3	348.37	0.347%	0.016%
3T4	4	411.88	1.171%	0.054%
3T4	5	475.40	1.496%	0.069%
3T4	6	538.91	77.628%	3.603%
3T4	7	602.43	16.930%	0.786%
3T4	8	665.94	1.041%	0.048%
2S1	1	59.82	0.139%	0.006%
2S1	2	81.26	0.859%	0.039%

Classe de Veículo	Faixa de Peso	Peso Total (kN)	Frequência Relativa	Frequência Absoluta
2S1	3	102.70	0.929%	0.042%
2S1	4	124.14	4.458%	0.200%
2S1	5	145.58	23.520%	1.054%
2S1	6	167.02	42.094%	1.887%
2S1	7	188.45	21.732%	0.974%
2S1	8	209.89	4.992%	0.224%
2S1	9	231.33	0.789%	0.035%
2S1	10	252.77	0.232%	0.010%
2S1	11	274.21	0.255%	0.011%
2S3-C	1	139.66	1.213%	0.037%
2S3-C	2	180.39	1.046%	0.032%
2S3-C	3	221.11	0.209%	0.006%
2S3-C	4	261.84	0.502%	0.015%
2S3-C	5	302.56	2.802%	0.086%
2S3-C	6	343.29	4.475%	0.138%
2S3-C	7	384.01	20.535%	0.632%
2S3-C	8	424.74	62.359%	1.920%
2S3-C	9	465.46	4.684%	0.144%
2S3-C	10	506.19	1.589%	0.049%
2S3-C	11	546.91	0.293%	0.009%
2S3-C	12	587.64	0.293%	0.009%
3CB	1	25.00	0.203%	0.004%
3CB	2	75.00	5.701%	0.116%
3CB	3	130.00	47.400%	0.965%
3CB	4	177.50	29.601%	0.603%
3CB	5	204.75	4.477%	0.091%
3CB	6	222.25	3.155%	0.064%
3CB	7	232.00	0.603%	0.012%
3CB	8	243.75	3.475%	0.071%
3CB	9	256.75	0.891%	0.018%
3CB	10	295.00	4.320%	0.088%
3CB	11	345.00	0.174%	0.004%
3BB	1	25.00	0.203%	0.004%
3BB	2	75.00	5.701%	0.116%
3BB	3	130.00	47.400%	0.965%
3BB	4	177.50	29.601%	0.603%
3BB	5	204.75	4.477%	0.091%
3BB	6	222.25	3.155%	0.064%
3BB	7	232.00	0.603%	0.012%
3BB	8	243.75	3.475%	0.071%
3BB	9	256.75	0.891%	0.018%
3BB	10	295.00	4.320%	0.088%

Classe de Veículo	Faixa de Peso	Peso Total (kN)	Frequência Relativa	Frequência Absoluta
3BB	11	345.00	0.174%	0.004%
2I2	1	151.51	15.698%	0.280%
2I2	2	190.12	40.116%	0.715%
2I2	3	228.73	20.640%	0.368%
2I2	4	267.34	8.721%	0.155%
2I2	5	305.96	7.267%	0.130%
2I2	6	344.57	5.523%	0.098%
2I2	7	383.18	1.163%	0.021%
2I2	8	421.79	0.872%	0.016%
3I3	1	210.39	0.579%	0.009%
3I3	2	245.86	1.100%	0.017%
3I3	3	281.32	1.273%	0.020%
3I3	4	316.78	0.752%	0.012%
3I3	5	352.25	1.389%	0.022%
3I3	6	387.71	4.340%	0.069%
3I3	7	423.17	7.870%	0.125%
3I3	8	458.64	11.806%	0.187%
3I3	9	494.10	17.188%	0.273%
3I3	10	529.56	43.113%	0.684%
3I3	11	565.03	10.590%	0.168%
3S3-C	1	245.76	0.121%	0.002%
3S3-C	2	288.48	0.242%	0.004%
3S3-C	3	331.20	0.726%	0.011%
3S3-C	4	373.92	1.695%	0.025%
3S3-C	5	416.64	12.712%	0.190%
3S3-C	6	459.36	76.513%	1.146%
3S3-C	7	502.08	7.385%	0.111%
3S3-C	8	544.80	0.363%	0.005%
3S3-C	9	587.52	0.000%	0.000%
3S3-C	10	630.24	0.242%	0.004%
2C2	1	120.70	0.190%	0.003%
2C2	2	149.09	1.555%	0.023%
2C2	3	177.49	20.178%	0.302%
2C2	4	205.88	59.391%	0.890%
2C2	5	234.28	10.755%	0.161%
2C2	6	262.67	5.457%	0.082%
2C2	7	291.06	1.015%	0.015%
2C2	8	319.46	0.857%	0.013%
2C2	9	347.85	0.444%	0.007%
2C2	10	376.25	0.095%	0.001%
2C2	11	404.64	0.063%	0.001%
3T6	1	418.30	0.783%	0.007%

Classe de Veículo	Faixa de Peso	Peso Total (kN)	Frequência Relativa	Frequência Absoluta
3T6	2	454.10	0.391%	0.003%
3T6	3	489.90	0.196%	0.002%
3T6	4	525.70	0.783%	0.007%
3T6	5	561.50	0.783%	0.007%
3T6	6	597.30	1.761%	0.015%
3T6	7	633.10	6.067%	0.052%
3T6	8	668.90	9.393%	0.080%
3T6	9	704.70	31.115%	0.265%
3T6	10	740.50	41.487%	0.353%
3T6	11	776.30	7.241%	0.062%
3S2	1	167.38	15.735%	0.117%
3S2	2	220.02	30.169%	0.224%
3S2	3	272.66	19.766%	0.146%
3S2	4	325.30	22.497%	0.167%
3S2	5	377.94	8.322%	0.062%
3S2	6	430.58	2.861%	0.021%
3S2	7	483.22	0.520%	0.004%
3S2	8	535.86	0.130%	0.001%
2I3	1	198.77	1.606%	0.006%
2I3	2	242.16	3.213%	0.012%
2I3	3	285.55	3.815%	0.014%
2I3	4	328.94	4.016%	0.015%
2I3	5	372.34	8.635%	0.032%
2I3	6	415.73	52.811%	0.196%
2I3	7	459.12	25.502%	0.095%
2I3	8	502.51	0.402%	0.001%
3C2	1	185.07	23.058%	0.066%
3C2	2	232.14	22.807%	0.065%
3C2	3	279.22	10.526%	0.030%
3C2	4	326.30	15.539%	0.044%
3C2	5	373.37	16.541%	0.047%
3C2	6	420.45	8.772%	0.025%
3C2	7	467.53	1.504%	0.004%
3C2	8	514.60	1.253%	0.004%
2C3	1	207.65	9.701%	0.027%
2C3	2	235.75	3.358%	0.009%
2C3	3	263.85	2.239%	0.006%
2C3	4	291.95	3.731%	0.010%
2C3	5	320.05	4.478%	0.012%
2C3	6	348.15	7.090%	0.020%
2C3	7	376.25	8.582%	0.024%
2C3	8	404.35	18.284%	0.051%

Classe de Veículo	Faixa de Peso	Peso Total (kN)	Frequência Relativa	Frequência Absoluta
2C3	9	432.45	39.925%	0.111%
2C3	10	460.55	2.239%	0.006%
2C3	11	488.65	0.373%	0.001%
3C3	1	253.64	0.820%	0.002%
3C3	2	296.94	0.820%	0.002%
3C3	3	340.24	5.328%	0.014%
3C3	4	383.54	9.836%	0.025%
3C3	5	426.84	28.279%	0.072%
3C3	6	470.14	37.295%	0.095%
3C3	7	513.44	15.164%	0.039%
3C3	8	556.74	2.049%	0.005%
3C3	9	600.04	0.410%	0.001%
3I1	1	391.82	4.651%	0.010%
3I1	2	418.46	6.977%	0.015%
3I1	3	445.09	19.767%	0.042%
3I1	4	471.73	32.558%	0.069%
3I1	5	498.37	31.395%	0.067%
3I1	6	525.01	3.488%	0.007%
3I1	7	551.64	0.000%	0.000%
3I1	8	578.28	1.163%	0.002%
3S1	1	146.55	4.908%	0.008%
3S1	2	167.81	19.632%	0.033%
3S1	3	189.07	42.945%	0.073%
3S1	4	210.33	23.926%	0.041%
3S1	5	231.58	4.908%	0.008%
3S1	6	252.84	2.454%	0.004%
3S1	7	274.10	1.227%	0.002%
3M6	1	665.38	4.348%	0.007%
3M6	2	692.53	8.696%	0.015%
3M6	3	719.68	15.217%	0.025%
3M6	4	746.83	58.696%	0.098%
3M6	5	773.98	10.870%	0.018%
3M6	6	801.13	2.174%	0.004%
3D4	1	221.34	0.694%	0.001%
3D4	2	284.85	0.694%	0.001%
3D4	3	348.37	0.347%	0.001%
3D4	4	411.88	1.171%	0.002%
3D4	5	475.40	1.496%	0.002%
3D4	6	538.91	77.628%	0.124%
3D4	7	602.43	16.930%	0.027%
3D4	8	665.94	1.041%	0.002%
2I1	1	271.03	1.227%	0.002%

