



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CAMPUS UFRJ-MACAÉ
Professor Aloísio Teixeira



AVALIAÇÃO DE MODELOS DE CARGA MÓVEL PARA PROJETO DE PONTES
RODOVIÁRIAS DE PEQUENOS VÃOS

Luisa Guida Andrade

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé, como
requisito parcial para aquisição do título de
engenheiro civil.

Orientador: Prof.Msc. Anselmo Leal Carneiro

Macaé – RJ
Julho de 2017

**AVALIAÇÃO DE MODELOS DE CARGA MÓVEL PARA PROJETO DE
PONTES RODOVIÁRIAS DE PEQUENOS VÃOS**

Luisa Guida Andrade

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO AO CURSO
DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO – CAMPUS MACAÉ, COMO REQUISITO PARCIAL PARA
AQUISIÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

Prof. Anselmo Leal Carneiro, M.Sc.
Orientador-UFRJ-Macaé

Prof. Marcos Antônio Campos Rodrigues, M.Sc
Membro interno - UFRJ-Macaé

Prof. Bruno Barzellay Ferreira da Costa, M.Sc
Membro interno - UFRJ-Macaé

MACAÉ, RJ – BRASIL

JULHO DE 2017

Andrade, Luisa

Guida

Avaliação de
modelos de carga
móvel para projeto de
pontes rodoviárias de
pequenos vãos/ Luisa
Guida Andrade -
Macaé: UFRJ, 2017.

Orientador:

Anselmo Leal Carneiro

Trabalho de
Conclusão de Curso
(graduação) – UFRJ-
Macaé/ Engenharia

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço à Deus e à Nossa Senhora por terem me ajudado a chegar à conclusão dessa graduação, especialmente desse trabalho, e terem estado presentes em cada dia da minha vida.

Agradeço à minha mãe Catarina Maria Grazia Guida e à minha madrinha e segunda mãe, Anna Maria Guida Jaccoud que em todo o momento estiveram presentes, me apoiando e dedicando tanto amor e cuidado a mim.

Agradeço também, aos meus irmãos Daniel Guida Andrade e Felipe Guida Andrade por terem sido meus parceiros todos esses anos.

Agradeço a todos os meus familiares que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho. Em especial, gostaria de agradecer em ao meu pai, Willis Topini Andrade, sua esposa Regina Assis, à minha tia Leila Topini, que sempre estiveram presente e às minhas primas Janaína e Juliana Guida Jaccoud.

Agradeço também ao meu Orientador Anselmo Leal Carneiro que tornou todo esse trabalho possível. Obrigado por todos os momentos de troca de conhecimento e ensinamentos.

Agradeço aos professores que sempre me incentivaram e estiveram comigo durante essa graduação.

Agradeço às minhas amigas da escola, aos meus amigos da graduação e do intercambio. A felicidade só é real quando compartilhada, e foi com vocês que compartilhei tanto as minhas felicidades quanto as minhas tristezas. Eu não teria chegado até aqui sem vocês.

Por fim, agradeço a cada pessoa que contribuiu direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho e espero que um dia consiga retribuir contribuindo também para a realização pessoal ou profissional de muitas outras pessoas.

RESUMO

O transporte rodoviário é de suma importância para economia do país sendo o principal meio de transporte de cargas e passageiros. Devido ao crescente volume do tráfego nas rodovias mostra-se necessária uma reavaliação das cargas móveis que são usadas para projetos de pontes e viadutos. Com o intuito de modernizar a carga móvel de norma para modelos mais realistas, Rossigali propõe 2 novos modelos de carga móvel para pontes de pequenos vãos baseado em um estudo realizado para pontes de duas vigas. O objetivo desse trabalho é comparar os modelos propostos pelo referido autor com a carga móvel da norma brasileira.

Foram consideradas pontes biapoiadas variando-se os vãos entre 10m e 40m com três seções transversais diferentes: pontes de seção celular, pontes de duas e cinco vigas. Para pontes de duas e cinco vigas, realiza-se a análise da seção transversal por meio de linhas de influência. Foram calculados os momentos fletores no meio do vão e as forças cortantes no apoio para a carga móvel de norma e para aqueles os modelos propostos em Rossigali. Para pontes de duas vigas as solicitações calculadas por linha de influência foram comparadas com os valores apresentados em Rossigali obtidos da análise em programa comercial de elementos finitos.

Os resultados mostram que, para as pontes de duas vigas, as solicitações devidas ao tráfego real podem ser maiores que aquelas devidas ao TB450 da norma para vãos pequenos. Para as demais seções transversais deve-se fazer um estudo sobre qual dos modelos propostos melhor representam o tráfego real.

Palavras-Chave: Pontes de Concreto; Pontes em Viga; Trem Tipo; Pontes biapoiadas.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1 – Congestionamento Via Anchieta (2015)</i> | 2 |
| <i>Figura 2 – Veículos Pesados representativos do Tráfego Brasileiro</i> | 4 |
| <i>Figura 3 – Ponte de São João, Portugal</i> | 9 |
| <i>Figura 4 – Ponte da Amizade</i> | 9 |
| <i>Figura 5 – Pontes da Normandia</i> | 10 |
| <i>Figura 6 – Ponte Rio-Niterói</i> | 10 |
| <i>Figura 7 – Seções transversais das pontes em viga de Concreto</i> | 11 |
| <i>Figura 8 - Viaduto da Dom Orlando Chaves em viga com seção T</i> | 12 |
| <i>Figura 9 – Ponte em viga com Seção celular</i> | 13 |
| <i>Figura 10 - Veículos de projeto DIN 1072 - 1985</i> | 14 |
| <i>Figura 11 - Esquema de cargas longitudinais DIN 1072 - 1985</i> | 15 |
| <i>Figura 12 - Compressor e caminhão utilizado no trem-tipo segundo NB6/43</i> | 16 |
| <i>Figura 13 - Veículos-tipo da NB 6/60</i> | 17 |
| <i>Figura 14 - Disposição dos Carregamentos NB 6/60 e NBR 7188/84</i> | 19 |
| <i>Figura 15 - Disposição das cargas estáticas</i> | 21 |
| <i>Figura 16 – Base de dados reduzida com distâncias entre eixos adotadas e proporção do peso total suportada por cada grupo de eixos</i> | 23 |
| <i>Figura 17 - Classificação das obras de arte especiais nas rodovias federais brasileiras: (a) segundo o número de vãos; (b) segundo o veículo de projeto adotado para as cargas móveis</i> | 26 |
| <i>Figura 18 - Classificação das obras de arte especiais nas rodovias federais brasileiras: (a) segundo a largura total; (b) segundo o comprimento do maior vão da ponte</i> | 26 |
| <i>Figura 19 - Esquemas estruturais, esforços considerados e seções de referência na longarina, de acordo com as suas linhas de influência</i> | 27 |
| <i>Figura 20 - Valores-alvo das solicitações em pontes biapoiadas de tabuleiro largo, LB; (a) Momento (b) Força Cortante</i> | 28 |
| <i>Figura 21 - Vista superior dos modelos de cargas propostos por Rossigali (2013) a) Modelo 1 b) Modelo 2</i> | 29 |
| <i>Figura 22 - Carregamento dos tabuleiros com os modelos de cargas propostos por Rossigali (2013) a) Modelo n°1 b) Modelo n°2</i> | 30 |
| <i>Figura 24 - Comparação das solicitações geradas pelos modelos de cargas propostos com os valores-alvo originais nas pontes biapoiadas (EB/LB) (a) Força Cortante; (b) Momento;</i> | 30 |
| <i>Figura 25 – Tabuleiro de modelo atual do DNER</i> | 32 |
| <i>Figura 26 – Linha de influência de reação de apoio para ponte de duas vigas</i> | 35 |
| <i>Figura 27 – Distribuição na longitudinal de um trem tipo genérico a) Momento b) Força Cortante</i> | 35 |
| <i>Figura 28 – Momento Máximo Trem tipo Rossigali</i> | 36 |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 29 – Momento Máximo Trem tipo TB450</i> | 37 |
| <i>Figura 30 – Seção de duas vigas com tabuleiro atual do DNER</i> | 37 |
| <i>Figura 31 – Linha de influência de reação de apoio para ponte de duas vigas</i> | 38 |
| <i>Figura 32 – Corte da carga móvel NBR 7188 – 2013 (no eixo e fora do eixo do veículo)</i> | 38 |
| <i>Figura 33 – Corte transversal das cargas móveis em uma ponte de duas vigas</i> | 39 |
| <i>Figura 34 – Posicionamento mais crítico do trem tipo TB450 em uma ponte</i> | 39 |
| <i>Figura 35 – Aplicação de cargas do Trem tipo TB450 sem impacto no eixo do veículo na transversal (Cálculo de Q e q1)</i> | 39 |
| <i>Figura 36 – Aplicação de cargas do Trem tipo TB450 sem impacto fora do eixo do veículo na transversal (Cálculo de q2)</i> | 40 |
| <i>Figura 37 – Aplicação de cargas do TB450 sem impacto na viga longitudinal para obtenção de Momento máximo.</i> | 40 |
| <i>Figura 38 – Aplicação de cargas do TB450 sem impacto na viga longitudinal para obtenção de Força cortante Máxima.</i> | 41 |
| <i>Figura 39 – Carregamento da seção transversal da ponte de 2 vigas pelos trens tipo propostos por Rossigali (2013) a) Modelo 1 b) Modelo 2</i> | 43 |
| <i>Figura 40 – Ponte de 2 vigas: Distribuição de cargas na Longitudinal para Momento a) Modelo 1 b) Modelo 2 (Rossigali 2013)</i> | 43 |
| <i>Figura 41 – Ponte de 2 vigas: Distribuição de cargas na Longitudinal para Força Cortante a) Modelo 1 b) Modelo 2 (Rossigali 2013)</i> | 44 |
| <i>Figura 42 - Seção transversal com 5 vigas e tabuleiro atual do DNER</i> | 45 |
| <i>Figura 43 - Modelo de carga Courbon</i> | 46 |
| <i>Figura 44 – Esquema de Molas para pontes em Grelha</i> | 47 |
| <i>Figura 45 – Linha de Influência de reação para Ponte de 5 Vigas</i> | 48 |
| <i>a) Viga de Extremidade V1 b) Viga Intermediária V2 c) Viga Central V3</i> | 48 |
| <i>Figura 46 – TB450 distribuído para pontes de 5 vigas a) Viga de Extremidade V1 b) Viga Intermediária V2 c) Viga Central V3</i> | 49 |
| <i>Figura 47 – Trem tipo na viga central a) Trem tipo na extremidade b) Trem tipo no meio</i> | 50 |
| <i>Figura 48 – Ponte de 5 vigas (Viga de extremidade): Distribuição de cargas na Longitudinal para Momento a) TB450 b) Modelo 1 c) Modelo 2 (Rossigali 2013)</i> | 51 |
| <i>Figura 49 – Ponte de 5 vigas (viga de extremidade): Distribuição de cargas na Longitudinal para Força Cortante: a) TB450 b) Modelo 1 e c) Modelo 2 Rossigali (2013)</i> | 52 |
| <i>Figura 50 – Ponte de seção Celular</i> | 53 |
| <i>Figura 51 – Distribuição do Trem tipo no tabuleiro de Seção celular a) TB450 b) Modelo 1 e c) Modelo 2 Rossigali (2013)</i> | 54 |
| <i>Figura 52 – Ponte Celular: Distribuição de cargas na Longitudinal para Momento a) TB450 b) Modelo 1 e c) Modelo 2 Rossigali (2013)</i> | 55 |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 53 – Ponte Celular: Distribuição de cargas na Longitudinal para Força Cortante a) TB450 b) Modelo 1 e c) Modelo 2 (Rossigali 2013)</i> | 56 |
| <i>Figura 54 – Gráfico com viés de Momentos para Ponte de duas Vigas</i> | 57 |
| <i>Figura 55 – Gráficos com viés de Força Cortante para Pontes de 2 vigas a) TB450 (com CIA) b) TB450 (s/ CIA)</i> | 58 |
| <i>Figura 56 – Gráfico com viés para momento em vigas de extremidade de ponte de 5 vigas</i> | 59 |
| <i>Figura 57 – Gráficos com viés de Força Cortante para Pontes de 5 vigas a) TB450 (com CIA) b) TB450 (s/ CIA)</i> | 60 |
| <i>Figura 58 – Gráfico com viés para momento de pontes de seção celular</i> | 61 |
| <i>Figura 59 – Gráficos com viés de Força Cortante para Pontes de seção celular a) TB450 (c/CIA) b) TB450 (s/ CIA)</i> | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| <i>Tabela 1 – Compressores, conforme NB6/1946</i> | 16 |
| <i>Tabela 2 – Caminhões, conforme NB6/1943</i> | 17 |
| <i>Tabela 3 - Carregamentos da NB 6/60</i> | 18 |
| <i>Tabela 4 - Características dos veículos-tipo da NB 6/60</i> | 18 |
| <i>Tabela 5 - Carregamentos NBR – 7188 (1984)</i> | 19 |
| <i>Tabela 6 - Características dos veículos-tipo da NBR – 7188 - 1984</i> | 20 |
| <i>Tabela 7 – Simulação de CIV e CNF</i> | 22 |
| <i>Tabela 8 – Frequência relativa de cada classe da base de dados reduzida</i> | 24 |
| <i>Tabela 9- Classificação das pontes nas rodovias federais brasileiras segundo a solução estrutural empregada</i> | 25 |
| <i>Tabela 10 – Esquema longitudinal e transversal de pontes de viga</i> | 33 |
| <i>Tabela 11 – Comparação de Momentos para pontes em duas vigas SAP 2000 e LI (TB450)</i> | 41 |
| <i>Tabela 12 – Comparação de força cortante para pontes em duas vigas SAP 2000 e LI</i> | 42 |
| <i>Tabela 13 – Momentos para pontes em duas vigas (kN.m)</i> | 44 |
| <i>Tabela 14 – Força Cortante (kN) para pontes em duas vigas</i> | 45 |
| <i>Tabela 15 – Cargas calculadas para pontes em 5 vigas</i> | 50 |
| <i>Tabela 16 – Momento para vigas de extremidade de pontes de 5 vigas (kN)</i> | 51 |
| <i>Tabela 17 – Força Cortante (kN) para vigas de extremidade de pontes de 5 vigas</i> | 52 |
| <i>Tabela 18 – Momento para pontes de seção celular (kN)</i> | 55 |
| <i>Tabela 19 – Força Cortante (kN) para pontes de seção celular</i> | 56 |

Listas de Siglas e abreviaturas

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CENTRAN - Centro de Excelência em Engenharia de Transportes

CIA - Coeficiente de Impacto Adicional

CIV - Coeficiente de Impacto Vertical

CNF - Coeficiente de Número de Faixas

CNT - Confederação Nacional de Transportes

CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito

CVCs - Combinações de Veículos de Carga

DER - Departamento de Estradas de Rodagem

DIN – Deutsche Industrie Normen

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

IVPE - Interação veículo-pavimento-estrutura

NB – Norma Brasileira

STPG - Simulador de Tráfego para Pontes em Grelha

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 2 |
| 1.1 Considerações iniciais | 2 |
| 1.2 Objetivo | 5 |
| 1.3 Metodologia | 5 |
| 2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PONTES E VIADUTOS | 7 |
| 2.1 CLASSIFICAÇÕES | 7 |
| 2.1.1 Finalidade | 7 |
| 2.1.2 Materiais | 8 |
| 2.1.3 Tipo estrutural | 8 |
| 2.1.3.1 Pontes em pórtico | 9 |
| 2.1.3.2 Pontes em arco | 9 |
| 2.1.3.3 Pontes estaiadas | 10 |
| 2.1.3.4 Pontes em viga | 10 |
| 2.1.4 Seção transversal | 11 |
| 2.1.4.1 Seção T | 11 |
| 2.1.4.2 Seção Celular | 12 |
| 2.2 Ações e segurança em pontes e viadutos | 13 |
| 3. HISTÓRICO DAS CARGAS MÓVEIS PARA PROJETO DE PONTES | 14 |
| 3.1 DIN 1072 | 14 |
| 3.2 NB6 – 1943 | 15 |
| 3.3 NB6 - 1960 | 17 |
| 3.4 NBR 7188 - 1984 | 19 |
| 3.5 NBR 7188 – 2013 | 20 |
| 4. PROPOSTA DE ATUALIZAÇÃO DO CARRGAMENTO MÓVEL PARA PONTES DE PEQUENOS VÃOS (ROSSIGALI, 2013) | 23 |
| 4.1 Estudo apresentado em Rossigali (2006) | 23 |
| 4.2 Estudo apresentado em Rossigalli (2013) | 24 |
| 5. CÁLCULOS DAS SOLICITAÇÕES EM PONTES E VIADUTOS | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 5.1 Premissas | 32 |
| 5.1.1 Geometria das pontes analisadas | 32 |
| 5.1.2 Solicitações | 34 |
| 5.1.3 Carregamento | 36 |
| 5.2 Pontes de 2 vigas | 37 |
| 5.2.1 Linha de Influência | 38 |
| 5.2.2 Trem tipo TB450 – NBR 7188 (2013) | 38 |
| 5.2.2.1 Comparação de dados | 41 |
| 5.2.3 Trem tipo Rossigali (2013) | 42 |
| 5.2.4 Resultados | 44 |
| 5.3 Pontes em Grelhas – 5 Vigas | 45 |
| 5.3.1 Linha de Influência - Método de Courbon | 46 |
| 5.3.2 Viga mais crítica | 48 |
| 5.3.3 Resultados | 50 |
| 5.4 PONTE SEÇÃO CELULAR | 52 |
| 5.4.1 Resultados | 54 |
| 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS | 57 |
| 6.1 Pontes de 2 vigas | 57 |
| 6.2 Pontes de Cinco Vigas | 59 |
| 6.3 Ponte Celular | 61 |
| 7. CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTURO | 63 |
| 7.1 Comentários gerais e conclusões | 63 |
| 7.2 Sugestões para trabalhos de TCC | 65 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 66 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O Brasil é o quinto maior país em extensão territorial e está entre as 10 maiores economias do mundo. Em 2009, segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT), 61,1% de toda a carga transportada no Brasil usou o sistema modal rodoviário; 21,0% passaram por ferrovias, 14% pelas hidrovias e terminais portuários fluviais e marítimos e apenas 0,4% por via aérea. Assim Cargas pesadas que teoricamente deveriam ser transportadas em ferrovias são transportadas em rodovias.



Figura 1 – Congestionamento Via Anchieta (2015)

Fonte: Diário do Litoral (2015)

De acordo com o CNT (2016) a malha Rodoviária do Brasil corresponde à 1.720.643,2 km, na qual incluem-se diversas obras de arte especiais, como as pontes e viadutos.

Em 1943 as primeiras normas brasileiras de estruturas foram elaboradas. As obras de arte eram, então projetadas segundo as normas NB1 – “Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado”, NB2 – “Cálculo e Execução de Pontes de Concreto Armado” e NB6 – “Cargas Móveis de Pontes Rodoviárias” a qual continha o conjunto de carga móvel de projeto da época. (Santos, 2003)

O desenvolvimento do tráfego rodoviário tem se caracterizado por veículos cada vez maiores e mais pesados, além do aumento no volume. De 2001 para 2005 o número de veículos nas rodovias teve um aumento de 49,7% (Anuário CNT do transporte 2016). A cada vez que o volume ou a tipologia do tráfego é alterado significativamente, torna-se

necessário verificar se as pontes e os pavimentos das rodovias são capazes de suportar o tráfego atual de veículos comerciais, já que não foram projetados para estas situações.

Desde o final da década de 1990, o tráfego comercial brasileiro sofreu alterações abruptas com o avanço da tecnologia de fabricação de veículos comerciais e a permissão de trânsito dos veículos compostos. Transportes mais modernos e com maior capacidade de carga, resultam em maior produtividade e reduzem os custos operacionais aos motoristas e às empresas transportadoras por isso passaram a ganhar popularidade no mercado (Rossigali 2013).

El Debs et al. (2001) realizou um estudo das consequências do tráfego de Combinações de Veículos de Carga (CVCs), regulamentadas pelo Código de Trânsito, sobre as pontes da rede viária do DER-SP. Esse estudo é baseado em comparações teóricas entre as solicitações provenientes dos projetos normativos para cada ponte, com os máximos esforços gerados pelas CVCs. A figura 2 descreve os modelos de Combinações de Cargas de Veículos selecionados para representar o tráfego Brasileiro.

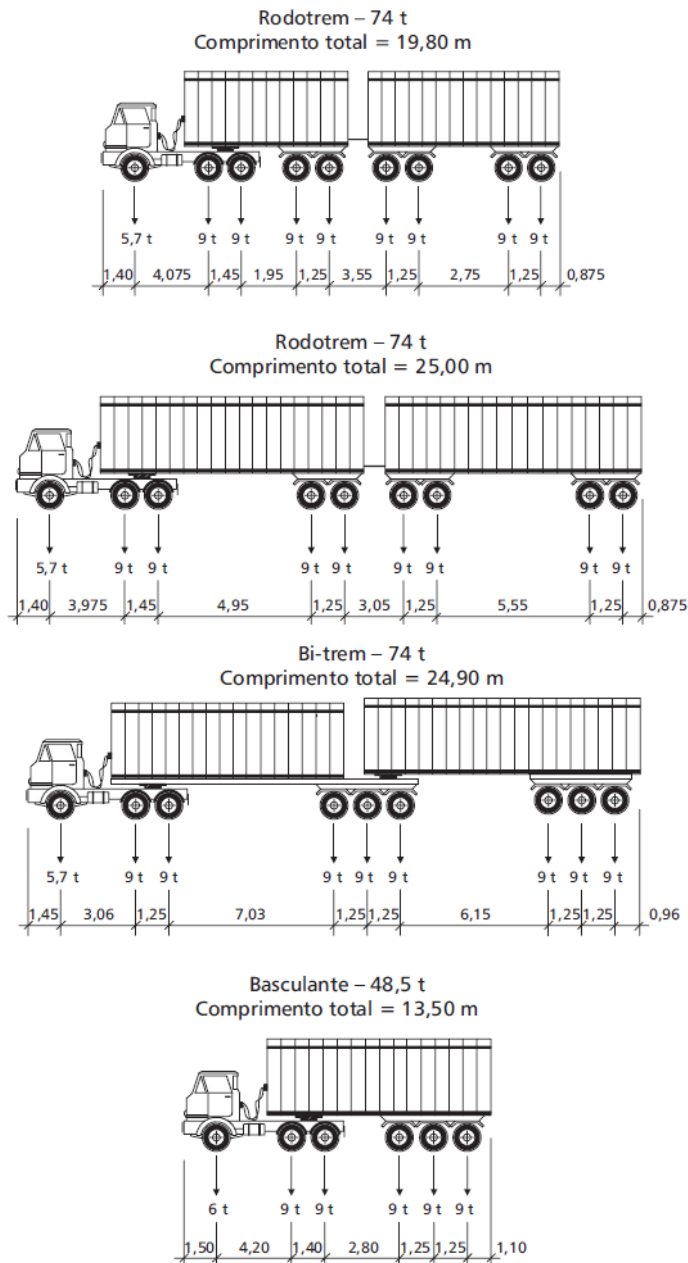


Figura 2 – Veículos Pesados representativos do Tráfego Brasileiro

Fonte: El Debs et al. (2001)

Santos (2003) elaborou um estudo comparativo entre as solicitações geradas pelas cargas móveis em pontes com base em normas e códigos de diversos países e as normas de projeto brasileiras.

Rossigali (2006) iniciou uma linha de pesquisa com o intuito de contribuir com a modernização das normas de cargas de veículos no Brasil. A partir de informações de tráfego de rodovias federais obtidas no DNIT, foi montada uma base de dados para obter os valores característicos de solicitações nas pontes devidos ao tráfego de veículos reais.

Luchi (2006) realizou um trabalho de verificação da carga móvel de pontes e viadutos indicada pela norma Brasileira, NBR7188-1984, em função do tráfego atual. Foram feitas comparações do trem tipo de norma com as cargas de cálculo das normas mais importantes, a norma dos Estados Unidos (AASHTO) e a norma Europeia (Eurocode).

Ferreira (2006) fez um trabalho de verificação da segurança estrutural das pontes sob Jurisdição do DER-SP através de um índice de confiabilidade e obteve limites para o peso de caminhões de modo a não comprometer sua integridade estrutural.

Rossigali (2013) continuou com o trabalho de modernização das cargas móveis de norma de modo que os modelos apresentem efeitos similares aos dos veículos reais. A partir da análise de dados rodoviários de diferentes fontes, elaborou uma base de dados que foi utilizada para simular o tráfego em pontes típicas brasileiras. Por fim, foram propostas duas novas configurações de carga móvel de forma a reproduzir mais adequadamente os efeitos do tráfego em pontes de pequenos vãos.

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é contribuir com estudo de análise de cargas móveis em pontes rodoviárias realizando comparações entre o trem tipo rodoviário brasileiro, TB450, e os modelos propostos por Rossigali (2013); A comparação apresentada em Rossigali (2013) para pontes em duas vigas foi atualizada de acordo com a NBR 7188 - 2013 e foi estendida a comparação para pontes em grelha de cinco vigas e seção celular.

1.3 Metodologia

O trabalho é dividido em três partes: revisão bibliográfica, cálculo das solicitações e análise de resultados.

Na revisão bibliográfica são expostas algumas considerações importantes sobre pontes e as ações que atuam sobre elas. É apresentado também um histórico das cargas móveis na norma brasileira e por último um resumo do trabalho realizado por Rossigali (2006, 2013) para a obtenção dos modelos de carga que serão utilizados nos cálculos.

Nos cálculos são consideradas pontes de 2 vigas, pontes de 5 vigas e pontes de seção celular; com os vãos variando de 10m a 40m para pontes biapoiadas. As cargas longitudinais são obtidas utilizando-se o cálculo simplificado de linha de influência de reação 0-1 para pontes de duas vigas e Método de Courbon para pontes de 5 vigas. São então calculadas as solicitações máximas de momento fletor e força cortante para cada vão.

Na terceira e última parte são apresentados gráficos comparando os valores das solicitações obtidas com TB450 e cada um dos modelos de carga propostos por Rossigali (2013). Em seguida é apresentada uma análise dos resultados.

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PONTES E VIADUTOS

Denomina-se Ponte a obra destinada a permitir a transposição de obstáculos, a continuidade de uma via de comunicação qualquer. Propriamente, denomina-se Ponte quando é utilizada para transpor um obstáculo natural (rio, córrego, vale etc.). Denomina-se Viaduto quando a estrutura é usada para transpor um obstáculo artificial (avenida, rodovia, etc.) (NBR 7188 - 2013).

A estrutura de uma ponte é separada em três partes. A superestrutura onde efetivamente são aplicadas a carga móvel, a mesoestrutura que recebe as cargas verticais da superestrutura, além de estar sujeita a solicitações horizontais, e transfere para a infraestrutura, que transmite os esforços para o terreno, por meio de elementos de fundação como tubulões, estacas, blocos e sapatas.

2.1 CLASSIFICAÇÕES

As pontes podem ser classificadas segundo vários critérios, através dos quais é determinado como será o projeto estrutural. Segundo Pfeil (1985) as pontes se classificam principalmente de acordo com a finalidade para que são construídas, o material empregado e o tipo estrutural para que são dimensionadas. Esses três fatores são de extrema importância para o projeto, e são influenciados diretamente por fatores locais, como por exemplo o comprimento do vão a ser vencido, condições do solo, profundidade do curso d'água.

2.1.1 Finalidade

O modelo de ponte a ser construída é determinado em função de sua finalidade, que depende diretamente do tráfego principal que irá transpor a mesma. Quanto à natureza do tráfego, uma ponte pode ser rodoviária, ferroviária, passarela, aeroviária, aquedutos ou pontes mistas que são destinadas à mais de um tráfego. (Pfeil, 1985)

Este trabalho é focado em pontes rodoviárias. De acordo com a NBR 7188- 1984, uma ponte rodoviária é uma estrutura destinada a permitir continuidade do tráfego dos veículos na via, ela é dimensionada para um modelo de carga chamado trem tipo que gera um carregamento vertical na superestrutura.

2.1.2 Materiais

Em relação ao material empregado na sua construção, as pontes podem ser classificadas na ordem cronológica, segundo Leonhardt (1979), da seguinte forma:

- Pontes de madeira – esse material tem sido empregado desde a antiguidade na construção de pontes, inicialmente com arranjos estruturais bastante simples.

- Pontes de pedra - a pedra, assim como a madeira, era empregada desde a antiguidade na construção de pontes pelos romanos e os chineses. A pedra é caracterizada por possuir grande resistência à compressão, por isso eram muito usadas em ponte em arco.

- Pontes metálicas - As primeiras pontes metálicas surgiram no fim do século XVIII, com estruturas de ferro fundido. Com o início das ferrovias, tornaram-se necessárias grandes obras para suportar elevadas cargas.

- Pontes de concreto armado - as primeiras pontes em concreto apareceram no início do século 20. Eram pontes de concreto simples, com o material substituindo a pedra. Embora já se empregasse o concreto armado na execução do tabuleiro das pontes de concreto simples, foi a partir de 1912 que começaram a ser construídas as pontes de viga e de pórtico em concreto armado.

- Pontes de concreto protendido - As primeiras pontes em concreto protendido foram construídas a partir de 1938, embora somente após a Segunda Guerra Mundial que o concreto protendido começou a ser empregado com grande frequência, por causa da necessidade de se reconstruir rapidamente um grande número de pontes destruídas durante a guerra. (El Debs et al 2009)

A escolha do material influencia diretamente no tipo estrutural do projeto devido às diferentes propriedades físicas e mecânicas de cada um.

2.1.3 Tipo estrutural

O tipo estrutural define o modelo de projeto estrutural a ser adotado. Cada um possui uma peça principal a ser dimensionada, o que leva a diversos modelos de cálculos diferentes. De acordo com El Debs et al. (2009) os tipos estruturais que são comumente empregados nas pontes de concreto são:

2.1.3.1 Pontes em pórtico

As pontes em pórtico têm sua estrutura principal em forma de pórtico, podendo ser simples ou contínuas. A figura 3 mostra a Ponte ferroviária de São João no Porto, Portugal, que é um exemplo de ponte em Pórtico.



Figura 3 – Ponte de São João, Portugal

Fonte: Jornal Etc e Tal (2016)

2.1.3.2 Pontes em arco

As pontes em arco eram muito utilizadas antigamente quando o material principal era a pedra devido à grande resistência à compressão. Elas funcionam basicamente à compressão e toda pressão é transmitida diretamente para o solo através da estrutura principal, o arco. Um exemplo desse tipo de ponte é a Ponte Internacional da Amizade que liga a cidade de Foz do Iguaçu no Brasil e Ciudad del Este no Paraguai, passando sobre o rio Paraná, figura 4.