Classe de Veículo	Faixa de Peso	Peso Total (kN)	Frequência Relativa	Frequência Absoluta
2I1	2	309.09	4.294%	0.006%
2I1	3	347.16	3.681%	0.005%
2I1	4	385.22	11.656%	0.017%
2I1	5	423.28	56.442%	0.083%
2I1	6	461.34	22.086%	0.033%
2I1	7	499.41	0.000%	0.000%
2I1	8	537.47	0.613%	0.001%
4C	1	131.57	1.429%	0.002%
4C	2	155.13	19.286%	0.028%
4C	3	178.68	27.857%	0.041%
4C	4	202.24	18.571%	0.027%
4C	5	225.80	7.857%	0.011%
4C	6	249.36	5.000%	0.007%
4C	7	272.92	12.143%	0.018%
4C	8	296.47	6.429%	0.009%
4C	9	320.03	1.429%	0.002%
3I2	1	190.33	39.286%	0.051%
3I2	2	236.18	8.929%	0.012%
3I2	3	282.03	7.143%	0.009%
3I2	4	327.88	3.571%	0.005%
3I2	5	373.73	14.286%	0.019%
3I2	6	419.58	26.786%	0.035%
SOMA				100.000%



## **APÊNDICE B - Macro Para Cálculo dos Posições Críticas e Momentos Fletores Máximos**

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
Set eixo = Worksheets("Distâncias entre eixos")  
Set plpeso = Worksheets("Peso por eixo")  
Set output = Worksheets("Momento máximo")  
  
vao = output.Cells(2, 2).Value  
cat = output.Cells(3, 2).Value  
num = output.Cells(4, 2).Value  
  
Dim peso(9) As Double  
Dim dist(9) As Double  
Dim y(9, 90000) As Double  
Dim Momento(90000) As Double  
  
For i = 0 To 90000  
    Momento(i) = 0  
Next i  
  
Set plan = plpeso  
  
For j = 2 To 280  
    If plan.Cells(j, 1).Value = cat And plan.Cells(j, 2).Value = num  
Then  
        peso(1) = plan.Cells(j, 3).Value  
        peso(2) = plan.Cells(j, 4).Value  
        peso(3) = plan.Cells(j, 5).Value  
        peso(4) = plan.Cells(j, 6).Value  
        peso(5) = plan.Cells(j, 7).Value  
        peso(6) = plan.Cells(j, 8).Value  
        peso(7) = plan.Cells(j, 9).Value  
        peso(8) = plan.Cells(j, 10).Value  
        peso(9) = plan.Cells(j, 11).Value  
    End If  
Next j  
  
    Set plan = eixo  
  
For j = 2 To 40  
    If plan.Cells(j, 1).Value = cat Then  
        If IsNumeric(plan.Cells(j, 4).Value) Then a = plan.Cells(j,  
4).Value Else a = 0  
        If IsNumeric(plan.Cells(j, 5).Value) Then b = plan.Cells(j,  
5).Value Else b = 0  
        If IsNumeric(plan.Cells(j, 6).Value) Then c = plan.Cells(j,  
6).Value Else c = 0  
        If IsNumeric(plan.Cells(j, 7).Value) Then d = plan.Cells(j,  
7).Value Else d = 0  
        If IsNumeric(plan.Cells(j, 8).Value) Then e = plan.Cells(j,  
8).Value Else e = 0  
        If IsNumeric(plan.Cells(j, 9).Value) Then f = plan.Cells(j,  
9).Value Else f = 0  
        If IsNumeric(plan.Cells(j, 10).Value) Then g = plan.Cells(j,  
10).Value Else g = 0  
        If IsNumeric(plan.Cells(j, 11).Value) Then h = plan.Cells(j,  
11).Value Else h = 0  
    End If
```

```

Next j

k = 1
For i = 0 To vao + a + b + c + d + e + f + g + h Step 0.01
  dist(1) = i
  dist(2) = dist(1) - a
  dist(3) = dist(2) - b
  dist(4) = dist(3) - c
  dist(5) = dist(4) - d
  dist(6) = dist(5) - e
  dist(7) = dist(6) - f
  dist(8) = dist(7) - g
  dist(9) = dist(8) - h

  For m = 1 To 9
    If dist(m) >= 0 And dist(m) <= vao / 2 Then
      y(m, k) = (dist(m) / 2) * peso(m)
    ElseIf dist(m) >= vao / 2 And dist(m) <= vao Then
      y(m, k) = 0.5 * (-dist(m) + vao) * peso(m)
    Else
      y(m, k) = 0
    End If

    Momento(k) = Momento(k) + y(m, k)

  Next m

  k = k + 1
Next i

Mtotal = 0
Max = 0
For n = 1 To k
  output.Cells(n, 11).Value = Momento(n)
  If Momento(n) > Mtotal Then
    Mtotal = Momento(n)
    Max = (n / 100) - 0.01
  End If
Next n

output.Cells(7, 2).Value = Mtotal
output.Cells(8, 2).Value = Max
output.Cells(9, 2).Value = Max - a
If b <> 0 Then
  output.Cells(10, 2).Value = Max - a - b
Else
  output.Cells(10, 2).Value = 0
End If
If c <> 0 Then
  output.Cells(11, 2).Value = Max - a - b - c
Else
  output.Cells(11, 2).Value = 0
  End If
If d <> 0 Then
  output.Cells(12, 2).Value = Max - a - b - c - d
Else
  output.Cells(12, 2).Value = 0
  End If
If e <> 0 Then
  output.Cells(13, 2).Value = Max - a - b - c - d - e
Else

```