Figura 4 – Ponte da Amizade

Fonte: Blog Mega Engenharia (2013)

2.1.3.3 Pontes estaiadas

A ponte estaiada é um dos tipos de estruturas com maior sofisticação tecnológica. O tabuleiro fica suspenso e é suportado por cabos retos e inclinados (estais) que são fixados nos mastros. Essas pontes podem alcançar vãos livres relativamente altos, e são recomendadas para vão maiores que 200m (vão máximo alcançado em pontes de vigas). Um exemplo de ponte estaiada é apresentado pela figura 5, Ponte da Normandia, que é uma ponte rodoviária que atravessa o Rio Sena ligando Le Havre a Honfleur, na Normandia, norte da França.



Figura 5 – Pontes da Normandia

Fonte: Blog Mega Engenharia (2013)

2.1.3.4 Pontes em viga

São as mais frequentemente usadas, principalmente no Brasil. A figura 6 é uma foto da Ponte Presidente Costa e Silva, popularmente conhecida como Ponte Rio-Niterói, que está localizada na baía de Guanabara, estado do Rio de Janeiro.



Figura 6 – Ponte Rio-Niterói

Fonte: Blog Mega Engenharia (2012)

A ponte em viga é o tipo estrutural mais antigo, pois uma tora de árvore caída sobre um rio caracteriza uma ponte em viga em sua forma mais simples. A composição deste tipo de ponte é basicamente uma estrutura rígida colocada sobre dois pilares (Quadros, 2013).

Por ser o tipo mais utilizado no Brasil, esse trabalho é focado apenas nas pontes em vigas.

2.1.4 Seção transversal

As pontes de vigas de concreto podem classificar-se de duas formas quanto à seção transversal:

- Seção aberta, também conhecida como seção T ou I
- Seção fechada também conhecida como caixão ou seção celular.

A ponte em seção T pode ter 2 ou mais vigas, assim como uma seção celular pode ter mais de um uma célula, e cada tipo de ponte é dimensionada de uma forma. Estruturas com apenas uma viga são usadas exclusivamente em passarelas. A figura 7 apresenta um esquema simples de cada seção.

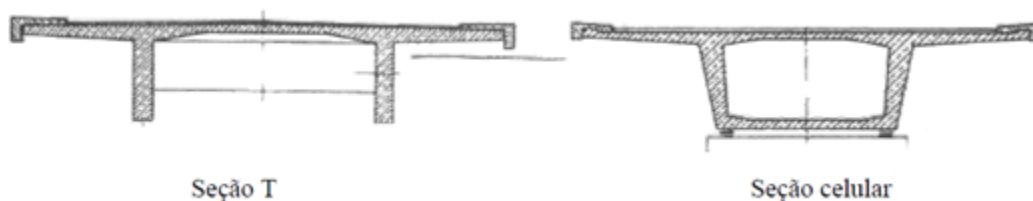


Figura 7 –Seções transversais das pontes em viga de Concreto

Fonte: El Debs et al. (2009)

2.1.4.1 *Seção T*

A seção transversal em “T” é uma das mais utilizadas, e é basicamente constituída pela laje, vigas e transversinas que agem como um conjunto para formar uma grelha. As lajes constituem o banzo comprimido e a parte inferior da alma da viga constitui o banzo tracionado. A seção da viga “T” pode não ser suficiente para a colocação da armadura necessária, por isso é muito comum utilizar-se vigas com bases alargadas. As vigas na estrutura da ponte são chamadas de longarinas e são responsáveis por vencer o vão

(Leonhardt, 1979), a figura 8 apresenta um exemplo de construção de um viaduto em viga T.

As pontes rodoviárias podem ser compostas por duas ou mais longarinas. As pontes com mais de duas longarinas, são usadas para obras com grandes larguras e mais faixas de rolamento e são chamadas de pontes em grelha.



Figura 8 - Viaduto da Dom Orlando Chaves em viga com seção T

Fonte: G1 Mato Grosso (2013)

No dimensionamento simplificado das pontes em vigas T as cargas provenientes do peso da pavimentação das barreiras e dos guarda rodas, são calculadas através de linha de influência assim como a carga variável. A linha de influência é particular para cada longarina.

2.1.4.2 Seção Celular

A viga em seção celular é formada por uma única peça, na qual não há divisão entre vigas e lajes. Por apresentar uma grande rigidez à torção, essas vigas são indicadas para pontes com seção variável, além de serem utilizadas em pontes curvas. A seção pode ser composta por uma ou mais células.

As vigas de seção celular apresentam eficiente distribuição transversal de cargas excêntricas, grande rigidez e, principalmente, grande resistência à torção e momentos fletores positivos e negativos, em consequência da existência de mesa de compressão superior e inferior. Em razão dessas características, é permitido considerar, para efeito de esforços solicitantes globais longitudinais, que a estrutura seja uma viga única,

distribuindo homogeneamente os esforços devido ao trem tipo. (Luchi, 2006). A figura 9 mostra um exemplo real de ponte em viga celular.



Figura 9 – Ponte em viga com Seção celular

Fonte: Apostila Dr. Paulo Bastos

2.2 Ações e segurança em pontes e viadutos

De acordo com a norma NBR 8681-2004 as ações são definidas como as causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas. As ações são classificadas segundo sua variabilidade no tempo em três categorias: permanente, variável e excepcional.

A NBR 7187 – 2003 determina que as ações permanentes em pontes podem ser: cargas provenientes do peso próprio dos elementos estruturais, da pavimentação, dos guarda-rodas, dos guarda-corpos e de dispositivos de sinalização; empuxos de terra e de líquidos; forças de protensão;

A principal carga variável das pontes e viadutos rodoviários são as cargas móveis provenientes do tráfego de veículos. As cargas são consideradas através de trens tipo idealizados, que não necessariamente representam os veículos passantes naquela ponte, mas uma combinação que poderia resultar nos esforços mais críticos. (Rossigali, 2006)

Denomina-se trem tipo o conjunto do carregamento móvel a ser aplicado à estrutura em sua posição mais desfavorável no cálculo de esforços para cada seção de uma estrutura. Os trens tipos compõem-se de um ou mais veículos estipulados e multidão, que representa o tráfego de veículos de pequeno porte que pode acompanhar a passagem do veículo principal e é constituída por carga uniformemente distribuída. (NB6/43 - ABNT, 1943).

3. HISTÓRICO DAS CARGAS MÓVEIS PARA PROJETO DE PONTES

A primeira autoestrada de classe especial do país teve seu projeto iniciado em 1937: a via Anchieta. Segundo Moraes (1994), os estudos necessários e a própria construção dessa via levaram o DER-SP a formar uma comissão especial própria para o projeto, composta por engenheiros. O primeiro trabalho dessa comissão foi a elaboração de Normas e Procedimentos a serem adotados, considerando que até então não havia nenhuma normatização para esse tipo de construção. Esse trabalho foi baseado na antiga Norma Alemã DIN 1072, que era a norma para projetos e construções das Autobahnen.

3.1 DIN 1072

A primeira versão da Norma DIN 1072 foi em 1925 e para pontes rodoviárias considerava o trem tipo uma combinação de tanques e compressores em duas faixas de projeto. Já na versão de 1952 passou-se a considerar apenas um veículo-tipo sobre o tabuleiro. As pontes podiam pertencer a duas categorias (Classe 24 e 45) as quais foram substituídas na versão de 1967 por, Classe 30 e 45 respectivamente. Na atualização de 1985, a DIN 1072 não alterou o peso total dos veículos-tipo; porém, passou a considerá-los simultaneamente, em duas faixas de projeto, de forma semelhante à versão inicial de 1925. As pontes com tráfego mais pesado deviam pertencer à Classe 30/30, que previa 2 veículos SLW-30, ou à Classe 60/30, composta por 1 veículo SLW-60 na faixa principal (que gera a pior solicitação) e 1 veículo SLW-30 na faixa secundária, adjacente à primeira. Estes veículos são mostrados na Figura 10 e 11. (Rossigali, 2013)

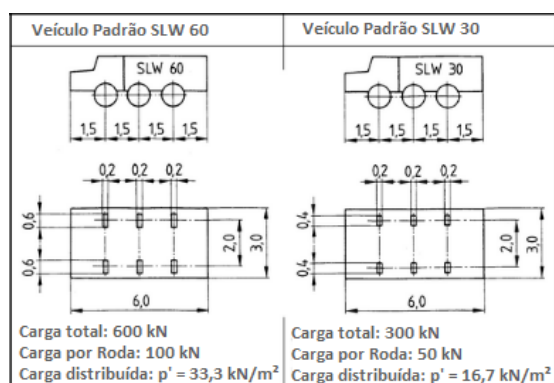


Figura 10 - Veículos de projeto DIN 1072 - 1985

Fonte: Adaptado – Nachrechnung von straßenbrücken

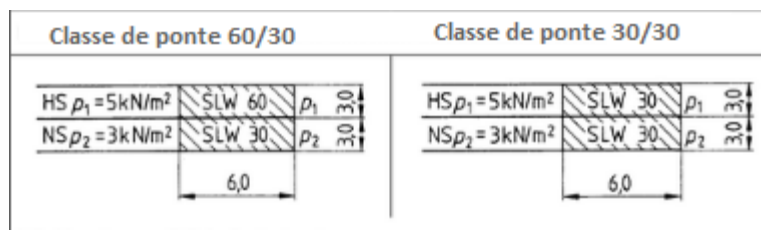


Figura 11 - Esquema de cargas longitudinais DIN 1072 - 1985

Fonte: Adaptado – Nachrechnung von straßenbrücken

3.2 NB6 – 1943

Em 1940 foi fundada a Associação Brasileira de Normas técnicas, que é a entidade responsável pela elaboração das Normas Brasileiras. Nesse mesmo ano as primeiras normas brasileiras de estruturas foram elaboradas inclusive a primeira versão da NB-1 (atualmente NBR6118) “Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado”. Com a necessidade de normatização de projetos específicos, como as pontes, em 1941 foi publicada a primeira versão da NB-2 (Atualmente NBR 7187) “Cálculo e Execução de Pontes de Concreto Armado” e em 1943 a primeira versão da NB-6 (atualmente NBR7188) – “Cargas Móveis de Pontes Rodoviárias”. (Rossigali, 2013)

Na primeira versão da NB-6, as rodovias eram divididas em três classes segundo o grau de importância. Os modelos dos veículos tipo são apresentados na figura 12.

Classe I: Pontes situadas em estradas-tronco federais e estaduais ou nas estradas principais de ligação entre esses troncos; O trem-tipo era composto por uma multidão de $4,5 \text{ kN/m}^2$, de um compressor Tipo B (tabela 1) e de tantos caminhões Tipo B (tabela 2) fossem as faixas de tráfego, menos uma, todos colocados na posição mais desfavorável, sendo que nunca se colocava mais de um veículo por tráfego e respeitando os espaçamentos. A estrutura ainda deveria ser verificada para um compressor Tipo C (tabela 2), posto isolado na posição mais desfavorável para o elemento calculado.

Classe II: Pontes situadas em estradas de ligação secundárias, mas nas quais, atendendo a circunstâncias especiais do local, haja conveniência em se prever a passagem de veículos pesados; O trem tipo é composto de uma multidão com $4,0 \text{ kN/m}^2$, de um compressor Tipo A (tabela 1) e de tantos caminhões tipo A (tabela 2) fossem as faixas de tráfego, menos uma, todos colocados na posição mais desfavorável, e dispostos como na Classe I. Deve-se ainda verificar a resistência da estrutura para um compressor Tipo B (tabela 1), posto isolado na posição mais desfavorável para o elemento calculado.

Classe III: Pontes situadas em estradas de ligação secundárias não incluídas na classe II. O trem tipo é composto de uma multidão com 4,0kN/m², de um compressor Tipo A (tabela 1) e de tantos caminhões tipo A (tabela 2) forem as faixas de tráfego, menos uma, todos colocados na posição mais desfavorável, sendo que nunca se colocava mais de um veículo por tráfego e respeitando os espaçamentos.

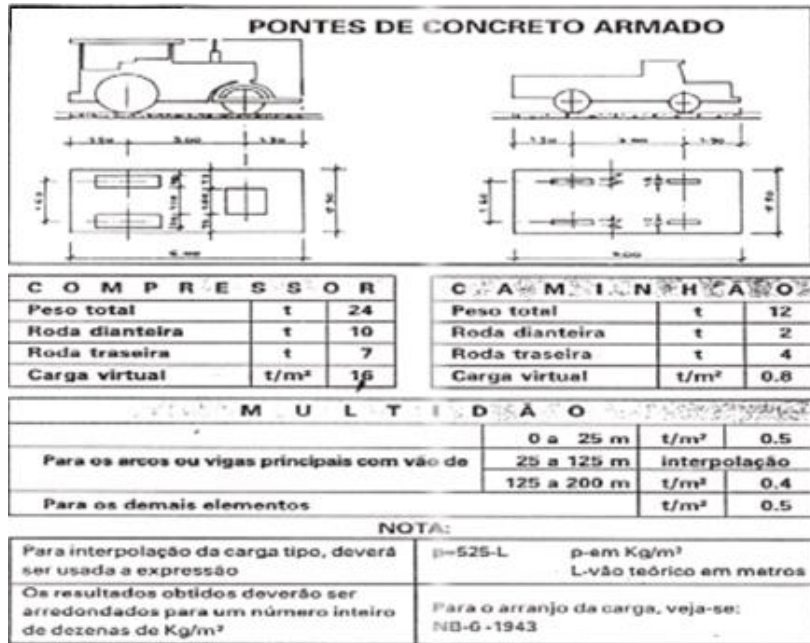


Figura 12 - Compressor e caminhão utilizado no trem-tipo segundo NB6/43

Fonte: Ibracon, 2015

Tabela 1 – Compressores, conforme NB6/1946

| Compressores | Tipo A | Tipo B | Tipo C | Unidades |
|--|--------|--------|--------|----------|
| Peso total | 70 | 160 | 240 | kN |
| Peso da roda dianteira | 50 | 70 | 100 | kN |
| Peso da roda traseira | 10 | 45 | 70 | kN |
| Largura da roda dianteira | 1 | 1 | 1 | m |
| Largura da roda traseira | 10 | 40 | 50 | cm |
| Dist. entre o eixos dianteiro e traseiro | 3 | 3 | 3 | m |
| Dist entre os meios das rodas traseiras | 160 | 160 | 160 | cm |

Fonte: Ibracon (2015)

Tabela 2 – Caminhões, conforme NB6/1943

| Caminhões | Tipo A | Tipo B | Unidades |
|--|--------|--------|----------|
| Peso total | 60 | 90 | kN |
| Peso da roda dianteira | 7,5 | 15 | kN |
| Peso da roda traseira | 22,5 | 30 | kN |
| Largura da roda dianteira | 8 | 12 | cm |
| Largura da roda traseira | 18 | 24 | cm |
| Dist. entre o eixos dianteiro e traseiro | 3 | 3 | m |
| Dist entre os meios das rodas traseiras | 160 | 160 | cm |

Fonte: Ibracon (2015)

3.3 NB6 - 1960

A partir de 1960 a NB6 houveram várias alterações no trem tipo, a norma passou a dividir as pontes em classes de acordo com a carga máxima a ser permitida para o tráfego.

Classe 36 – Substituiu a Classe I

Classe 24 – substituiu a Classe II

Classe 12 – Substituiu a Classe III

Os trens tipos passaram a ser constituído de um veículo e de cargas uniformemente distribuídas conforme detalhado nas Tabelas 3 e 4. Esses veículos também foram baseados em Normas alemães, figura 13.

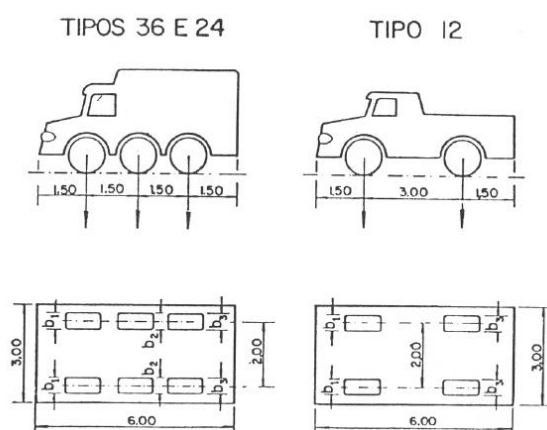


Figura 13 - Veículos-tipo da NB 6/60

Fonte: NB 6 – 1960

Tabela 3 - Carregamentos da NB 6/60

| Classe da Ponte | Veículo | | | Carga Uniformemente Distribuída | | |
|-----------------|---------|-----------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------|---|
| | Tipo | Carga/eixo (kN) | Peso Total (kN) | q (kN/m ²) | q' (kN/m ²) | Distribuição da Carga |
| 36 | 36 | 120 | 360 | 5 | 3 | Carga q à frente e atrás do veículo Carga q' situada no restante da pista e passeios |
| 24 | 24 | 80 | 240 | 4 | 3 | |
| 12 | 12 | 40/80 | 120 | 3 | 3 | |

Fonte: NB 6 - 1960

Tabela 4 - Características dos veículos-tipo da NB 6/60

| Item | Classe 36 | Classe 24 | Classe 12 |
|--|-----------|-----------|-----------|
| Peso da roda dianteira (kN) | 60 | 40 | 20 |
| Peso da roda intermediária (kN) | 60 | 40 | - |
| Peso da roda traseira (kN) | 60 | 40 | 40 |
| Largura de contato da roda dianteira (m) | 0,45 | 0,35 | 0,20 |
| Largura de contato da roda intermediária (m) | 0,45 | 0,35 | - |
| Largura de contato da roda traseira (m) | 0,45 | 0,35 | 0,30 |
| Comprimento de contato de cada roda (m) | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Dist. longitudinal entre o eixos | 1,5 | 1,5 | 3,0 |
| Dist. transversal entre centros de roda de cada eixo (m) | 2,0 | 2,0 | 2,0 |

Fonte: NB 6 - 1960

Os veículos-tipo possuíam 3m de largura e 6m de comprimento. Adotava-se um único veículo, colocado na posição mais desfavorável para a solicitação estudada. A carga de cálculo constituía-se de uma faixa principal com 3m de largura, na qual se encontravam o veículo-tipo e uma carga distribuída principal p à frente e atrás deste. A faixa principal era colocada na direção longitudinal do tabuleiro da ponte (na direção do tráfego), na posição mais desfavorável para o elemento estrutural estudado. Na parte da pista não ocupada pela faixa principal, colocava-se a carga distribuída secundária p' , conforme figura 14.

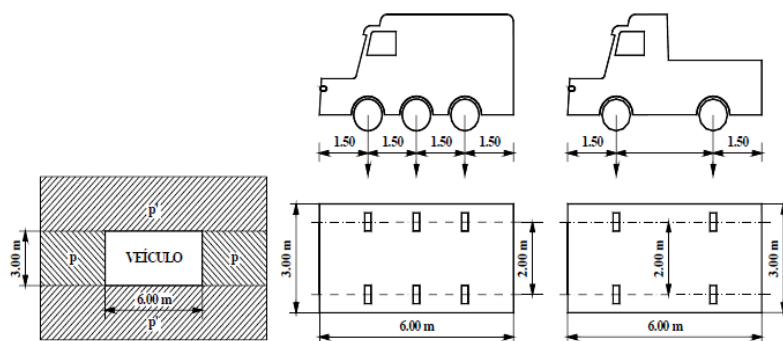


Figura 14 - Disposição dos Carregamentos NB 6/60 e NBR 7188/84

Fonte: NBR 6/60

3.4 NBR 7188 - 1984

A NB 6 foi atualizada em 1982 e aprovada em 1984 passando a vigorar como NBR 7188 “Carga Móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre”. As classes 24 e 36 foram substituídas pelas classes 30 e 45, respectivamente. A carga máxima para as rodovias foi elevada para 450kN e a classe 12 foi mantida.

A disposição dos carregamentos é a mesma estabelecida na NB-6/60, figura 14, e os valores do peso total do veículo, carga por eixo e cargas de multidão estão descritos na tabela 5.

Tabela 5 - Carregamentos NBR – 7188 (1984)

| Classe da Ponte | Veículo | | | Carga Uniformemente Distribuída | | |
|-----------------|---------|-----------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------|--|
| | Tipo | Carga/eixo (kN) | Peso Total (kN) | q (kN/m ²) | q' (kN/m ²) | Distribuição da Carga |
| 45 | 45 | 150 | 450 | 5 | 3 | Carga q em toda a pista Carga q' situada nos passeios |
| 30 | 30 | 100 | 300 | 5 | 3 | |
| 12 | 12 | 40/80 | 120 | 4 | 3 | |

Fonte: NBR 7188 - 1984

As cargas uniformemente distribuídas q e q' também foram alteradas: além da revisão nos seus valores, a carga de multidão p é aplicada em toda pista de rolamento, nesta incluídas as faixas de tráfego, os acostamentos e os afastamentos. Deve ser descontada apenas a área ocupada pelo veículo. Os passeios, independentemente de largura ou altura, são carregados com a carga distribuída de intensidade q' , não majorada

de impacto. Algumas dimensões das rodas dos veículos também sofreram alterações. Como pode ser observado na tabela 6.

Tabela 6 - Características dos veículos-tipo da NBR – 7188 - 1984

| Item | Classe 45 | Classe 30 | Classe 12 |
|--|-----------|-----------|-----------|
| Peso da roda dianteira (kN) | 75 | 50 | 20 |
| Peso da roda intermediária (kN) | 75 | 50 | - |
| Peso da roda traseira (kN) | 75 | 50 | 40 |
| Largura de contato da roda dianteira (m) | 0,50 | 0,40 | 0,20 |
| Largura de contato da roda intermediária (m) | 0,50 | 0,40 | - |
| Largura de contato da roda traseira (m) | 0,50 | 0,40 | 0,30 |
| Comprimento de contato de cada roda (m) | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Dist. longitudinal entre o eixos | 1,5 | 1,5 | 3,0 |
| Dist. transversal entre centros de roda de cada eixo (m) | 2,0 | 2,0 | 2,0 |

Fonte: NBR 7188 – 1984

Deve-se ressaltar que a carga q' do trem-tipo da norma de 1984 não tem o mesmo significado da carga q' do trem-tipo da norma de 1960. Nesta versão da norma (1984), a carga q' é uma carga distribuída relativa à multidão sobre passeios e não sobre a pista de rolamento.

Devido à complexidade dos efeitos dinâmicos causados pelo carregamento móvel a NBR 7187 - 1987 estabeleceu coeficientes de impacto para majorar o efeito estático. Para pontes rodoviárias, esse coeficiente (φ) era determinado através de um processo empírico a partir da equação 1:

$$\varphi = 1,4 - 0,007 \cdot l \geq 1 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde l é o comprimento do vão da ponte.

Através deste coeficiente era possível obter as forças dinâmicas utilizando as forças estáticas, equação 2.

$$F_{\text{dinâmicas}} = \varphi \times F_{\text{estáticas}} \quad (\text{Equação 2})$$

3.5 NBR 7188 – 2013

A NBR 7188 - 2013 passou a adotar 2 classes:

Classe 450: A carga móvel rodoviária TB-450 é definida por um veículo tipo de 450kN, com seis rodas, então $P=75 \text{ kN}$, três eixos de carga afastados entre si em 1,5m, com uma área de ocupação de 18m² circundada por uma carga uniformemente distribuída

constante $p=5k N/m^2$. Para obras em anel rodoviário e obras com distância inferior a 100km em rodovias de acesso a terminais portuários, as cargas móveis características devem ser majoradas 10%.

Classe 240: Para obras em estradas vicinais municipais de uma faixa e obras particulares, a carga rodoviária é no mínimo igual ao trem tipo TB-240, que é definido por um veículo tipo de 240kN, $P= 40 kN$ e a carga distribuída $p= 4,0 kN/m^2$. As características do veículo são semelhantes ao TB-450.

A disposição do trem tipo está apresentada na figura 15.

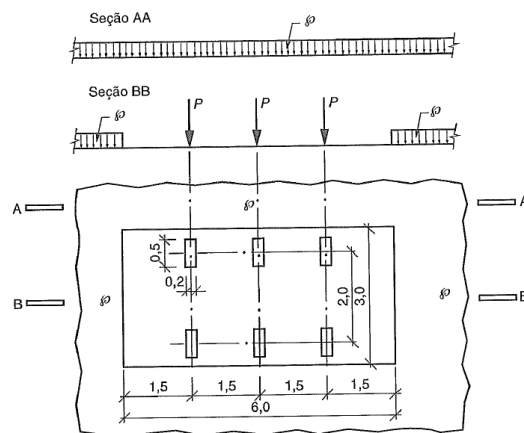


Figura 15 - Disposição das cargas estáticas

Fonte: NBR 7188 - 2013

A norma especifica ainda uma majoração nas cargas acidentais, substituindo o coeficiente estabelecido pela NBR 7187 – 1987, conforme apresentado:

$$Q = P * CIV * CNF * CIA \quad (\text{Equação 3})$$

$$q = p * CIV * CNF * CIA \quad (\text{Equação 4})$$

A carga P é definida como o valor estático de uma roda do veículo p é o valor estático da carga móvel uniformemente distribuída, ambas aplicada no nível do pavimento, com valor característico sem qualquer majoração.

A carga concentrada Q , e a distribuída q , são os valores da carga móvel iguais ao característicos ponderados pelo coeficiente de impacto vertical (CIV), do número de faixas (CNF) e de impacto adicional (CIA).

- Coeficiente de Impacto Vertical (CIV)

Simula o efeito dinâmico da carga em movimento e a suspensão dos veículos automotores. O coeficiente de impacto vertical para estruturas com vão entre 10m e 200 é dado por:

$$CIV = 1 + 1,06\left(\frac{20}{l_{iv}+50}\right) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

CIV = coeficiente de impacto vertical;

Liv = Comprimento do vão em metros

- Coeficiente de Número de Faixas (CNF)

É a probabilidade de a carga móvel ocorrer em função do número de faixas.

$$CNF = 1 - 0,05 \cdot (n - 2) > 0,9 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

CNF = coeficiente de número de faixas

n= número inteiro de faixas de tráfego rodoviário a serem carregados sobre um tabuleiro transversalmente contínuo. Acostamentos e faixas de segurança não são faixas de tráfego da rodovia.

- Coeficiente de Impacto Adicional (CIA)

Os esforços das cargas móveis devem ser majorados na região das juntas estruturais e extremidades da obra. Todas as seções dos elementos estruturais a uma distância horizontal, normal à junta, inferior a 5,0m para cada lado da junta devem ser majorados com o CIA, conforme definido abaixo

CIA = 1,25 para obras em concreto ou mista

CIA = 1,15 para obras em aço

A simulação para os valores de CIV de acordo com o vão e para CNF são apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 – Simulação de CIV e CNF

| | Vão | 5 | 8 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
|------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| φNBR 7187* | | 1,37 | 1,34 | 1,33 | 1,26 | 1,19 | 1,12 | 1,05 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| | CIV | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,3 | 1,27 | 1,24 | 1,21 | 1,19 | 1,16 | 1,14 | 1,12 | 1,11 | 1,10 | 1,09 | 1,08 |
| n | CIV/φ | 0,99 | 1,00 | 1,02 | 1,03 | 1,06 | 1,10 | 1,15 | 1,19 | 1,16 | 1,14 | 1,12 | 1,11 | 1,10 | 1,09 | 1,08 |
| 1 | CIV*CNF | 1,42 | 1,42 | 1,42 | 1,37 | 1,33 | 1,3 | 1,27 | 1,25 | 1,22 | 1,2 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,15 | 1,14 |
| 2 | CIV*CNF | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,30 | 1,27 | 1,24 | 1,21 | 1,19 | 1,16 | 1,14 | 1,12 | 1,11 | 1,10 | 1,09 | 1,08 |
| 3 | CIV*CNF | 1,28 | 1,28 | 1,29 | 1,24 | 1,20 | 1,17 | 1,15 | 1,13 | 1,10 | 1,08 | 1,07 | 1,06 | 1,05 | 1,04 | 1,03 |
| 4 | CIV*CNF | 1,22 | 1,22 | 1,22 | 1,17 | 1,14 | 1,11 | 1,09 | 1,07 | 1,05 | 1,03 | 1,01 | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,98 |

*1987

Fonte: NBR 7188 – 2013

4. PROPOSTA DE ATUALIZAÇÃO DO CARRGAMENTO MÓVEL PARA PONTES DE PEQUENOS VÃOS (ROSSIGALI, 2013)

Rossigali (2006) iniciou uma linha de pesquisa em sua dissertação de mestrado com o intuito de contribuir com a modernização das normas de cargas e veículos no Brasil. Seu objetivo era obter modelos de cargas de veículos que representassem o tráfego real podendo assim efetuar calibração de novos coeficientes de segurança a serem adotados pela Norma. Esse trabalho foi levado adiante por Rossigali (2013) em sua Tese de doutorado.

4.1 Estudo apresentado em Rossigali (2006)

Rossigali (2006) fez um levantamento dos veículos rodoviários pesados de acordo com as classes determinadas pelo DNIT. Nesse levantamento são considerados os modelos dos veículos, número de eixos, tipos de ligação e os pesos brutos.

Com informações fornecidas por postos de Monitoramento do DNIT entre 1999 e 2002 foi estabelecido um banco de dados com a caracterização de cada classe de veículo. Uma base de dados reduzida foi estabelecida com 6 classes representativas do tráfego, figura 16, e suas frequências relativas são apresentadas na tabela 8.

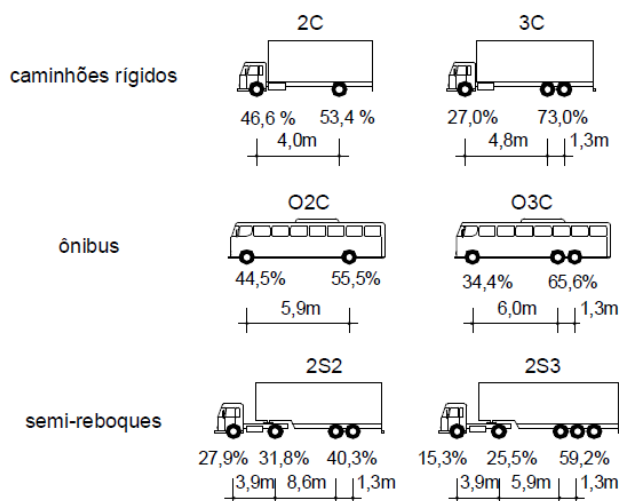


Figura 16 – Base de dados reduzida com distâncias entre eixos adotadas e proporção do peso total suportada por cada grupo de eixos

Fonte: Rossigali 2006

| Classe | Frequencia Relativa |
|--------|---------------------|
| O2C | 7,0% |
| O3C | 5,5% |
| 2C | 22,8% |
| 3C | 40,9% |
| 2S2 | 6,0% |
| 2S3 | 18,0% |

Tabela 8 – Frequência relativa de cada classe da base de dados reduzida

Fonte: Rossigali (2006)

Os efeitos da passagem desses veículos foram calculados em pontes com duas longarinas, típicas da malha rodoviária brasileira, com vãos entre 10m e 40m e comparados aos correspondentes efeitos dos veículos-tipo das normas brasileiras NB6-1960 e NBR 7188 - 1984.