```
output.Cells(13, 2).Value = 0
    End If
If f <> 0 Then
output.Cells(14, 2).Value = Max - a - b - c - d - e - f
Else
output.Cells(14, 2).Value = 0
    End If
If g <> 0 Then
output.Cells(15, 2).Value = Max - a - b - c - d - e - g
Else
output.Cells(15, 2).Value = 0
    End If
If h <> 0 Then
output.Cells(16, 2).Value = Max - a - b - c - d - e - g - h
Else
output.Cells(16, 2).Value = 0
    End If
```

End Sub

## APÊNDICE C - Posição Longitudinal Crítica Para Cada Classe de Veículo e Comprimento de Vão

Tabela C.1 – Posição longitudinal crítica para vão de 10m

Vão = 10 m																			
Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	x <sub>8</sub> (m)	x <sub>9</sub> (m)
2CC	2	8.84	5.00	-	-	-	-	-	2I3	5	15.89	11.96	7.43	5.00	2.57	-	-	-	-
2C	2	10.31	5.00	-	-	-	-	-	3S1	4	8.84	5.00	3.65	-2.63	-	-	-	-	-
3C	3	10.20	5.00	3.70	-	-	-	-	3S2	5	17.26	13.47	12.12	5.00	3.75	-	-	-	-
4C	4	11.64	6.35	5.00	3.65	-	-	-	3S3-C	6	13.31	9.43	8.13	5.00	3.75	2.50	-	-	-
2C2	4	21.03	16.87	9.81	5.00	-	-	-	3S3-L	6	17.16	13.31	12.01	6.25	5.00	3.75	-	-	-
2C3	5	20.85	17.00	8.98	5.00	3.70	-	-	3I1	6	17.58	13.86	12.56	7.43	5.00	3.75	-	-	-
3C2	5	9.68	5.00	3.70	-1.34	-6.24	-	-	3I2	5	8.54	5.00	3.70	-3.72	-6.15	-	-	-	-
3C3	6	22.97	17.75	16.45	9.62	5.00	3.70	-	3I3	6	17.32	13.78	12.48	7.43	5.00	2.57	-	-	-
3D4	7	20.08	16.33	15.03	9.92	8.62	5.00	3.70	3T4	7	20.03	16.28	14.98	9.87	8.62	5.00	3.75	-	-
2S1	3	16.45	12.51	5.00	-	-	-	-	3T6	9	16.69	13.35	12.00	6.25	5.00	1.30	0.05	-4.65	-5.90
2S2	4	17.10	13.22	5.00	3.75	-	-	-	3M6	9	25.58	22.12	20.77	14.54	13.29	12.04	6.25	10.79	9.54
2S3-C	5	12.52	8.43	5.00	3.75	2.50	-	-	2CB	2	10.85	5.00	-	-	-	-	-	-	-
2S3-L	5	16.48	12.51	6.25	5.00	3.75	-	-	3CB	3	11.85	5.00	3.55	-	-	-	-	-	-
2I1	5	16.53	12.65	7.43	5.00	3.75	-	-	3BB	3	11.85	5.00	3.55	-	-	-	-	-	-
2I2	4	18.94	15.21	7.43	5.00	-	-	-											

Tabela C.2 – Posição longitudinal crítica para vão de 15m

Vão = 15 m																			
Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	x <sub>8</sub> (m)	x <sub>9</sub> (m)
2CC	2	11.34	7.50	-	-	-	-	-	2I3	5	18.39	14.46	9.93	7.50	5.07	-	-	-	-
2C	2	12.81	7.50	-	-	-	-	-	3S1	4	12.69	8.85	7.50	1.22	-	-	-	-	-
3C	3	12.70	7.50	6.20	-	-	-	-	3S2	5	19.76	15.97	14.62	7.50	6.25	-	-	-	-
4C	4	14.14	8.85	7.50	6.15	-	-	-	3S3-C	6	15.81	11.93	10.63	7.50	6.25	5.00	-	-	-
2C2	4	18.72	14.56	7.50	2.69	-	-	-	3S3-L	6	18.41	14.56	13.26	7.50	6.25	5.00	-	-	-
2C3	5	23.35	19.50	11.48	7.50	6.20	-	-	3I1	6	20.08	16.36	15.06	9.93	7.50	6.25	-	-	-
3C2	5	13.48	8.80	7.50	2.46	-2.44	-	-	3I2	5	11.04	7.50	6.20	-1.22	-3.65	-	-	-	-
3C3	6	25.47	20.25	18.95	12.12	7.50	6.20	-	3I3	6	19.82	16.28	14.98	9.93	7.50	5.07	-	-	-
3D4	7	18.96	15.21	13.91	8.80	7.50	3.88	2.58	3T4	7	18.91	15.16	13.86	8.75	7.50	3.88	2.63	-	-
2S1	3	18.95	15.01	7.50	-	-	-	-	3T6	9	19.19	15.85	14.50	8.75	7.50	3.80	2.55	-2.15	-3.40
2S2	4	19.60	15.72	7.50	6.25	-	-	-	3M6	9	26.83	23.37	22.02	15.79	14.54	13.29	7.50	12.04	10.79
2S3-C	5	15.02	10.93	7.50	6.25	5.00	-	-	2CB	2	13.35	7.50	-	-	-	-	-	-	-
2S3-L	5	18.98	15.01	8.75	7.50	6.25	-	-	3CB	3	14.35	7.50	6.05	-	-	-	-	-	-
2I1	5	16.60	12.72	7.50	5.07	3.82	-	-	3BB	3	14.35	7.50	6.05	-	-	-	-	-	-
2I2	4	21.44	17.71	9.93	7.50	-	-	-											

Tabela C.3 – Posição longitudinal crítica para vão de 20m

Vão = 20 m																			
Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	x <sub>8</sub> (m)	x <sub>9</sub> (m)
2CC	2	13.84	10.00	-	-	-	-	-	2I3	5	20.89	16.96	12.43	10.00	7.57	-	-	-	-
2C	2	15.31	10.00	-	-	-	-	-	3S1	4	15.19	11.35	10.00	3.72	-	-	-	-	-
3C	3	15.20	10.00	8.70	-	-	-	-	3S2	5	22.26	18.47	17.12	10.00	8.75	-	-	-	-
4C	4	16.64	11.35	10.00	8.65	-	-	-	3S3-C	6	18.31	14.43	13.13	10.00	8.75	7.50	-	-	-
2C2	4	21.22	17.06	10.00	5.19	-	-	-	3S3-L	6	20.91	17.06	15.76	10.00	8.75	7.50	-	-	-
2C3	5	25.85	22.00	13.98	10.00	8.70	-	-	3I1	6	22.58	18.86	17.56	12.43	10.00	8.75	-	-	-
3C2	5	21.02	16.34	15.04	10.00	5.10	-	-	3I2	5	14.84	11.30	10.00	2.58	0.15	-	-	-	-
3C3	6	27.97	22.75	21.45	14.62	10.00	8.70	-	3I3	6	19.89	16.35	15.05	10.00	7.57	5.14	-	-	-
3D4	7	21.46	17.71	16.41	11.30	10.00	6.38	5.08	3T4	7	21.41	17.66	16.36	11.25	10.00	6.38	5.13	-	-
2S1	3	13.94	10.00	2.49	-	-	-	-	3T6	9	26.64	23.30	21.95	16.20	14.95	11.25	10.00	5.30	4.05
2S2	4	22.10	18.22	10.00	8.75	-	-	-	3M6	9	29.33	25.87	24.52	18.29	17.04	15.79	10.00	14.54	13.29
2S3-C	5	17.52	13.43	10.00	8.75	7.50	-	-	2CB	2	15.85	10.00	-	-	-	-	-	-	-
2S3-L	5	21.48	17.51	11.25	10.00	8.75	-	-	3CB	3	16.85	10.00	8.55	-	-	-	-	-	-
2I1	5	19.10	15.22	10.00	7.57	6.32	-	-	3BB	3	16.85	10.00	8.55	-	-	-	-	-	-
2I2	4	21.51	17.78	10.00	7.57	-	-	-											

Tabela C.4 – Posição longitudinal crítica para vão de 25m

Vão = 25 m																			
Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	x <sub>8</sub> (m)	x <sub>9</sub> (m)
2CC	2	16.34	12.50	-	-	-	-	-	2I3	5	23.39	19.46	14.93	12.50	10.07	-	-	-	-
2C	2	17.81	12.50	-	-	-	-	-	3S1	4	17.69	13.85	12.50	6.22	-	-	-	-	-
3C	3	17.70	12.50	11.20	-	-	-	-	3S2	5	24.76	20.97	19.62	12.50	11.25	-	-	-	-
4C	4	19.14	13.85	12.50	11.15	-	-	-	3S3-C	6	20.81	16.93	15.63	12.50	11.25	10.00	-	-	-
2C2	4	23.72	19.56	12.50	7.69	-	-	-	3S3-L	6	23.41	19.56	18.26	12.50	11.25	10.00	-	-	-
2C3	5	28.35	24.50	16.48	12.50	11.20	-	-	3I1	6	22.65	18.93	17.63	12.50	10.07	8.82	-	-	-
3C2	5	18.48	13.80	12.50	7.46	2.56	-	-	3I2	5	17.34	13.80	12.50	5.08	2.65	-	-	-	-
3C3	6	30.47	25.25	23.95	17.12	12.50	11.20		3I3	6	22.39	18.85	17.55	12.50	10.07	7.64	-	-	-
3D4	7	23.96	20.21	18.91	13.80	12.50	8.88	7.58	3T4	7	23.91	20.16	18.86	13.75	12.50	8.88	7.63	-	-
2S1	3	16.44	12.50	4.99	-	-	-	-	3T6	9	27.89	24.55	23.20	17.45	16.20	12.50	11.25	6.55	5.30
2S2	4	24.60	20.72	12.50	11.25	-	-	-	3M6	9	31.83	28.37	27.02	20.79	19.54	18.29	12.50	17.04	15.79
2S3-C	5	20.02	15.93	12.50	11.25	10.00	-	-	2CB	2	18.35	12.50	-	-	-	-	-	-	-