Em seguida foi feita uma extrapolação dos efeitos dos veículos reais para um período de retorno de 100 anos e chegou-se assim aos valores-alvo correspondentes que deveriam ser reproduzidos por modelos de cargas móveis,

4.2 Estudo apresentado em Rossigali (2013)

Rossigali (2013) usou 5 fontes de dados rodoviários para estabelecer uma base de dados, mesclando características de cada uma delas de forma a obter uma representação mais real do tráfego circulante nas rodovias brasileiras. Esta base de dados é composta por informações como a composição do tráfego e as distribuições de probabilidades do peso total e das distâncias entre eixos. Essas fontes de dados rodoviários se referem a informações adquiridas em postos de pesagem, fornecidas por concessionárias de rodovias, nos anos de 2008 e 2011, bem como a coletas extensivas de dados de tráfego realizadas de forma independente por dois órgãos federais: o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), entre 1999 e 2002, e o CENTRAN (Centro de Excelência em Engenharia de Transportes), em 2005.

Como a quantidade de dados obtidas nos postos de monitoramento era grande e relativamente heterogênea, Rossigali (2013) elegeu um posto que representasse o tráfego do país. A principal fonte de informações rodoviárias foi o posto PGF58 (localizado no município de Jundiaí, SP) da Rodovia dos Bandeirantes, a qual é administrada pela

concessionária CCR AutoBan. Foram coletados dados durante 14 dias do mês de janeiro de 2011. A Rodovia dos Bandeirantes é uma rodovia de fluxo intenso e pesado de veículos comerciais, sendo assim representativa do tráfego moderno de caminhões pesados no Brasil.

Tendo como base os dados do posto PGF58 e manipulando as informações de cada uma destas fontes, obteve-se uma base de dados híbrida, H-2013, representativa do tráfego pesado nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. O H-2013 objetiva primordialmente prover informações estatísticas necessárias à simulação do tráfego e é composto de 29 classes de veículos comerciais.

Para a decisão de quais pontes adotar, Rossigali (2013) baseou-se em um estudo realizado por Mendes (2009) onde foi apresentado um levantamento com as obras de arte das rodovias brasileiras. Nos cadastros destas obras de arte, muitas vezes não constam todas as informações técnicas como dados geométricos, sistema estrutural etc. Das que possuem alguma informação disponível, mostram-se na tabela 9 e nas figuras 17 e 18.

| Pontes de Rodovias federais – Soluções estruturais | |
|--|--------|
| Laje e vigas em concreto armado | 82,88% |
| Laje em concreto armado, vigas protendidas | 11,06% |
| Laje em concreto armado sem vigas | 3,45% |
| Laje em concreto protendido sem vigas | 0,12% |
| Arco superior em concreto armado | 0,07% |
| Arco inferior em concreto armado | 0,5% |
| Arco inferior metálico | 0,05% |
| Mista: Viga metálica e laje de concreto | 1,44% |
| Treliça metálica | 0,37% |
| Laje e vigas metálicas | 0,05% |

Tabela 9- Classificação das pontes nas rodovias federais brasileiras segundo a solução estrutural empregada

Fonte: Mendes (2009)

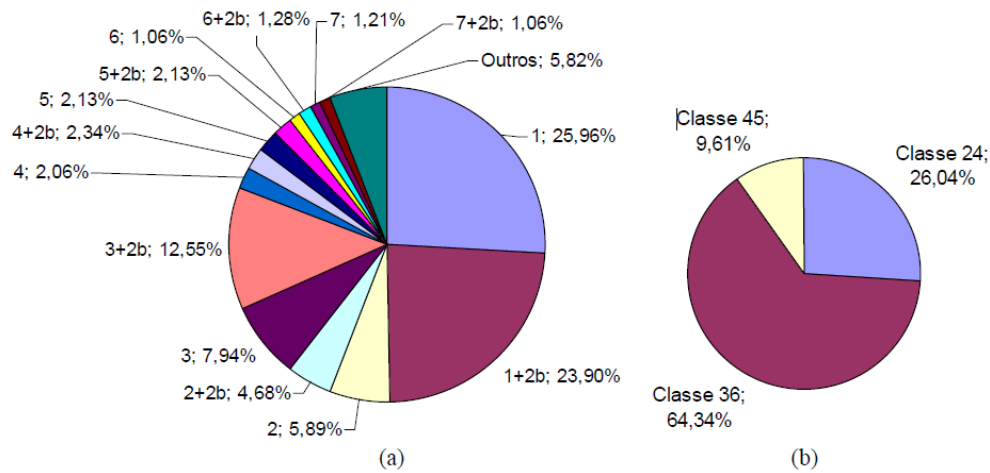


Figura 17 - Classificação das obras de arte especiais nas rodovias federais brasileiras: (a) segundo o número de vãos; (b) segundo o veículo de projeto adotado para as cargas móveis

Fonte: Mendes (2009)

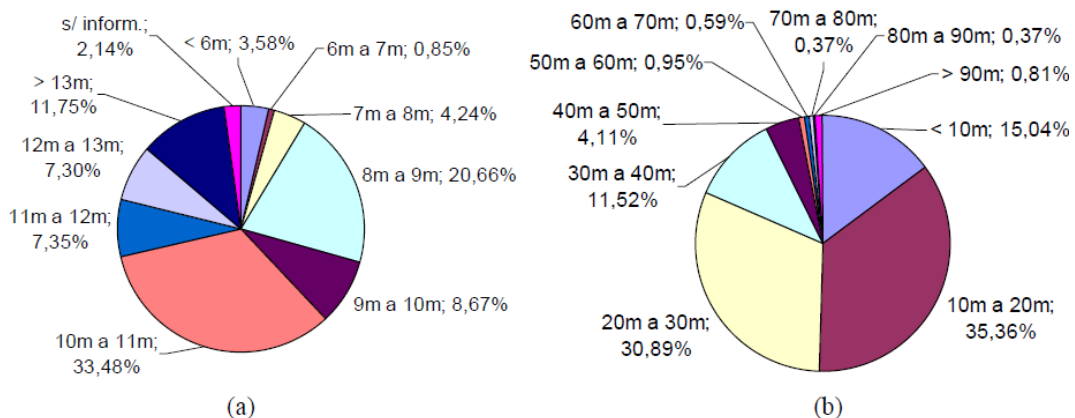


Figura 18 - Classificação das obras de arte especiais nas rodovias federais brasileiras: (a) segundo a largura total; (b) segundo o comprimento do maior vão da ponte

Fonte: Mendes (2009)

Com base nessas informações é possível concluir que a grande maioria das pontes são de vigas e laje em concreto armado, cerca de 83%. 93% das pontes têm vão máximo livre igual ou menor a 40 m. Metade das pontes construídas nas rodovias têm apenas um vão biapoiado (com e sem balanços). Apenas 10% das pontes foram projetadas para o veículo de classe 45 da NBR 7188. E cerca de 64% das foram originalmente projetadas para o veículo Classe 36.

O estudo de Rossigali (2013) restringiu-se às pontes em concreto armado moldado *in situ* constando de laje associada a duas longarinas de seção retangular constante, com

vãos de 10 m, 20 m, 30 m e 40 m, bem como balanços de 2,5 m, 5,0 m, 7,5 m e 10 m. Quanto ao esquema estrutural longitudinal, figura 19, foram considerados os casos de viga biapoiada, viga contínua de dois vãos iguais e viga em balanço, esta última representando os balanços existentes nas vigas biapoiadas ou contínuas.

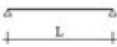
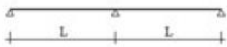
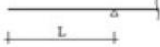






| ESQUEMA ESTRUTURAL | | VIGA BIAPOIADA | VIGA CONTÍNUA DE DOIS VÃOS | VIGA EM BALANÇO |
|-------------------------|----------|---|--|---|
| REPRESENTAÇÃO | |  |  |  |
| ESFORÇO CORTANTE | DIAGRAMA |  |  | |
| | LOCAL | APOIO | APOIO CENTRAL | |
| MOMENTO FLETOR POSITIVO | DIAGRAMA |  |  | |
| | LOCAL | MEIO DO VÃO | APROX. MEIO DO VÃO | |
| MOMENTO FLETOR NEGATIVO | DIAGRAMA | |  |  |
| | LOCAL | | APOIO CENTRAL | ENGASTE |

Figura 19 - Esquemas estruturais, esforços considerados e seções de referência na longarina, de acordo com as suas linhas de influência

Fonte: Rossigali (2013)

Para obter os esforços críticos produzidos pelo tráfego real foi desenvolvida uma ferramenta computacional denominada “Simulador de Tráfego para Pontes em Grelha” (STPG), que funciona em duas etapas:

- Simulação do tráfego: A primeira fase que são geradas informação dos veículos que irão compor o tráfego, tais como classe, velocidade, peso, distância entre eixos etc.
- Análise estrutural no decorrer do tempo: etapa em que os veículos gerados pela simulação trafegam pela estrutura analisada e são registrados os esforços máximos nas seções de interesse.

A simulação foi feita para uma situação de tráfego com fluxo livre, mais crítico para pontes de vãos menores.

A NBR 8681 - 2003 define a vida útil de projeto como o intervalo de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas sem se exigirem, em relação às prescrições de uso e manutenção previstas, medidas extraordinárias de manutenção e reparo. Pressupõe-se para as estruturas uma vida útil de pelo menos 50 anos. Para prever comportamentos futuros, as distribuições dos esforços obtidos na simulação devidos ao tráfego são extrapoladas para um período de retorno de 100 anos.

Os efeitos dinâmicos da carga móvel foram considerados por meio de um único fator de amplificação dinâmica (FAD) para cada esforço de cada estrutura. Para levar em conta o ressalto junto às extremidades da obra, decorrentes de recalques ou devido a alguma descontinuidade na superfície do pavimento considerou-se para todas as pontes pavimento de qualidade regular e a existência de um ressalto de 3 cm na cabeceira da obra.

Para a obtenção dessas amplificações dinâmicas, utilizou-se a ferramenta computacional IVPE, que realiza a análise dinâmica da interação veículo-pavimento-estrutura das pontes,

Com a multiplicação dos valores estáticos extrapolados dos esforços solicitantes pelos correspondentes fatores de amplificação dinâmica, são obtidos os valores-alvo dos esforços. Após realizar uma comparação com o modelo TB-45 da NBR 7188 – 1984, concluiu-se que do ponto de vista das estruturas estudadas por ele há uma discrepância entre os valores-alvo e os valores gerados pelo trem tipo de norma. Essa diferença mostra a necessidade de se obter um modelo de cargas que gere, de fato, solicitações que se aproximem dos valores reais. A figura 20 apresenta comparações de momento e força cortante para uma das estruturas calculadas, biapoiadas de tabuleiro largo.

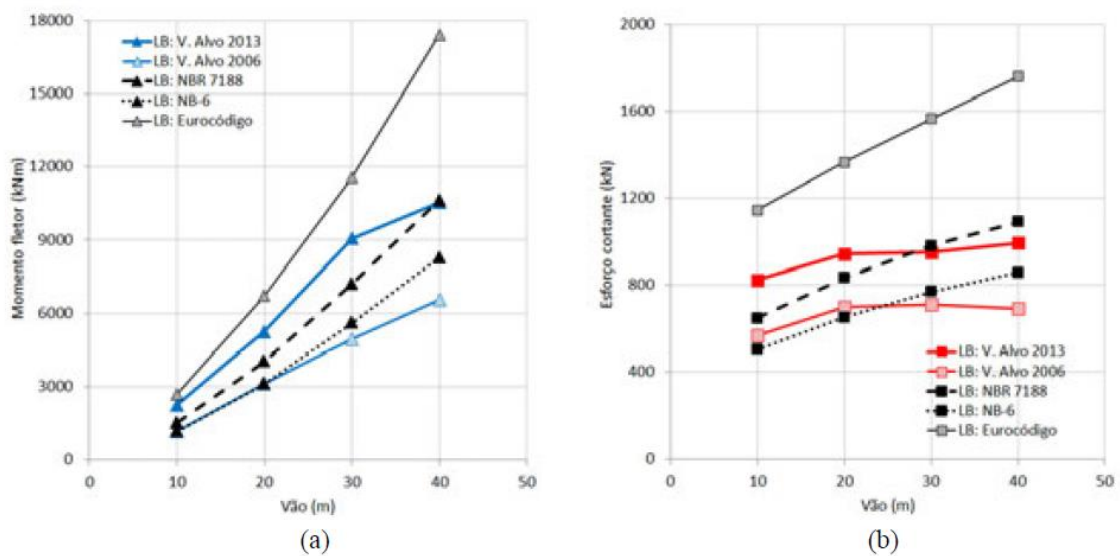


Figura 20 - Valores-alvo das solicitações em pontes biapoiadas de tabuleiro largo, LB; (a) Momento (b) Força Cortante

Fonte: Rossigali (2013)

A etapa seguinte do trabalho de Rossigali (2013) foi obter as configurações físicas e geométricas de modelos de cargas móveis que fossem representativos do tráfego real

para o projeto de pontes rodoviárias no Brasil. Esse modelo, composto por cargas concentradas e distribuídas, deveria ser determinado de tal forma que o carregamento do mesmo resulte em solicitações próximas das críticas obtidas para cada seção na simulação.

Foi desenvolvida em linguagem *Fortran* uma ferramenta para busca de modelos de cargas móveis que representem os esforços gerados pelo tráfego real, denominado “Buscador de Modelos de Cargas Móveis” (BMCMov). Definindo-se as características geométricas como o total de eixos e as distâncias entre eles, a quantidade e a largura das faixas de projeto e fixando limites mínimos e máximos para os valores das cargas concentradas (peso total do veículo) e distribuídas (por unidade de área), o programa busca através de todas as combinações possíveis no domínio de cada um dos componentes, qual o modelo que gera os esforços que mais se assemelham aos valores-alvo previamente fornecidos.

Rossigali propõe adotar dois modelos de cargas como candidatos, que tiveram como base os modelos do Eurocódigo. Elas são mostradas com detalhes na figura 21 e compõem-se de uma única carga distribuída, carregando toda a largura útil dos tabuleiros, com a magnitude de $2,0 \text{ kN/m}^2$; as cargas concentradas do modelo nº 1 constituem-se de apenas um veículo de 850 kN de peso total, enquanto para o modelo nº 2 são considerados 3 veículos com pesos de 600 kN na faixa no 1 e 300 kN nas faixas nos 2 e 3. Em ambos os casos, os veículos de projeto têm 2 eixos distantes entre si por $1,30 \text{ m}$.