2S3-L	5	22.73	18.76	12.50	11.25	10.00	-	-	3CB	3	19.35	12.50	11.05	-	-	-	-	-	-
2I1	5	21.60	17.72	12.50	10.07	8.82	-	-	3BB	3	19.35	12.50	11.05	-	-	-	-	-	-
2I2	4	24.01	20.28	12.50	10.07	-	-	-											

Tabela C.5 – Posição longitudinal crítica para vão de 30m

Vão = 30 m																			
Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	x <sub>8</sub> (m)	x <sub>9</sub> (m)
2CC	2	18.84	15.00	-	-	-	-	-	2I3	5	25.89	21.96	17.43	15.00	12.57	-	-	-	-
2C	2	20.31	15.00	-	-	-	-	-	3S1	4	20.19	16.35	15.00	8.72	-	-	-	-	-
3C	3	20.20	15.00	13.70	-	-	-	-	3S2	5	27.26	23.47	22.12	15.00	13.75	-	-	-	-
4C	4	21.64	16.35	15.00	13.65	-	-	-	3S3-C	6	23.31	19.43	18.13	15.00	13.75	12.50	-	-	-
2C2	4	26.22	22.06	15.00	10.19	-	-	-	3S3-L	6	25.91	22.06	20.76	15.00	13.75	12.50	-	-	-
2C3	5	30.85	27.00	18.98	15.00	13.70	-	-	3I1	6	25.15	21.43	20.13	15.00	12.57	11.32	-	-	-
3C2	5	20.98	16.30	15.00	9.96	5.06	-	-	3I2	5	19.84	16.30	15.00	7.58	5.15	-	-	-	-
3C3	6	32.97	27.75	26.45	19.62	15.00	13.70	-	3I3	6	24.89	21.35	20.05	15.00	12.57	10.14	-	-	-
3D4	7	26.46	22.71	21.41	16.30	15.00	11.38	10.08	3T4	7	26.41	22.66	21.36	16.25	15.00	11.38	10.13	-	-
2S1	3	18.94	15.00	7.49	-	-	-	-	3T6	9	30.39	27.05	25.70	19.95	18.70	15.00	13.75	9.05	7.80
2S2	4	27.10	23.22	15.00	13.75	-	-	-	3M6	9	28.54	25.08	23.73	17.50	16.25	15.00	9.21	13.75	12.50
2S3-C	5	22.52	18.43	15.00	13.75	12.50	-	-	2CB	2	20.85	15.00	-	-	-	-	-	-	-
2S3-L	5	25.23	21.26	15.00	13.75	12.50	-	-	3CB	3	21.85	15.00	13.55	-	-	-	-	-	-
2I1	5	24.10	20.22	15.00	12.57	11.32	-	-	3BB	3	21.85	15.00	13.55	-	-	-	-	-	-
2I2	4	26.51	22.78	15.00	12.57	-	-	-											



Tabela C.6 – Posição longitudinal crítica para vão de 35m

Vão = 35 m																			
Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	x <sub>8</sub> (m)	x <sub>9</sub> (m)
2CC	2	21.34	17.50	-	-	-	-	-	2I3	5	28.39	24.46	19.93	17.50	15.07	-	-	-	-
2C	2	22.81	17.50	-	-	-	-	-	3S1	4	22.69	18.85	17.50	11.22	-	-	-	-	-
3C	3	22.70	17.50	16.20	-	-	-	-	3S2	5	29.76	25.97	24.62	17.50	16.25	-	-	-	-
4C	4	24.14	18.85	17.50	16.15	-	-	-	3S3-C	6	25.81	21.93	20.63	17.50	16.25	15.00	-	-	-
2C2	4	28.72	24.56	17.50	12.69	-	-	-	3S3-L	6	28.41	24.56	23.26	17.50	16.25	15.00	-	-	-
2C3	5	33.35	29.50	21.48	17.50	16.20	-	-	3I1	6	27.65	23.93	22.63	17.50	15.07	13.82	-	-	-
3C2	5	23.48	18.80	17.50	12.46	7.56	-	-	3I2	5	22.34	18.80	17.50	10.08	7.65	-	-	-	-
3C3	6	35.47	30.25	28.95	22.12	17.50	16.20	-	3I3	6	27.39	23.85	22.55	17.50	15.07	12.64	-	-	-
3D4	7	28.96	25.21	23.91	18.80	17.50	13.88	12.58	3T4	7	28.91	25.16	23.86	18.75	17.50	13.88	12.63	-	-
2S1	3	21.44	17.50	9.99	-	-	-	-	3T6	9	32.89	29.55	28.20	22.45	21.20	17.50	16.25	11.55	10.30
2S2	4	29.60	25.72	17.50	16.25	-	-	-	3M6	9	31.04	27.58	26.23	20.00	18.75	17.50	11.71	16.25	15.00
2S3-C	5	25.02	20.93	17.50	16.25	15.00	-	-	2CB	2	23.35	17.50	-	-	-	-	-	-	-
2S3-L	5	27.73	23.76	17.50	16.25	15.00	-	-	3CB	3	24.35	17.50	16.05	-	-	-	-	-	-
2I1	5	26.60	22.72	17.50	15.07	13.82	-	-	3BB	3	24.35	17.50	16.05	-	-	-	-	-	-
2I2	4	29.01	25.28	17.50	15.07	-	-	-											

Tabela C.7 – Posição longitudinal crítica para vão de 40m

Vão = 40 m																			
Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	Classe	Nº de Eixos	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	x <sub>4</sub> (m)	x <sub>5</sub> (m)	x <sub>6</sub> (m)	x <sub>7</sub> (m)	x <sub>8</sub> (m)	x <sub>9</sub> (m)
2CC	2	23.84	20.00	-	-	-	-	-	2I3	5	30.89	26.96	22.43	20.00	17.57	-	-	-	-
2C	2	25.31	20.00	-	-	-	-	-	3S1	4	25.19	21.35	20.00	13.72	-	-	-	-	-
3C	3	25.20	20.00	18.70	-	-	-	-	3S2	5	32.26	28.47	27.12	20.00	18.75	-	-	-	-
4C	4	26.64	21.35	20.00	18.65	-	-	-	3S3-C	6	28.31	24.43	23.13	20.00	18.75	17.50	-	-	-
2C2	4	31.22	27.06	20.00	15.19	-	-	-	3S3-L	6	30.91	27.06	25.76	20.00	18.75	17.50	-	-	-
2C3	5	35.85	32.00	23.98	20.00	18.70	-	-	3I1	6	30.15	26.43	25.13	20.00	17.57	16.32	-	-	-
3C2	5	25.98	21.30	20.00	14.96	10.06	-	-	3I2	5	24.84	21.30	20.00	12.58	10.15	-	-	-	-
3C3	6	37.97	32.75	31.45	24.62	20.00	18.70	-	3I3	6	29.89	26.35	25.05	20.00	17.57	15.14	-	-	-
3D4	7	31.46	27.71	26.41	21.30	20.00	16.38	15.08	3T4	7	31.41	27.66	26.36	21.25	20.00	16.38	15.13	-	-
2S1	3	23.94	20.00	12.49	-	-	-	-	3T6	9	35.39	32.05	30.70	24.95	23.70	20.00	18.75	14.05	12.80
2S2	4	32.10	28.22	20.00	18.75	-	-	-	3M6	9	33.54	30.08	28.73	22.50	21.25	20.00	14.21	18.75	17.50
2S3-C	5	27.52	23.43	20.00	18.75	17.50	-	-	2CB	2	25.85	20.00	-	-	-	-	-	-	-
2S3-L	5	30.23	26.26	20.00	18.75	17.50	-	-	3CB	3	26.85	20.00	18.55	-	-	-	-	-	-
2I1	5	29.10	25.22	20.00	17.57	16.32	-	-	3BB	3	26.85	20.00	18.55	-	-	-	-	-	-
2I2	4	31.51	27.78	20.00	17.57	-	-	-											

## **APÊNDICE D – Momentos Máximos no Meio do Vão Sem Coeficiente de Impacto**

*Tabela D. 1 – Momentos máximos no meio do vão sem coeficiente de impacto*

Classe de Veículo	Faixa de Peso	M <sub>max</sub> (kN.m) sem coeficiente de impacto						
		10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m
3C	1	128.50	215.97	304.62	393.27	481.92	570.57	659.22
3C	2	187.01	312.93	440.46	567.98	695.51	823.03	950.56
...								
3C	9	596.59	991.69	1391.34	1790.99	2190.64	2590.29	2989.94
3C	10	655.10	1088.66	1527.19	1965.71	2404.24	2842.76	3281.29
2C	1	74.64	124.58	176.32	228.05	279.78	331.52	383.25
2C	2	111.88	185.85	262.37	338.90	415.42	491.95	568.47
...								
2C	8	335.30	553.43	778.70	1003.98	1229.25	1454.53	1679.80
2C	9	372.54	614.69	864.76	1114.82	1364.89	1614.96	1865.02
2S2	1	101.23	159.08	240.70	333.65	435.54	537.44	639.34
2S2	2	145.74	229.02	345.94	478.60	622.39	766.19	909.98
...								
2S2	10	501.77	788.49	1187.85	1638.21	2117.17	2596.13	3075.08
2S2	11	546.27	858.42	1293.09	1783.16	2304.02	2824.87	3345.72
2CC	1	33.57	57.24	80.90	104.57	128.23	151.90	175.56
2CC	2	67.18	113.77	160.37	206.96	253.56	300.15	346.74