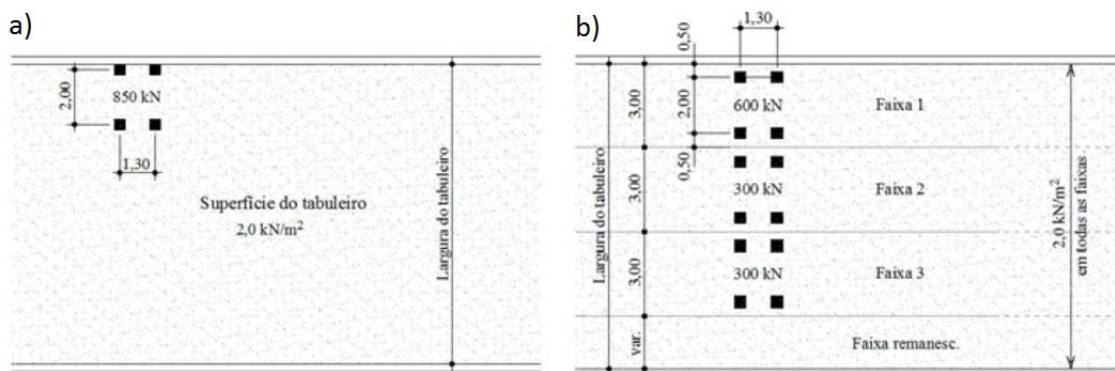


Figura 21 - Vista superior dos modelos de cargas propostos por Rossigali (2013)

a) Modelo 1 b) Modelo 2

Fonte: Rossigali (2013)

A figura 22 ilustra os carregamentos dos tabuleiros com cortes transversais dos dois modelos propostos para pontes em duas vigas. Supõe-se que, tal como todas as normas que apresentam modelos de cargas móveis para projeto de pontes rodoviárias,

estes carregamentos atuem apenas as regiões do tabuleiro que gerarem esforços desfavoráveis ao elemento estrutural em estudo.

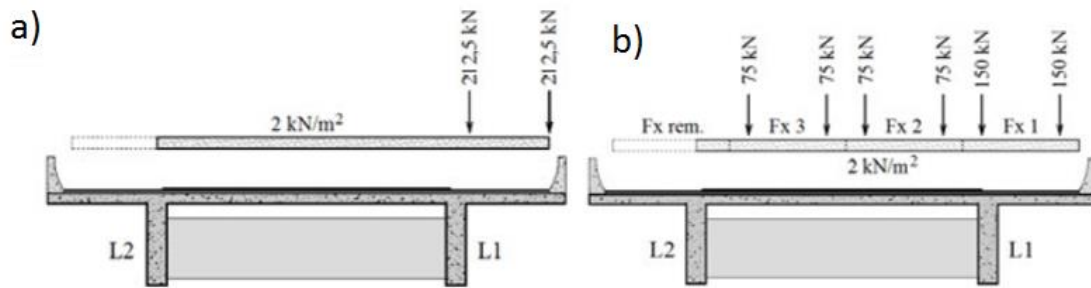


Figura 22 - Carregamento dos tabuleiros com os modelos de cargas propostos por Rossigali (2013) a) Modelo n°1 b) Modelo n°2

Fonte: Rossigali (2013)

Para validar a qualidade dos modelos de cargas propostos, foram feitas comparações dos esforços gerados na estrutura de pontes em duas vigas com a aplicação do modelo e os valores-alvos de esforços obtidos na simulação. E apesar de ambos modelos apresentarem alguns comportamentos diferentes dependendo da estrutura, os erros médios ponderados foram muito semelhantes. A figura 23 apresenta as comparações de força cortante e momento entre os valores obtidos pelo TB-45 e pelos modelos propostos para pontes biapoiadas com tabuleiro estreito (EB) e largo (LB).

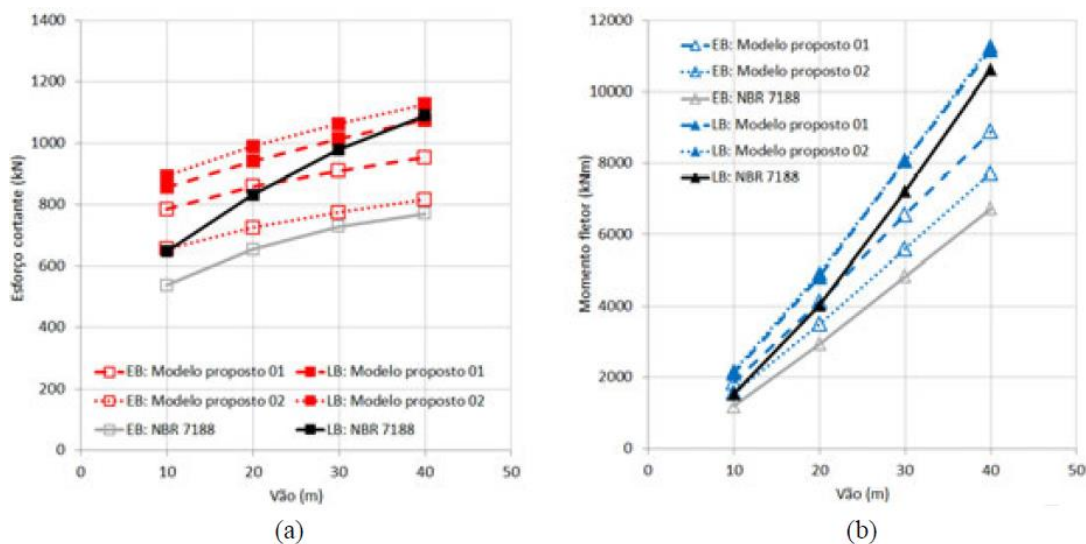


Figura 24 - Comparação das solicitações geradas pelos modelos de cargas propostos com os valores-alvo originais nas pontes biapoiadas (EB/LB) (a) Força Cortante; (b) Momento;

Fonte: Rossigali (2013)

As discrepâncias existentes entre os valores-alvo e os esforços dos modelos de cargas móveis propostos ilustram tanto a dificuldade existente em atender simultaneamente vários requisitos, quanto a importância de se levar em conta, na busca por um modelo de cargas, um grande número de objetivos: um modelo de cargas móveis deve ser concebido de forma a representar os esforços críticos na maior quantidade possível de estruturas representativas.

É importante ressaltar que esse foi um estudo de comparações, e o modelo proposto ainda deve ser estudado e validado para outras estruturas.

5. CÁLCULOS DAS SOLICITAÇÕES EM PONTES E VIADUTOS

5.1 Premissas

5.1.1 Geometria das pontes analisadas

A seção transversal das pontes é estabelecida em função das dimensões dos veículos que irão circular nela e do número de faixas de tráfego, que depende do volume de carros; além das faixas, a seção transversal é composta de guarda-rodas e os acostamentos. As pontes das rodovias federais construídas entre 1946 e 1950 consideravam apenas a largura da pista simples e o acréscimo do guarda-rodas, totalizando uma largura total de 8,30 m (Mendes, 2009).

A partir de 1975 o DNER passou a adotar para as pontes rurais a largura total da estrada, com a pista e os acostamentos, de modo a reduzir a obstrução psicológica. Para impedir a saída dos veículos da pista, alguns guarda-rodas dos tabuleiros estreitos antigos foram substituídos por barreiras laterais (Pfeil, 1985). A largura total das pontes passou a ser de 10,80 m. A partir de 1985, passou-se a considerar a largura trafegável entre 12,00 m e 12,20 m (o modelo atual), com largura total entre 12,80 m e 13,00 m.

O tabuleiro será padrão para todos os cálculos, de acordo com o modelo atual para pista simples do DNER, figura 25.

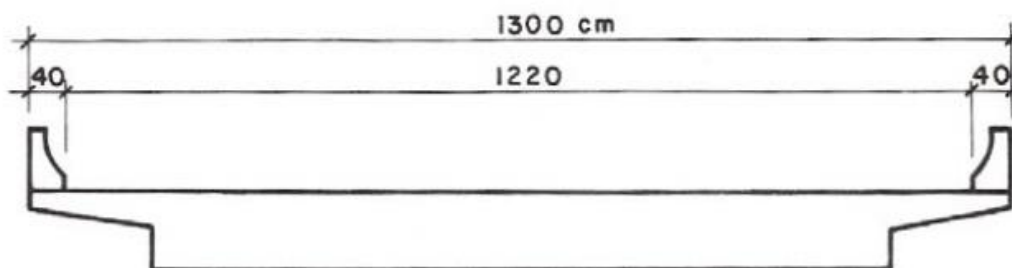


Figura 25 – Tabuleiro de modelo atual do DNER

Fonte: Rossigali (2013)

El Debs et al. (2001) realizou um levantamento de obras de arte especiais que fazem parte do DER-SP, as documentações técnicas referentes às principais características, tais como geometria, dimensões do tabuleiro, permitiram a definição de grupos estruturais representativos. O resultado final da análise foi o cadastramento de

2.276 obras de arte especiais no registro. Vale ressaltar que esse Banco de dados não contém a totalidade de obras de arte atualmente existente na malha viária do DER-SP.

Essa tabela foi usada como base para a decisão das seções e vãos a serem utilizados, tabela 10.

Tabela 10 – Esquema longitudinal e transversal de pontes de viga

| Caso | Esquema transversal | Esquema longitudinal |
|--------------|---------------------|----------------------|
| 2 vigas TL | | |
| 2 vigas TL | | |
| 5 vigas TL | | |
| 5 vigas TL | | |
| 5 vigas TL | | |
| 5 vigas TL | | |
| 2 células TL | | |
| 2 células TL | | |
| 2 células TL | | |

Fonte: Mendes (2009)

Nesse trabalho os modelos escolhidos para a realização dos cálculos foram: 2 vigas, 5 vigas e seção celular. O estudo das pontes de duas vigas foi estendido para vãos até 40m e o de ponte celular para um vão menor (10m), embora não tenha sido apresentado no estudo realizado por El Debs et al. (2001).

Rossigali (2013) também utilizou a mesma tabela como base, mas é importante ressaltar que em seus cálculos só foram consideradas pontes de duas vigas.

5.1.2 Solicitações

Foi considerada a análise de força cortante no apoio e de momento fletor no meio do vão. Utiliza-se a análise simplificada onde a posição das cargas na seção transversal é determinada através das linhas de influência de reação.

As linhas de influência são diagramas que descrevem um efeito elástico (momentos fletores, cortantes e reações de apoio) numa dada seção quando uma carga unitária percorre todos os segmentos de uma estrutura (Martha, 2010). Considerando que as pontes são submetidas a cargas móveis, é interessante conhecer o efeito provocado por essa variação na estrutura, especialmente os valores máximos das solicitações e a posição correspondente das cargas.

Para cada seção, posiciona-se o conjunto de cargas nas posições mais desfavoráveis, obtendo-se os valores máximos dos esforços através do carregamento das linhas de influência. O elemento estrutural deve ser dimensionado para esses valores, porque desta maneira, quaisquer outras posições da carga móvel produzirão solicitações intermediárias e sua estabilidade fica assegurada para qualquer posição da carga móvel (Pfeil, 1985).

Para se obter o efeito produzido por um trem tipo ocupando uma dada posição sobre a linha de influência (conhecida), basta multiplicar cada carga concentrada do trem tipo pela ordenada da linha de influência sob ela e cada carga distribuída pela respectiva área de influência, tomando-se os resultados (Sussekind, 1974).

A figura 26 demonstra como obter os valores de uma carga concentrada Q e de uma carga distribuída q através da linha de influência.

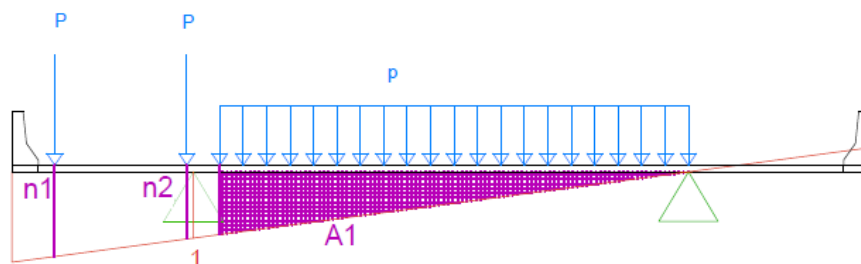


Figura 26 – Linha de influência de reação de apoio para ponte de duas vigas

Fonte: O Autor, 2017

Para a obtenção da carga concentrada Q e da carga distribuída q , seguem as equações 7 e 8.

$$Q = P * (n1 + n2) \quad (\text{Equação 7})$$

$$q = p * A1 \quad (\text{Equação 8})$$

Onde $n1$ e $n2$ são ordenadas da linha de influência e $A1$ a área da linha de influência correspondente à carga distribuída.

As cargas Q e q são colocadas na longitudinal na posição mais desfavorável para cada solicitação. O momento máximo é encontrado no meio do vão e a força cortante máxima nos apoios então através da linha de influencia as cargas são posicionadas de forma à gerarem os esforços mais críticos para essas solicitações.

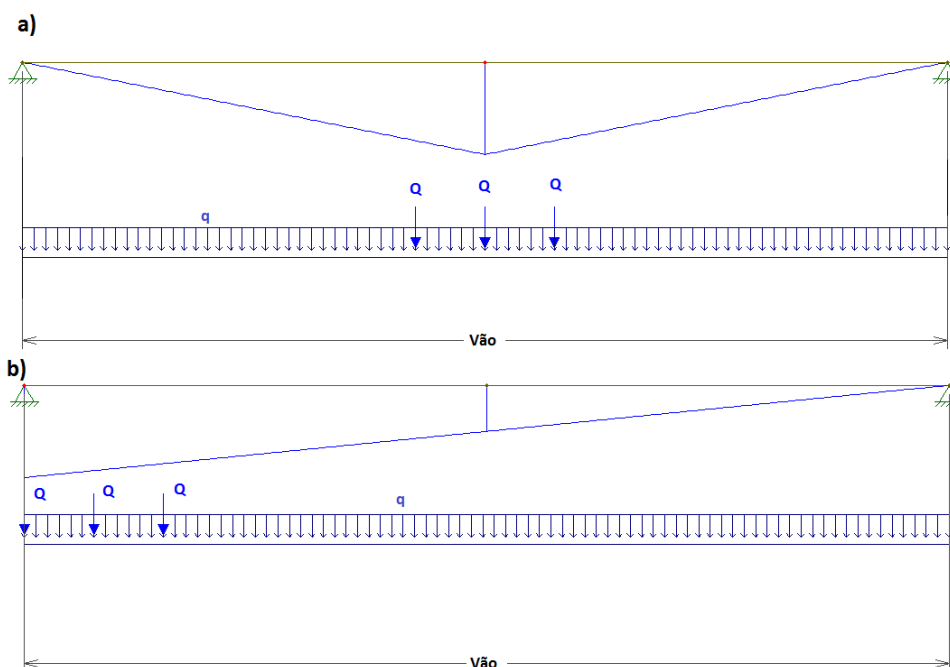


Figura 27 – Distribuição na longitudinal de um trem tipo genérico a) Momento b) Força Cortante

Fonte: O Autor, 2017

É importante ressaltar que a disposição das cargas tanto na transversal quanto na longitudinal depende do trem tipo adotado e da linha de influência. As figuras 26 e 27 apenas demonstram de forma genérica como posicionar.

5.1.3 Carregamento

Neste trabalho as solicitações serão calculadas com base em três modelos: o trem tipo estabelecido pela NBR 7188 – 2013, TB450, e os dois modelos de trem tipo propostos por Rossigali (2013). As cargas dos modelos propostos já incluem um parâmetro para considerar o efeito dinâmico do tráfego, portanto já incluem os impactos. Para o cálculo do TB450 serão consideradas duas faixas de tráfego, então $CNF=1$, o CIA é considerado no cálculo de momento para pontes de 10m de vão e nos cálculos de força cortante para todos os vãos e o CIV é usado em todos os cálculos do TB450.