...								
2CC	7	235.19	396.43	557.68	718.92	880.16	1041.41	1202.65
2CC	8	268.79	452.97	637.14	821.31	1005.48	1189.66	1373.83
2S3-L	1	216.90	347.04	519.08	699.08	880.58	1062.08	1243.58
2S3-L	2	294.81	471.70	704.32	945.35	1188.85	1432.35	1675.85
...								
2S3-L	10	918.12	1468.99	2186.26	2915.50	3655.00	4394.50	5134.00
2S3-L	11	996.03	1593.65	2371.50	3161.77	3963.27	4764.77	5566.27
2CB	1	34.69	61.21	92.46	123.71	154.96	186.21	217.46
2CB	2	104.06	183.63	277.38	371.13	464.88	558.63	652.38
...								
2CB	9	339.94	599.85	906.10	1212.35	1518.60	1824.85	2131.10
2CB	10	367.69	648.82	980.07	1311.32	1642.57	1973.82	2305.07
3S3-L	1	235.42	387.33	607.01	831.50	1058.74	1285.98	1513.21
3S3-L	2	307.06	504.75	790.26	1080.83	1374.29	1667.76	1961.22
...								
3S3-L	10	880.15	1444.07	2256.22	3075.45	3898.74	4722.02	5545.31
3S3-L	11	951.78	1561.49	2439.47	3324.78	4214.29	5103.80	5993.32
3T4	1	195.06	377.98	641.60	912.44	1189.11	1465.78	1742.46
3T4	2	253.46	488.96	829.92	1179.44	1535.50	1891.57	2247.63
...								

Classe de Veículo	Faixa de Peso	M <sub>max</sub> (kN.m) sem coeficiente de impacto						
		10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m
3T4	7	545.46	1048.90	1771.51	2514.41	3267.45	4020.48	4773.52
3T4	8	603.86	1160.97	1959.83	2781.41	3613.84	4446.27	5278.69
2S1	1	70.06	105.08	177.14	251.92	326.69	401.47	476.24
2S1	2	96.48	144.72	240.68	342.25	443.83	545.40	646.97
...								
2S1	10	307.87	461.80	748.97	1064.94	1380.90	1696.87	2012.83
2S1	11	334.29	501.44	812.51	1155.27	1498.04	1840.80	2183.56
2S3-C	1	208.08	371.46	545.95	720.53	895.11	1069.69	1244.26
2S3-C	2	270.82	483.23	708.61	934.10	1159.58	1385.07	1610.55
...								
2S3-C	11	835.55	1489.16	2172.56	2856.20	3539.85	4223.49	4907.13
2S3-C	12	898.30	1600.93	2335.22	3069.77	3804.32	4538.87	5273.41
3CB	1	35.06	58.35	89.60	120.85	152.10	183.35	214.60
3CB	2	105.17	175.05	268.80	362.55	456.30	550.05	643.80
...								
3CB	10	413.65	688.53	1057.28	1426.03	1794.78	2163.53	2532.28
3CB	11	483.76	805.23	1236.48	1667.73	2098.98	2530.23	2961.48
3BB	1	35.06	58.35	89.60	120.85	152.10	183.35	214.60
3BB	2	105.17	175.05	268.80	362.55	456.30	550.05	643.80
...								
3BB	10	413.65	688.53	1057.28	1426.03	1794.78	2163.53	2532.28
3BB	11	483.76	805.23	1236.48	1667.73	2098.98	2530.23	2961.48
2I2	1	188.77	311.44	475.18	656.34	845.72	1035.11	1224.49
2I2	2	239.30	394.79	601.28	829.28	1066.93	1304.58	1542.23
...								
2I2	7	491.98	811.57	1231.79	1693.98	2172.95	2651.93	3130.91
2I2	8	542.51	894.93	1357.89	1866.92	2394.16	2921.40	3448.64
3I3	1	236.68	408.67	640.49	903.48	1166.47	1429.46	1692.45
3I3	2	278.30	480.36	751.81	1057.91	1365.23	1672.55	1979.87
...								
3I3	10	611.29	1053.87	1645.36	2293.30	2955.26	3617.21	4279.17
3I3	11	652.91	1125.56	1757.05	2447.72	3154.01	3860.29	4566.58
3S3-C	1	318.71	612.50	915.36	1222.56	1529.76	1836.96	2144.16
3S3-C	2	374.65	720.40	1076.19	1436.79	1797.39	2157.99	2518.59
...								
3S3-C	9	766.25	1475.71	2202.03	2936.43	3670.83	4405.23	5139.63
3S3-C	10	822.20	1583.61	2362.86	3150.66	3938.46	4726.26	5514.06
2C2	1	97.17	196.85	336.20	481.46	632.33	783.20	934.07
2C2	2	121.68	245.50	418.61	598.51	784.87	971.24	1157.60
...								
2C2	11	342.19	683.37	1160.27	1651.97	2157.77	2663.57	3169.38
3T6	1	259.34	523.13	889.97	1330.59	1841.51	2362.52	2885.40

Classe de Veículo	Faixa de Peso	M <sub>max</sub> (kN.m) sem coeficiente de impacto						
		10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m
3T6	2	281.73	568.32	967.39	1446.15	2001.34	2567.02	3134.65
...								
3T6	10	460.83	929.78	1586.79	2370.68	3279.92	4202.99	5128.62
3T6	11	483.22	974.97	1664.22	2486.24	3439.75	4407.49	5377.87
3S2	1	193.19	310.30	491.88	691.61	900.83	1110.06	1319.28
3S2	2	256.41	411.79	652.19	916.34	1191.37	1466.39	1741.42
...								
3S2	7	572.50	919.20	1453.71	2040.03	2644.05	3248.08	3852.10
3S2	8	635.72	1020.68	1614.02	2264.76	2934.59	3604.41	4274.24
2I3	1	246.61	438.14	671.87	915.08	1163.54	1412.00	1660.46
2I3	2	302.40	536.93	822.73	1119.42	1422.12	1724.81	2027.51
...								
2I3	7	581.30	1030.91	1577.06	2141.09	2714.99	3288.89	3862.79
2I3	8	637.09	1129.70	1727.93	2345.42	2973.56	3601.71	4229.85
3C2	1	181.05	344.93	522.31	749.09	980.42	1211.76	1443.09
3C2	2	227.87	433.59	658.43	942.69	1232.87	1523.05	1813.23
...								
3C2	7	461.98	876.88	1339.03	1913.79	2498.20	3082.61	3667.01
3C2	8	508.80	965.54	1475.15	2108.01	2751.26	3394.52	4037.77
2C3	1	263.97	458.49	653.01	856.59	1096.41	1349.26	1608.83
2C3	2	301.54	523.46	745.37	977.46	1250.23	1537.46	1832.15
...								
2C3	10	602.07	1043.16	1484.26	1944.40	2480.75	3043.06	3618.75
2C3	11	639.63	1108.12	1576.62	2065.27	2634.57	3231.26	3842.08
3C3	1	286.01	490.23	694.44	920.34	1222.65	1530.11	1845.36
3C3	2	337.72	577.93	818.14	1083.72	1438.67	1799.67	2168.93
...								
3C3	8	647.99	1104.16	1560.33	2063.96	2734.84	3417.01	4110.35
3C3	9	699.71	1191.87	1684.03	2227.34	2950.86	3686.57	4433.92
3I1	1	509.35	834.88	1269.08	1751.65	2241.42	2731.20	3220.97
3I1	2	544.88	893.01	1357.24	1872.05	2395.12	2918.19	3441.26
...								
3I1	7	722.51	1183.69	1798.03	2474.04	3163.60	3853.15	4542.71
3I1	8	758.03	1241.82	1886.19	2594.44	3317.30	4040.15	4763.00
3S1	1	253.60	415.94	599.13	782.32	965.50	1148.69	1331.88
3S1	2	292.38	478.98	688.74	898.50	1108.26	1318.02	1527.78
...								
3S1	6	447.50	731.11	1047.17	1363.22	1679.27	1995.32	2311.38
3S1	7	486.28	794.15	1136.77	1479.40	1822.03	2164.65	2507.28
3M6	1	651.32	1067.19	1736.95	2439.56	3182.21	4013.93	4845.65
3M6	2	678.81	1112.15	1809.91	2541.87	3313.25	4178.91	5044.57
...								

Classe de Veículo	Faixa de Peso	$M_{max}$ (kN.m) sem coeficiente de impacto						
		10m	15m	20m	25m	30m	35m	40m
3M6	5	761.27	1247.02	2028.78	2848.81	3706.38	4673.85	5641.32
3M6	6	788.76	1291.97	2101.74	2951.12	3837.42	4838.83	5840.24
3D4	1	193.25	375.32	638.09	908.72	1185.39	1462.07	1738.74
3D4	2	251.11	486.20	825.38	1174.67	1530.73	1886.80	2242.86
...								
3D4	7	540.42	1043.86	1761.84	2504.39	3257.42	4010.46	4763.49
3D4	8	598.29	1155.39	1949.13	2770.33	3602.76	4435.19	5267.62
2I1	1	360.02	609.93	938.51	1277.30	1616.09	1954.88	2293.67
2I1	2	411.61	697.37	1072.56	1458.93	1845.30	2231.67	2618.03
...								
2I1	7	669.59	1134.61	1742.82	2367.07	2991.33	3615.59	4239.85
2I1	8	721.18	1222.05	1876.87	2548.70	3220.54	3892.37	4564.21
4C	1	247.77	403.45	567.91	732.37	896.83	1061.29	1225.75
4C	2	293.45	477.54	671.44	865.35	1059.26	1253.17	1447.08
...								
4C	8	567.56	922.07	1292.67	1663.26	2033.85	2404.44	2775.03
4C	9	613.25	996.16	1396.20	1796.24	2196.28	2596.32	2996.36
3I2	1	218.70	356.02	530.65	768.56	1006.46	1244.37	1482.27
3I2	2	272.77	443.20	660.11	955.33	1250.55	1545.77	1840.99
...								
3I2	5	434.95	704.77	1048.49	1515.65	1982.81	2449.96	2917.12
3I2	6	489.02	791.96	1177.95	1702.42	2226.89	2751.36	3275.83

## **APÊNDICE E - Cálculo do Dano Acumulado para Espectro de Veículos Reais**

*Tabela E.1 – Cálculo do Dano Acumulado para Espectro de Veículos Reais para ponte com vão de 40m e detalhe categoria 112MPa*

Classe de veículo	Categoria de peso	M <sub>max</sub> (kN.m)	M <sub>viga ext c/ imp</sub> (kN.m)	Δσ (MPa)	n	N	Dano por ano
3C	1	659.22	422.72	6.54	7.52E+05	3.75E+12	2.67E-09
3C	2	950.56	609.55	9.43	6.11E+06	6.02E+11	1.36E-07
3C	3	1241.90	796.37	12.32	6.31E+06	1.58E+11	5.32E-07
3C	4	1533.24	983.19	15.21	5.13E+06	5.51E+10	1.24E-06
3C	5	1824.58	1170.02	18.10	5.02E+06	2.31E+10	2.90E-06
3C	6	2115.92	1356.84	20.99	4.55E+06	1.10E+10	5.52E-06
3C	7	2407.26	1543.66	23.88	2.00E+05	5.78E+09	4.62E-07
3C	8	2698.60	1730.49	26.77	2.22E+04	3.26E+09	9.08E-08
3C	9	2989.94	1917.31	29.66	3.42E+03	1.95E+09	2.33E-08
3C	10	3281.29	2104.13	32.55	1.71E+03	1.23E+09	1.86E-08
2C	1	383.25	245.76	3.80	2.80E+05	5.65E+13	6.62E-11
2C	2	568.47	364.54	5.64	2.55E+06	7.86E+12	4.32E-09
2C	3	753.69	483.31	7.48	7.15E+06	1.92E+12	4.96E-08
2C	4	938.92	602.08	9.31	6.60E+06	6.40E+11	1.38E-07
2C	5	1124.14	720.86	11.15	2.81E+06	2.60E+11	1.44E-07
2C	6	1309.36	839.63	12.99	8.68E+05	1.21E+11	9.54E-08
2C	7	1494.58	958.40	14.82	1.37E+05	6.26E+10	2.91E-08
2C	8	1679.80	1077.18	16.66	1.37E+04	3.49E+10	5.22E-09
2C	9	1865.02	1195.95	18.50	1.71E+03	2.07E+10	1.10E-09
2S2	1	639.34	409.98	6.34	9.96E+03	4.37E+12	3.04E-11
2S2	2	909.98	583.53	9.03	1.19E+05	7.48E+11	2.13E-09
2S2	3	1180.62	757.07	11.71	4.15E+06	2.04E+11	2.72E-07
2S2	4	1451.25	930.62	14.40	7.95E+06	7.25E+10	1.46E-06
2S2	5	1721.89	1104.17	17.08	3.84E+06	3.08E+10	1.66E-06
2S2	6	1992.53	1277.72	19.76	1.87E+06	1.49E+10	1.67E-06
2S2	7	2263.17	1451.26	22.45	9.26E+05	7.86E+09	1.57E-06
2S2	8	2533.81	1624.81	25.13	6.79E+05	4.47E+09	2.02E-06
2S2	9	2804.44	1798.36	27.82	8.46E+04	2.69E+09	4.19E-07
2S2	10	3075.08	1971.91	30.50	1.83E+04	1.70E+09	1.43E-07
2S2	11	3345.72	2145.45	33.19	1.49E+04	1.11E+09	1.79E-07
2CC	1	175.56	112.58	1.74	4.27E+05	2.80E+15	2.04E-12
2CC	2	346.74	222.35	3.44	3.28E+06	9.31E+13	4.69E-10
2CC	3	517.93	332.12	5.14	9.02E+06	1.25E+13	9.60E-09
2CC	4	689.11	441.89	6.84	4.29E+06	3.00E+12	1.90E-08
2CC	5	860.29	551.66	8.53	1.04E+06	9.91E+11	1.40E-08
2CC	6	1031.47	661.43	10.23	6.15E+04	4.00E+11	2.05E-09
2CC	7	1202.65	771.20	11.93	3.59E+04	1.86E+11	2.58E-09

Classe de veículo	Categoria de peso	M <sub>max</sub> (kN.m)	M <sub>viga ext c/ imp</sub> (kN.m)	Δσ (MPa)	n	N	Dano por ano
2CC	8	1373.83	880.97	13.63	3.08E+04	9.54E+10	4.30E-09
2S3-L	1	1243.58	797.45	12.34	4.38E+05	1.57E+11	3.72E-08
2S3-L	2	1675.85	1074.64	16.62	5.34E+05	3.53E+10	2.01E-07
2S3-L	3	2108.11	1351.84	20.91	8.47E+05	1.12E+10	1.01E-06
2S3-L	4	2540.38	1629.03	25.20	1.18E+06	4.41E+09	3.56E-06
2S3-L	5	2972.65	1906.22	29.49	1.60E+06	2.01E+09	1.06E-05
2S3-L	6	3404.92	2183.42	33.77	7.04E+06	1.02E+09	9.20E-05
2S3-L	7	3837.19	2460.61	38.06	1.63E+06	5.61E+08	3.88E-05
2S3-L	8	4269.46	2737.81	42.35	1.69E+05	3.29E+08	6.86E-06
2S3-L	9	4701.73	3015.00	46.64	1.14E+05	2.03E+08	7.50E-06
2S3-L	10	5134.00	3292.19	50.92	3.81E+04	1.31E+08	3.88E-06
2S3-L	11	5566.27	3569.39	55.21	4.23E+03	8.74E+07	6.46E-07
2CB	1	217.46	139.45	2.16	1.76E+05	9.60E+14	2.44E-12
2CB	2	652.38	418.34	6.47	2.46E+06	3.95E+12	8.31E-09
2CB	3	1130.79	725.12	11.22	9.61E+06	2.53E+11	5.07E-07
2CB	4	1461.33	937.08	14.50	4.92E+05	7.01E+10	9.36E-08
2CB	5	1600.50	1026.33	15.88	1.63E+05	4.45E+10	4.89E-08
2CB	6	1683.14	1079.32	16.70	2.69E+04	3.46E+10	1.04E-08
2CB	7	1752.72	1123.94	17.39	3.79E+04	2.82E+10	1.79E-08
2CB	8	1904.94	1221.55	18.90	5.73E+04	1.86E+10	4.10E-08
2CB	9	2131.10	1366.58	21.14	3.42E+04	1.06E+10	4.30E-08
2CB	10	2305.07	1478.13	22.86	4.89E+03	7.17E+09	9.09E-09
3S3-L	1	1513.21	970.35	15.01	2.38E+04	5.88E+10	5.40E-09
3S3-L	2	1961.22	1257.64	19.45	3.88E+04	1.61E+10	3.21E-08
3S3-L	3	2409.23	1544.93	23.90	1.43E+05	5.75E+09	3.32E-07
3S3-L	4	2857.25	1832.22	28.34	3.28E+05	2.45E+09	1.78E-06
3S3-L	5	3305.26	2119.51	32.79	8.26E+05	1.18E+09	9.30E-06
3S3-L	6	3753.27	2406.79	37.23	3.62E+06	6.27E+08	7.70E-05
3S3-L	7	4201.28	2694.08	41.67	2.47E+06	3.57E+08	9.24E-05
3S3-L	8	4649.29	2981.37	46.12	9.84E+04	2.15E+08	6.10E-06
3S3-L	9	5097.30	3268.66	50.56	6.56E+04	1.36E+08	6.44E-06
3S3-L	10	5545.31	3555.95	55.00	1.49E+04	8.90E+07	2.23E-06
3S3-L	11	5993.32	3843.23	59.45	8.94E+03	6.04E+07	1.97E-06
3T4	1	1742.46	1117.36	17.28	5.29E+04	2.91E+10	2.43E-08
3T4	2	2247.63	1441.30	22.29	5.29E+04	8.14E+09	8.66E-08
3T4	3	2752.81	1765.25	27.31	2.64E+04	2.95E+09	1.19E-07
3T4	4	3257.99	2089.19	32.32	8.92E+04	1.27E+09	9.36E-07
3T4	5	3763.16	2413.14	37.33	1.14E+05	6.19E+08	2.46E-06
3T4	6	4268.34	2737.09	42.34	5.92E+06	3.30E+08	2.39E-04