Para a realização dos cálculos foi elaborado um roteiro de cálculos no programa Mathcad capaz calcular as cargas e solicitações para cada modelo (pontes de duas vigas, 5 vigas e seção celular).

O posicionamento da carga para obter o momento mais crítico na longitudinal para um trem tipo com apenas dois eixos, como em ambos modelos apresentados por Rossigali, é demonstrado na figura 28.

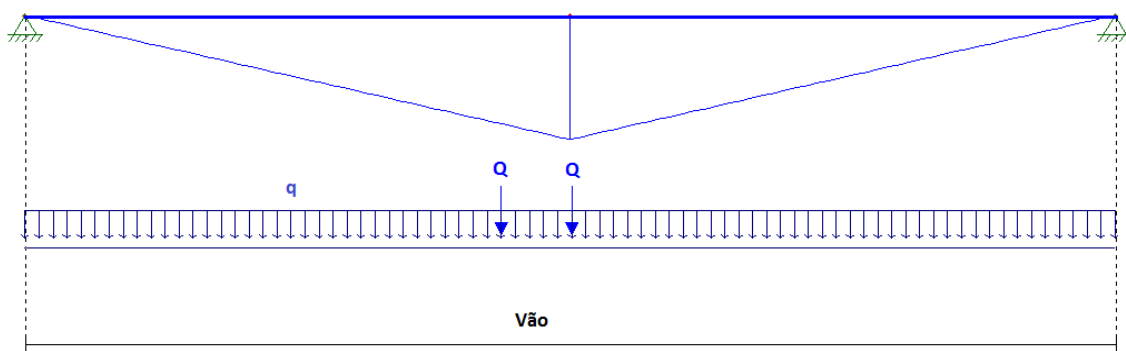


Figura 28 – Momento Máximo Trem tipo Rossigali

Fonte: O Autor, 2017

O posicionamento da carga para obter o momento mais crítico na longitudinal para um trem tipo de 3 eixos e carga distribuída diferente na direção do veículo, como é a carga do TB450, é demonstrado na figura 29.

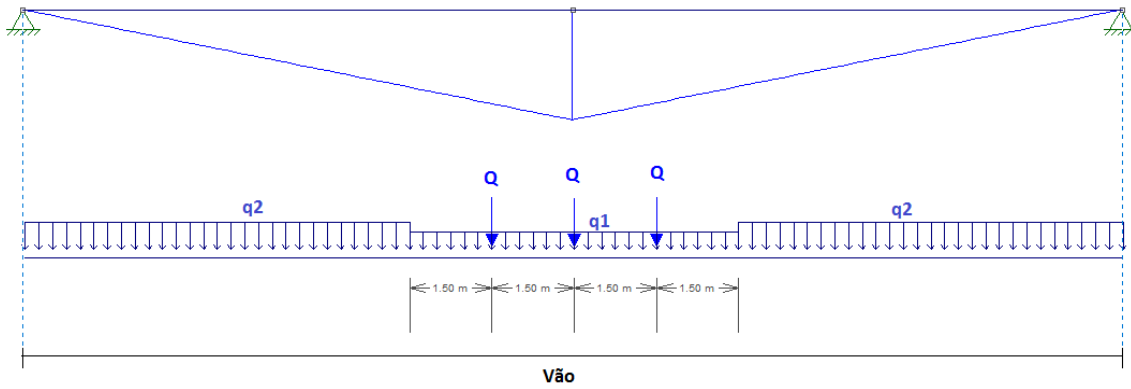


Figura 29 – Momento Máximo Trem tipo TB450

Fonte: O Autor, 2017

5.2 Pontes de 2 vigas

A ponte utilizada nos cálculos tem duas vigas com distância de 7,5m. o tabuleiro superior será o mesmo apresentado no item 5.1.1 como modelo atual do DNER, a figura 30 demonstra a seção transversal adotada.

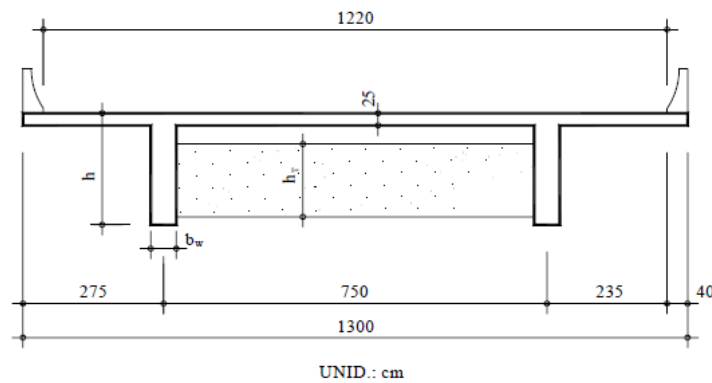


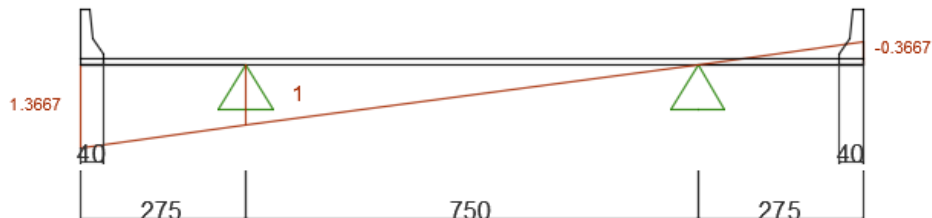
Figura 30 – Seção de duas vigas com tabuleiro atual do DNER

Fonte: Rossigali (2006)

Como a seção é simétrica, e as duas vigas terão as mesmas reações, só será calculado para 1 viga.

5.2.1 Linha de Influência

Para pontes de duas vigas, a linha de influencia de reação de apoio, também conhecida como linha de influência 0-1, pode ser determinada movimentando uma carga unitária ao longo da viga e observando a reação na viga (v1 no caso), figura 31.



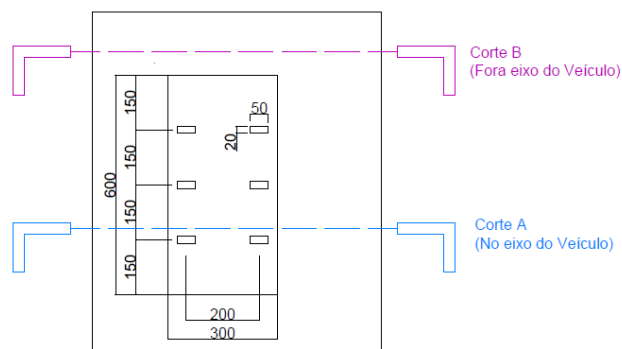
Medidas em cm

Figura 31 – Linha de influência de reação de apoio para ponte de duas vigas

Fonte: O Autor, 2017

5.2.2 Trem tipo TB450 – NBR 7188 (2013)

A NBR 7188 – 2013 considera dois cálculos para cargas distribuídas, uma que corresponde à multidão no eixo do veículo e outra que corresponde à multidão fora do eixo. A figura 32 apresenta a vista superior do trem tipo com as configurações geométricas, e a figura 33 o corte transversal de uma ponte de duas vigas com o carregamento do TB450.



Medidas em cm

Figura 32 – Corte da carga móvel NBR 7188 – 2013 (no eixo e fora do eixo do veículo)

Fonte: O Autor, 2017

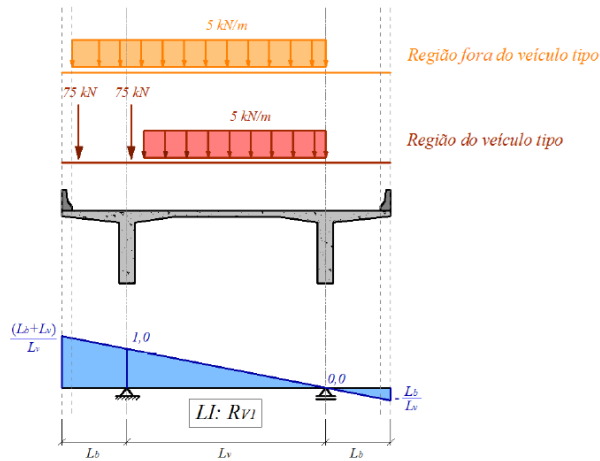


Figura 33 – Corte transversal das cargas móveis em uma ponte de duas vigas

A posição mais desfavorável para o posicionamento do veículo é o mais próximo da extremidade possível, como o uso de guarda rodas é obrigatório pelo DNIT, o posicionamento mais desfavorável seria o veículo encostando a roda no guarda rodas, conforme a figura 34.

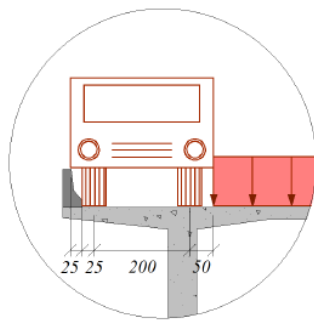
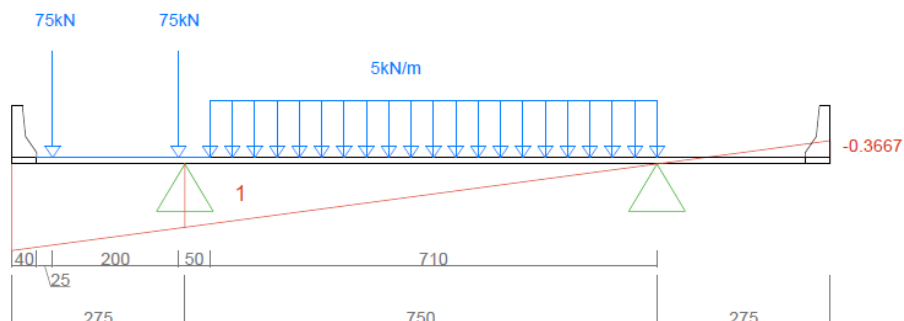


Figura 34 – Posicionamento mais crítico do trem tipo TB450 em uma ponte

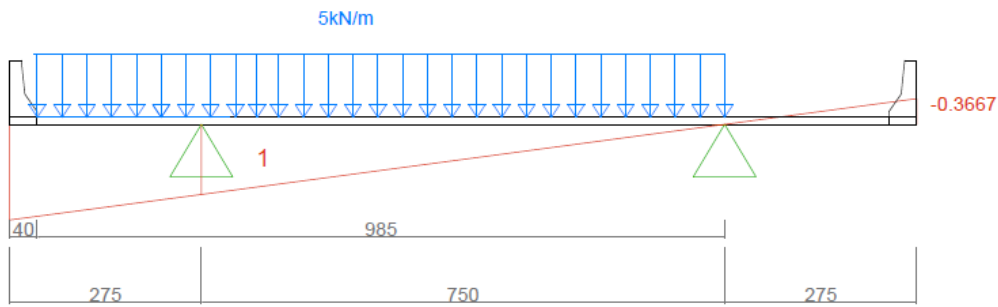
As figuras 35 e 36 apresentam a aplicação do TB450 na seção transversal com a linha de influência de reação de apoio da viga analisada.



Medidas em cm

Figura 35 – Aplicação de cargas do Trem tipo TB450 sem impacto no eixo do veículo na transversal (Cálculo de Q e q1)

Fonte: O Autor, 2017

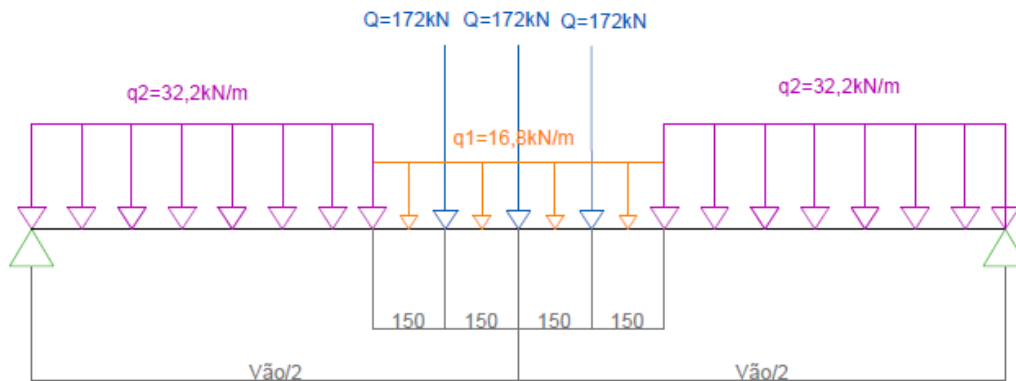


Medidas em cm

Figura 36 – Aplicação de cargas do Trem tipo TB450 sem impacto fora do eixo do veículo na transversal (Cálculo de q_2)

Fonte: O Autor, 2017

Para o cálculo do momento fletor máximo na viga as cargas são aplicadas na posição mais desfavorável da longitudinal, ou seja, a carga concentrada no centro do vão conforme apresenta a figura 37.



Medidas em cm

Figura 37 – Aplicação de cargas do TB450 sem impacto na viga longitudinal para obtenção de Momento máximo.

Fonte: O Autor, 2017

Para o cálculo da força cortante máxima na viga, as cargas são aplicadas no apoio, conforme apresenta a figura 38 que é a posição onde se obtém a força cortante máxima da estrutura.

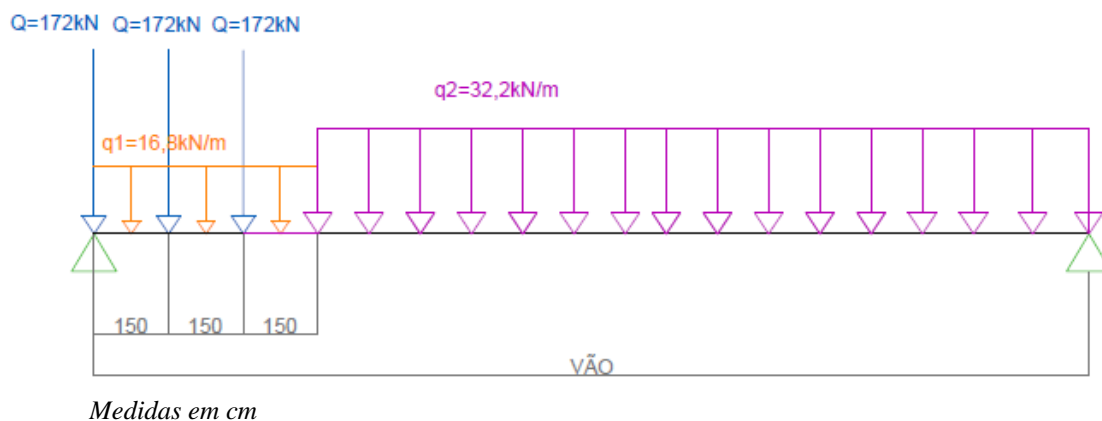


Figura 38 – Aplicação de cargas do TB450 sem impacto na viga longitudinal para obtenção de Força cortante Máxima.

Fonte: O Autor, 2017

Pela NBR 7188 – 2013 os coeficientes já seriam incluídos nesse valor, mas para obter uma só carga para os diferentes vãos, eles serão aplicados nos cálculos de momento e força cortante.

5.2.2.1 Comparação de dados

Existem diferentes formas de calcular as solicitações de um modelo de carga em uma estrutura. O cálculo utilizando a linha de influência unitária apresentado anteriormente pode ser considerado como uma simplificação. Rossigali (2013) realizou a análise dos modelos estruturais, para obtenção das solicitações, pelo programa computacional SAP 2000®, que é um software de análise estrutural e dinâmica por elementos finitos.