3T4	7	4773.52	3061.03	47.35	1.29E+06	1.88E+08	9.14E-05
3T4	8	5278.69	3384.98	52.36	7.93E+04	1.14E+08	9.29E-06
2S1	1	476.24	305.39	4.72	1.03E+04	1.91E+13	7.18E-12



Classe de veículo	Categoria de peso	M <sub>max</sub> (kN.m)	M <sub>viga ext c/ imp</sub> (kN.m)	Δσ (MPa)	n	N	Dano por ano
2S1	2	646.97	414.87	6.42	6.33E+04	4.12E+12	2.05E-10
2S1	3	817.70	524.36	8.11	6.84E+04	1.28E+12	7.14E-10
2S1	4	988.44	633.84	9.80	3.28E+05	4.95E+11	8.84E-09
2S1	5	1159.17	743.32	11.50	1.73E+06	2.23E+11	1.04E-07
2S1	6	1329.90	852.80	13.19	3.10E+06	1.12E+11	3.68E-07
2S1	7	1500.63	962.29	14.88	1.60E+06	6.14E+10	3.48E-07
2S1	8	1671.37	1071.77	16.58	3.68E+05	3.58E+10	1.37E-07
2S1	9	1842.10	1181.25	18.27	5.81E+04	2.20E+10	3.52E-08
2S1	10	2012.83	1290.73	19.97	1.71E+04	1.41E+10	1.61E-08
2S1	11	2183.56	1400.22	21.66	1.88E+04	9.41E+09	2.67E-08
2S3-C	1	1244.26	797.89	12.34	6.13E+04	1.57E+11	5.22E-09
2S3-C	2	1610.55	1032.77	15.98	5.29E+04	4.31E+10	1.64E-08
2S3-C	3	1976.84	1267.65	19.61	1.06E+04	1.55E+10	9.12E-09
2S3-C	4	2343.12	1502.54	23.24	2.54E+04	6.61E+09	5.12E-08
2S3-C	5	2709.41	1737.42	26.87	1.42E+05	3.20E+09	5.91E-07
2S3-C	6	3075.70	1972.30	30.51	2.26E+05	1.70E+09	1.78E-06
2S3-C	7	3441.98	2207.18	34.14	1.04E+06	9.66E+08	1.43E-05
2S3-C	8	3808.27	2442.06	37.77	3.15E+06	5.83E+08	7.21E-05
2S3-C	9	4174.55	2676.95	41.41	2.37E+05	3.68E+08	8.58E-06
2S3-C	10	4540.84	2911.83	45.04	8.04E+04	2.42E+08	4.43E-06
2S3-C	11	4907.13	3146.71	48.67	1.48E+04	1.64E+08	1.20E-06
2S3-C	12	5273.41	3381.59	52.31	1.48E+04	1.14E+08	1.72E-06
3CB	1	214.60	137.61	2.13	6.79E+03	1.03E+15	8.83E-14
3CB	2	643.80	412.84	6.39	1.91E+05	4.22E+12	6.02E-10
3CB	3	1115.92	715.59	11.07	1.58E+06	2.70E+11	7.83E-08
3CB	4	1523.66	977.05	15.11	9.90E+05	5.69E+10	2.32E-07
3CB	5	1757.57	1127.05	17.43	1.50E+05	2.78E+10	7.17E-08
3CB	6	1907.79	1223.38	18.92	1.05E+05	1.85E+10	7.61E-08
3CB	7	1991.49	1277.05	19.75	2.02E+04	1.49E+10	1.80E-08
3CB	8	2092.35	1341.73	20.75	1.16E+05	1.16E+10	1.33E-07
3CB	9	2203.94	1413.29	21.86	2.98E+04	8.98E+09	4.42E-08
3CB	10	2532.28	1623.83	25.12	1.44E+05	4.48E+09	4.30E-07
3CB	11	2961.48	1899.06	29.38	5.81E+03	2.05E+09	3.78E-08
3BB	1	214.60	137.61	2.13	6.79E+03	1.03E+15	8.83E-14
3BB	2	643.80	412.84	6.39	1.91E+05	4.22E+12	6.02E-10
3BB	3	1115.92	715.59	11.07	1.58E+06	2.70E+11	7.83E-08
3BB	4	1523.66	977.05	15.11	9.90E+05	5.69E+10	2.32E-07
3BB	5	1757.57	1127.05	17.43	1.50E+05	2.78E+10	7.17E-08
3BB	6	1907.79	1223.38	18.92	1.05E+05	1.85E+10	7.61E-08
3BB	7	1991.49	1277.05	19.75	2.02E+04	1.49E+10	1.80E-08
3BB	8	2092.35	1341.73	20.75	1.16E+05	1.16E+10	1.33E-07
3BB	9	2203.94	1413.29	21.86	2.98E+04	8.98E+09	4.42E-08

Classe de veículo	Categoria de peso	M <sub>max</sub> (kN.m)	M <sub>viga ext c/ imp</sub> (kN.m)	Δσ (MPa)	n	N	Dano por ano
3BB	10	2532.28	1623.83	25.12	1.44E+05	4.48E+09	4.30E-07
3BB	11	2961.48	1899.06	29.38	5.81E+03	2.05E+09	3.78E-08
2I2	1	1224.49	785.21	12.15	4.60E+05	1.70E+11	3.61E-08
2I2	2	1542.23	988.96	15.30	1.17E+06	5.35E+10	2.93E-07
2I2	3	1859.96	1192.71	18.45	6.04E+05	2.10E+10	3.84E-07
2I2	4	2177.70	1396.46	21.60	2.55E+05	9.53E+09	3.57E-07
2I2	5	2495.43	1600.21	24.75	2.13E+05	4.82E+09	5.88E-07
2I2	6	2813.17	1803.96	27.90	1.62E+05	2.65E+09	8.14E-07
2I2	7	3130.91	2007.70	31.06	3.41E+04	1.55E+09	2.93E-07
2I2	8	3448.64	2211.45	34.21	2.55E+04	9.57E+08	3.56E-07
3I3	1	1692.45	1085.29	16.79	1.51E+04	3.36E+10	5.98E-09
3I3	2	1979.87	1269.60	19.64	2.87E+04	1.53E+10	2.49E-08
3I3	3	2267.28	1453.90	22.49	3.32E+04	7.79E+09	5.68E-08
3I3	4	2554.69	1638.20	25.34	1.96E+04	4.29E+09	6.09E-08
3I3	5	2842.10	1822.51	28.19	3.62E+04	2.52E+09	1.92E-07
3I3	6	3129.52	2006.81	31.04	1.13E+05	1.56E+09	9.70E-07
3I3	7	3416.93	2191.12	33.89	2.05E+05	1.00E+09	2.73E-06
3I3	8	3704.34	2375.42	36.74	3.08E+05	6.69E+08	6.13E-06
3I3	9	3991.75	2559.73	39.59	4.48E+05	4.61E+08	1.30E-05
3I3	10	4279.17	2744.03	42.45	1.12E+06	3.25E+08	4.60E-05
3I3	11	4566.58	2928.33	45.30	2.76E+05	2.35E+08	1.57E-05
3S3-C	1	2144.16	1374.95	21.27	2.98E+03	1.03E+10	3.86E-09
3S3-C	2	2518.59	1615.06	24.98	5.96E+03	4.61E+09	1.72E-08
3S3-C	3	2893.03	1855.16	28.70	1.79E+04	2.30E+09	1.03E-07
3S3-C	4	3267.46	2095.27	32.41	4.17E+04	1.25E+09	4.44E-07
3S3-C	5	3641.89	2335.38	36.12	3.13E+05	7.29E+08	5.72E-06
3S3-C	6	4016.33	2575.48	39.84	1.88E+06	4.47E+08	5.62E-05
3S3-C	7	4390.76	2815.59	43.55	1.82E+05	2.86E+08	8.47E-06
3S3-C	8	4765.20	3055.70	47.27	8.94E+03	1.90E+08	6.27E-07
3S3-C	9	5139.63	3295.80	50.98	0.00E+00	1.30E+08	0.00E+00
3S3-C	10	5514.06	3535.91	54.69	5.96E+03	9.16E+07	8.67E-07
2C2	1	934.07	598.98	9.27	4.68E+03	6.57E+11	9.51E-11
2C2	2	1157.60	742.32	11.48	3.82E+04	2.25E+11	2.27E-09
2C2	3	1381.13	885.66	13.70	4.96E+05	9.29E+10	7.12E-08
2C2	4	1604.66	1029.00	15.92	1.46E+06	4.39E+10	4.44E-07
2C2	5	1828.19	1172.33	18.13	2.65E+05	2.29E+10	1.54E-07
2C2	6	2051.72	1315.67	20.35	1.34E+05	1.28E+10	1.39E-07
2C2	7	2275.25	1459.01	22.57	2.50E+04	7.66E+09	4.35E-08
2C2	8	2498.78	1602.35	24.79	2.11E+04	4.79E+09	5.86E-08
2C2	9	2722.32	1745.69	27.00	1.09E+04	3.12E+09	4.67E-08
2C2	10	2945.85	1889.03	29.22	2.34E+03	2.10E+09	1.48E-08
2C2	11	3169.38	2032.37	31.44	1.56E+03	1.46E+09	1.43E-08

Classe de veículo	Categoria de peso	M <sub>max</sub> (kN.m)	M <sub>viga ext c/ imp</sub> (kN.m)	Δσ (MPa)	n	N	Dano por ano
3T6	1	2885.40	1850.27	28.62	1.09E+04	2.33E+09	6.24E-08
3T6	2	3134.65	2010.10	31.09	5.47E+03	1.54E+09	4.72E-08
3T6	3	3383.89	2169.93	33.57	2.73E+03	1.05E+09	3.46E-08
3T6	4	3633.14	2329.76	36.04	1.09E+04	7.38E+08	1.98E-07
3T6	5	3882.39	2489.59	38.51	1.09E+04	5.29E+08	2.75E-07
3T6	6	4131.63	2649.42	40.98	2.46E+04	3.88E+08	8.45E-07
3T6	7	4380.88	2809.25	43.45	8.47E+04	2.89E+08	3.90E-06
3T6	8	4630.13	2969.08	45.93	1.31E+05	2.19E+08	7.97E-06
3T6	9	4879.37	3128.91	48.40	4.34E+05	1.69E+08	3.43E-05
3T6	10	5128.62	3288.74	50.87	5.79E+05	1.32E+08	5.87E-05
3T6	11	5377.87	3448.57	53.34	1.01E+05	1.04E+08	1.30E-05
3S2	1	1319.28	845.99	13.09	1.92E+05	1.17E+11	2.19E-08
3S2	2	1741.42	1116.69	17.27	3.67E+05	2.92E+10	1.68E-07
3S2	3	2163.55	1387.39	21.46	2.41E+05	9.85E+09	3.26E-07
3S2	4	2585.69	1658.08	25.65	2.74E+05	4.04E+09	9.04E-07
3S2	5	3007.83	1928.78	29.83	1.01E+05	1.90E+09	7.12E-07
3S2	6	3429.96	2199.48	34.02	3.48E+04	9.83E+08	4.72E-07
3S2	7	3852.10	2470.17	38.21	6.33E+03	5.50E+08	1.53E-07
3S2	8	4274.24	2740.87	42.40	1.58E+03	3.27E+08	6.45E-08
2I3	1	1660.46	1064.77	16.47	9.79E+03	3.70E+10	3.53E-09
2I3	2	2027.51	1300.15	20.11	1.96E+04	1.36E+10	1.92E-08
2I3	3	2394.57	1535.52	23.75	2.32E+04	5.93E+09	5.23E-08
2I3	4	2761.62	1770.90	27.39	2.45E+04	2.91E+09	1.12E-07
2I3	5	3128.68	2006.28	31.03	5.26E+04	1.56E+09	4.50E-07
2I3	6	3495.74	2241.65	34.67	3.22E+05	8.94E+08	4.80E-06
2I3	7	3862.79	2477.03	38.32	1.55E+05	5.43E+08	3.82E-06
2I3	8	4229.85	2712.40	41.96	2.45E+03	3.45E+08	9.46E-08
3C2	1	1443.09	925.39	14.31	1.08E+05	7.46E+10	1.93E-08
3C2	2	1813.23	1162.74	17.99	1.07E+05	2.38E+10	5.96E-08
3C2	3	2183.99	1400.49	21.66	4.92E+04	9.40E+09	6.98E-08
3C2	4	2554.74	1638.24	25.34	7.26E+04	4.29E+09	2.26E-07
3C2	5	2925.50	1875.99	29.02	7.73E+04	2.18E+09	4.73E-07
3C2	6	3296.26	2113.73	32.70	4.10E+04	1.20E+09	4.55E-07
3C2	7	3667.01	2351.48	36.37	7.03E+03	7.04E+08	1.33E-07
3C2	8	4037.77	2589.23	40.05	5.86E+03	4.35E+08	1.79E-07
2C3	1	1608.83	1031.66	15.96	4.44E+04	4.33E+10	1.37E-08
2C3	2	1832.15	1174.87	18.17	1.54E+04	2.26E+10	9.07E-09
2C3	3	2055.48	1318.08	20.39	1.03E+04	1.27E+10	1.07E-08
2C3	4	2278.80	1461.29	22.60	1.71E+04	7.60E+09	3.00E-08
2C3	5	2502.13	1604.50	24.82	2.05E+04	4.76E+09	5.75E-08
2C3	6	2725.45	1747.70	27.03	3.25E+04	3.10E+09	1.39E-07
2C3	7	2948.78	1890.91	29.25	3.93E+04	2.09E+09	2.50E-07

Classe de veículo	Categoria de peso	M <sub>max</sub> (kN.m)	M <sub>viga ext c/ imp</sub> (kN.m)	Δσ (MPa)	n	N	Dano por ano
2C3	8	3172.10	2034.12	31.46	8.38E+04	1.45E+09	7.68E-07
2C3	9	3395.43	2177.33	33.68	1.83E+05	1.03E+09	2.36E-06
2C3	10	3618.75	2320.54	35.89	1.03E+04	7.52E+08	1.82E-07
2C3	11	3842.08	2463.74	38.11	1.71E+03	5.58E+08	4.09E-08
3C3	1	1845.36	1183.34	18.30	3.42E+03	2.18E+10	2.09E-09
3C3	2	2168.93	1390.83	21.51	3.42E+03	9.73E+09	4.69E-09
3C3	3	2492.50	1598.32	24.72	2.22E+04	4.85E+09	6.11E-08
3C3	4	2816.07	1805.81	27.93	4.10E+04	2.64E+09	2.08E-07
3C3	5	3139.64	2013.30	31.14	1.18E+05	1.53E+09	1.03E-06
3C3	6	3463.21	2220.79	34.35	1.56E+05	9.37E+08	2.21E-06
3C3	7	3786.78	2428.28	37.56	6.33E+04	6.00E+08	1.41E-06
3C3	8	4110.35	2635.77	40.77	8.55E+03	3.98E+08	2.86E-07
3C3	9	4433.92	2843.26	43.98	1.71E+03	2.72E+08	8.37E-08
3I1	1	3220.97	2065.46	31.95	1.62E+04	1.35E+09	1.60E-07
3I1	2	3441.26	2206.72	34.13	2.43E+04	9.67E+08	3.35E-07
3I1	3	3661.55	2347.98	36.32	6.88E+04	7.09E+08	1.29E-06
3I1	4	3881.84	2489.24	38.50	1.13E+05	5.30E+08	2.85E-06
3I1	5	4102.13	2630.50	40.69	1.09E+05	4.02E+08	3.62E-06
3I1	6	4322.42	2771.77	42.87	1.21E+04	3.09E+08	5.23E-07
3I1	7	4542.71	2913.03	45.06	0.00E+00	2.41E+08	0.00E+00
3I1	8	4763.00	3054.29	47.24	4.05E+03	1.90E+08	2.83E-07
3S1	1	1331.88	854.07	13.21	1.37E+04	1.11E+11	1.64E-09
3S1	2	1527.78	979.69	15.15	5.47E+04	5.61E+10	1.30E-08
3S1	3	1723.68	1105.31	17.10	1.20E+05	3.07E+10	5.20E-08
3S1	4	1919.58	1230.94	19.04	6.67E+04	1.79E+10	4.96E-08
3S1	5	2115.48	1356.56	20.98	1.37E+04	1.10E+10	1.65E-08
3S1	6	2311.38	1482.18	22.93	6.84E+03	7.08E+09	1.29E-08
3S1	7	2507.28	1607.80	24.87	3.42E+03	4.71E+09	9.67E-09
3M6	1	4845.65	3107.29	48.06	1.19E+04	1.75E+08	9.10E-07
3M6	2	5044.57	3234.84	50.04	2.38E+04	1.43E+08	2.22E-06
3M6	3	5243.48	3362.40	52.01	4.17E+04	1.18E+08	4.72E-06
3M6	4	5442.40	3489.96	53.98	1.61E+05	9.78E+07	2.20E-05
3M6	5	5641.32	3617.51	55.96	2.98E+04	8.17E+07	4.86E-06
3M6	6	5840.24	3745.07	57.93	5.96E+03	6.87E+07	1.16E-06
3D4	1	1738.74	1114.97	17.25	1.82E+03	2.94E+10	8.25E-10
3D4	2	2242.86	1438.24	22.25	1.82E+03	8.23E+09	2.95E-09
3D4	3	2746.99	1761.52	27.25	9.09E+02	2.98E+09	4.06E-09
3D4	4	3251.11	2084.79	32.25	3.07E+03	1.29E+09	3.18E-08
3D4	5	3755.24	2408.06	37.25	3.92E+03	6.25E+08	8.36E-08
3D4	6	4259.36	2731.33	42.25	2.03E+05	3.33E+08	8.14E-06
3D4	7	4763.49	3054.60	47.25	4.44E+04	1.90E+08	3.11E-06
3D4	8	5267.62	3377.88	52.25	2.73E+03	1.15E+08	3.16E-07

Classe de veículo	Categoria de peso	M <sub>max</sub> (kN.m)	M <sub>viga ext c/ imp</sub> (kN.m)	Δσ (MPa)	n	N	Dano por ano
2I1	1	2293.67	1470.82	22.75	2.97E+03	7.35E+09	5.39E-09
2I1	2	2618.03	1678.82	25.97	1.04E+04	3.80E+09	3.65E-08
2I1	3	2942.40	1886.82	29.19	8.92E+03	2.12E+09	5.61E-08
2I1	4	3266.76	2094.82	32.40	2.82E+04	1.25E+09	3.00E-07
2I1	5	3591.12	2302.82	35.62	1.37E+05	7.82E+08	2.33E-06
2I1	6	3915.48	2510.82	38.84	5.35E+04	5.07E+08	1.41E-06
2I1	7	4239.85	2718.82	42.06	0.00E+00	3.41E+08	0.00E+00
2I1	8	4564.21	2926.81	45.27	1.49E+03	2.36E+08	8.41E-08
4C	1	1225.75	786.02	12.16	3.42E+03	1.69E+11	2.70E-10
4C	2	1447.08	927.94	14.35	4.62E+04	7.36E+10	8.36E-09
4C	3	1668.40	1069.87	16.55	6.67E+04	3.61E+10	2.46E-08
4C	4	1889.73	1211.80	18.74	4.44E+04	1.94E+10	3.06E-08
4C	5	2111.05	1353.72	20.94	1.88E+04	1.11E+10	2.25E-08
4C	6	2332.38	1495.65	23.14	1.20E+04	6.76E+09	2.36E-08
4C	7	2553.71	1637.57	25.33	2.91E+04	4.30E+09	9.01E-08
4C	8	2775.03	1779.50	27.53	1.54E+04	2.84E+09	7.23E-08
4C	9	2996.36	1921.42	29.72	3.42E+03	1.93E+09	2.36E-08
3I2	1	1482.27	950.51	14.70	8.44E+04	6.52E+10	1.72E-08
3I2	2	1840.99	1180.54	18.26	1.92E+04	2.21E+10	1.16E-08
3I2	3	2199.70	1410.56	21.82	1.53E+04	9.07E+09	2.26E-08
3I2	4	2558.41	1640.59	25.38	7.67E+03	4.26E+09	2.40E-08
3I2	5	2917.12	1870.61	28.94	3.07E+04	2.21E+09	1.85E-07
3I2	6	3275.83	2100.64	32.49	5.76E+04	1.24E+09	6.20E-07
SOMA					1.64E+08		1.20E-03