A tabela 11 apresenta uma comparação entre os valores de momento sem impacto obtidos pelo SAP 2000 e os valores calculados pelo método manual de LI para o trem tipo TB450 da NBR 7187-2013.

Tabela 11 – Comparação de Momentos para pontes em duas vigas SAP 2000 e LI (TB450)

| Comparação de Momentos(kN.m) para pontes em duas vigas biapoiadas | | | |
|---|-------------------|-----------------------------|----------|
| Vão | SAP 2000 – TB450* | Linha de influência – TB450 | (LI/SAP) |
| 10 | 1140 | 1273 | 1,12 |
| 20 | 3202 | 3543 | 1,11 |
| 30 | 6064 | 6621 | 1,09 |
| 40 | 9493 | 10510 | 1,11 |

* Valores obtidos em Rossigali (2013)

Fonte: O Autor, 2017

A tabela 12 apresenta uma comparação entre os valores de força cortante sem impacto obtidos pelo SAP 2000 e os valores calculados pelo método manual de LI para o trem tipo TB450 da NBR 7187-2013.

Tabela 12 – Comparação de força cortante para pontes em duas vigas SAP 2000 e LI

| Comparação de Força Cortante (kN) para pontes em duas vigas biapoiadas | | | |
|--|-------------------|-----------------------------|----------|
| Vão (m) | SAP 2000 – TB450* | Linha de influência – TB450 | (LI/SAP) |
| 10 | 487,2 | 546,1 | 1,12 |
| 20 | 660,8 | 738,6 | 1,12 |
| 30 | 823 | 910,6 | 1,11 |
| 40 | 973 | 1077 | 1,11 |

* Valores obtidos em Rossigali (2013)

Fonte: O Autor, 2017

Foi possível observar que as solicitações obtidas através de elementos finitos são aproximadamente 11% menores do que os obtidos pelo método manual de linha de influência. Considerando que é uma simplificação os resultados são satisfatórios por serem mais conservadores.

5.2.3 Trem tipo Rossigali (2013)

O trem tipo é posicionado na posição mais desfavorável pela linha de influência de reação da seção transversal, figura 39. As cargas propostas por Rossigali (2013) já incluem um coeficiente para considerar o efeito dinâmico, portanto o impacto considerado não dependem do vão.

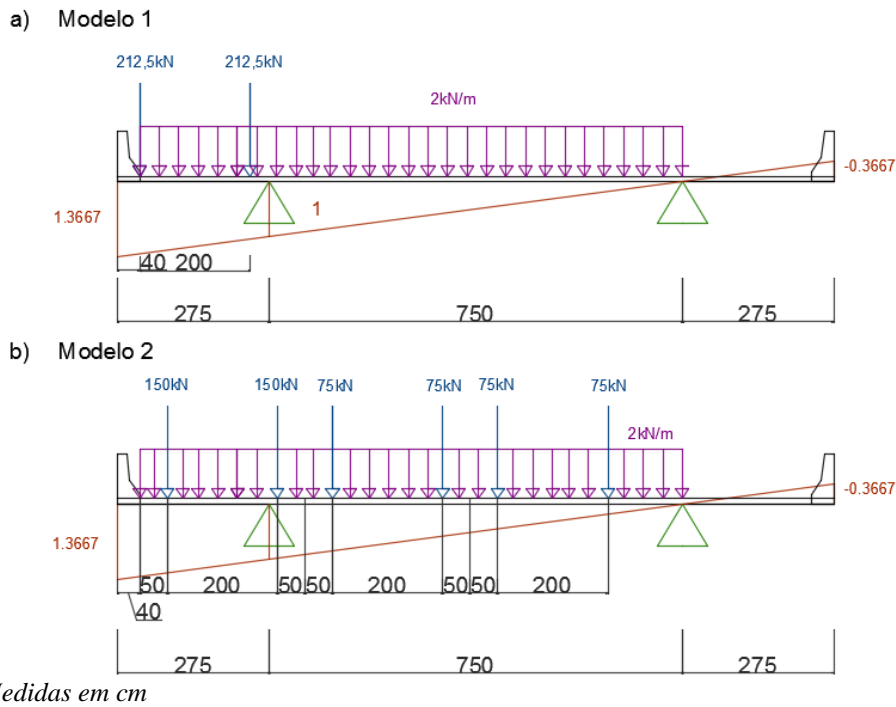


Figura 39 – Carregamento da seção transversal da ponte de 2 vigas pelos trens tipo propostos por Rossigali (2013) a) Modelo 1 b) Modelo 2

Fonte: O Autor, 2017

Os valores obtidos de Q e q são posicionados na viga longitudinal para o cálculo das solicitações máximas na viga. A figura 40 apresenta a distribuição para obtenção do pior momento do modelo 1 e 2 e a figuras 41 para a obtenção da força cortante.

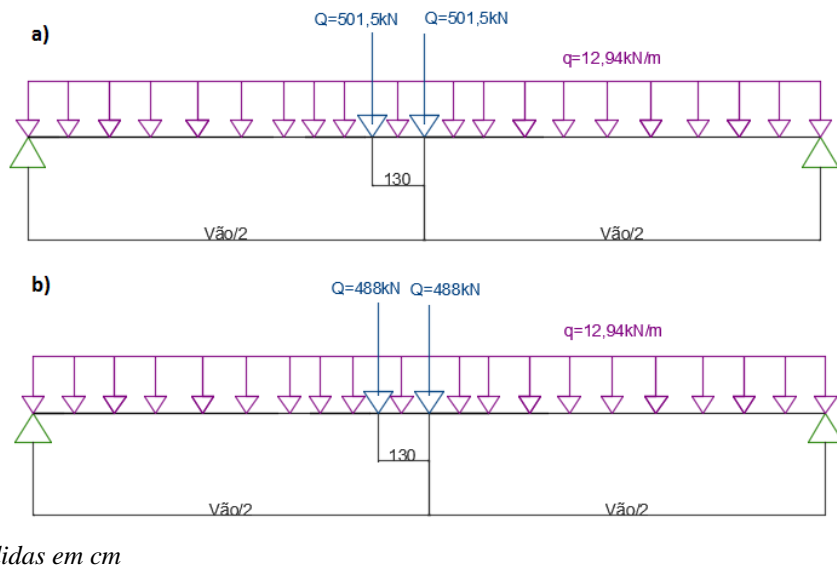
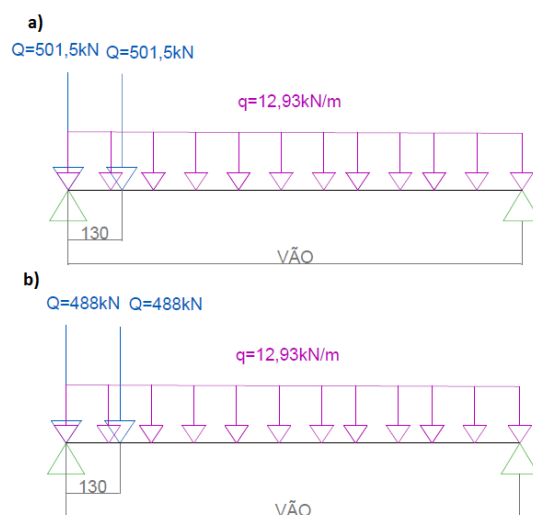


Figura 40 – Ponte de 2 vigas: Distribuição de cargas na Longitudinal para Momento a) Modelo 1 b) Modelo 2 (Rossigali 2013)

Fonte: O Autor, 2017



Medidas em cm

Figura 41 – Ponte de 2 vigas: Distribuição de cargas na Longitudinal para Força Cortante
a) Modelo 1 b) Modelo 2 (Rossigali 2013)

Fonte: O Autor, 2017

5.2.4 Resultados

Os cálculos dos esforços foram realizados pelo Mathcad, e as considerações referidas no 5.1.3 sobre os coeficientes de impacto foram aplicadas no cálculo:

- CNF=1;
- Para vão de 10 metros o momento é calculado tanto com CIA quanto com CIV;
- Para o cálculo de momento dos outros vãos só se considera o CIV.
- Para o cálculo de força cortante todos os vãos consideram CIA.
- Para os modelos de Rossigali, não se aplicam os coeficientes de impacto.

Os valores de momento fletor máximos obtidos utilizando cada modelo para os 4 vãos são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 – Momentos para pontes em duas vigas (kN.m)

| Momento Fletor (kN.m) para Pontes em duas Vigas | | | |
|---|-------|---------------------|----------------------|
| Vão (m) | TB450 | Modelo 1- Rossigali | Modelo 2 - Rossigali |
| 10 | 2154 | 2343 | 2285 |
| 20 | 4616 | 5336 | 5210 |
| 30 | 8376 | 8652 | 8458 |
| 40 | 12980 | 12290 | 12030 |

*O maior valor obtido está em destaque

Fonte: O Autor, 2017

Os valores máximos de força cortante obtidos utilizando cada modelo para os 4 vãos são apresentados na tabela 14. Para comparação de valores em uma das colunas foi calculado a força cortante do TB450 sem CIA.

Tabela 14 – Força Cortante (kN) para pontes em duas vigas

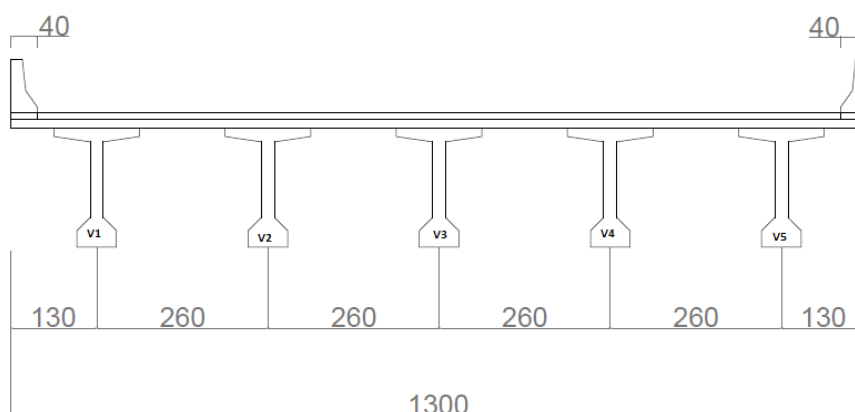
| Força cortante Máxima (kN) | | | | |
|----------------------------|-------|----------------|---------------------|----------------------|
| Vão (m) | TB450 | TB450 (s/ CIA) | Modelo 1- Rossigali | Modelo 2 - Rossigali |
| 10 | 923 | 739 | 1002 | 977 |
| 20 | 1203 | 926 | 1100 | 1074 |
| 30 | 1440 | 1152 | 1175 | 1149 |
| 40 | 1664 | 1331 | 1245 | 1219 |

**O maior valor obtido está em destaque*

Fonte: O Autor, 2017

5.3 Pontes em Grelhas – 5 Vigas

Para a ponte de 5 vigas, o tabuleiro do DNER de 13m foi dividido de tal forma que as longarinas ficassem iguais (mesmo momento de inércia) e igualmente espaçadas. O modelo usado está apresentado na figura 42.



Medidas em cm

Figura 42 - Seção transversal com 5 vigas e tabuleiro atual do DNER

Fonte: O Autor, 2017

Para pontes em 5 vigas é necessário calcular as solicitações para três tipos de vigas devido à simetria do tabuleiro: Viga de extremidade (V1 e V5); Viga intermediária (V2 e V4); Viga Central (V3).

5.3.1 Linha de Influência - Método de Courbon

Para se obter a linha de influência das grelhas de ponte existem diversas soluções. Em 1940 Courbon, desenvolveu o método dos coeficientes de distribuição transversal para grelhas constituídas por transversinas com rigidez infinita. Este método também é atribuído a Engesser, sendo conhecido como Método de EngesserCourbon. (Alvez; Almeida; Judice, 2004)

O Método de Courbon é um método que permite determinar de forma aproximada o modo como uma carga P atuando ao longo de um tabuleiro composto por laje e vigas se distribui transversalmente pelas diversas longarinas. O processo de Courbon parte de algumas premissas simplificadoras.

- A largura da obra é menor que metade do vão da mesma ($\text{vão}/\text{largura} > 2$).
- As espessuras das longarinas e das lajes são pequenas;
- É desprezado o trabalho longitudinal das lajes;
- A altura da transversina deve ser maior que $2/3$ da altura da longarina;
- As transversinas comportam-se como barras rígidas, permanecendo com seus eixos retilíneos após a deformação do conjunto;
- A rigidez das transversinas é muito maior do que das longarinas pois seu vão é muito menor que o das longarinas.
- A torção é desprezível.

As hipóteses simplificadoras permitem analisar o tabuleiro de tal forma que as transversinas se comportam como corpo rígido e as longarinas possuem pequenas deformações com constantes de mola. Assim as longarinas trabalham conforme cálculos de resistência dos materiais e é válida a lei de Hooke. É importante ressaltar que o efeito da torção nas longarinas não é considerado nesse método. A figura 43 apresenta o modelo de carga para o Método.

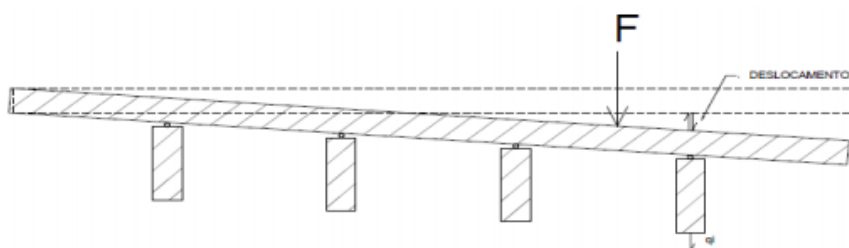


Figura 43 - Modelo de carga Courbon

Fonte: Frota 2014

Observa-se que as molas possuem constantes k_1, k_2, \dots, k_i e a carga é dividida em parcelas para cada viga. Caso a carga esteja aplicada no centro da peça, todas as vigas possuirão a mesma deformação e a rotação será zero (pois as transversinas são rígidas). Este ponto é conhecido como centro elástico da peça. (Frota 2014)

Considerando que a deformação se dá na região elástica, ou seja, sem deformação permanente, esta pode ser calculada pela lei de Hooke, na qual a força é igual a constante da mola multiplicada pela deformação. A figura 44 apresenta o esquema utilizado para o cálculo. São usadas equações de equilíbrio das forças verticais e de momento para o tabuleiro e obteve-se as equações 9 e 10 para as reações:

$$R_{i,j} = I_i \left(\frac{1}{\sum I_i} + \frac{x_j x_i}{\sum (I_i \cdot x_i^2)} \right) \quad (\text{Equação 9})$$

Para seções de mesma Inércia:

$$R_{i,j} = \frac{l}{n} + \frac{x_j x_i}{\sum (x_i^2)} \quad (\text{Equação 10})$$

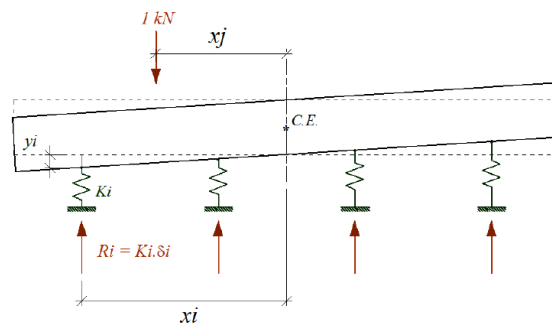


Figura 44 – Esquema de Molas para pontes em Grelha

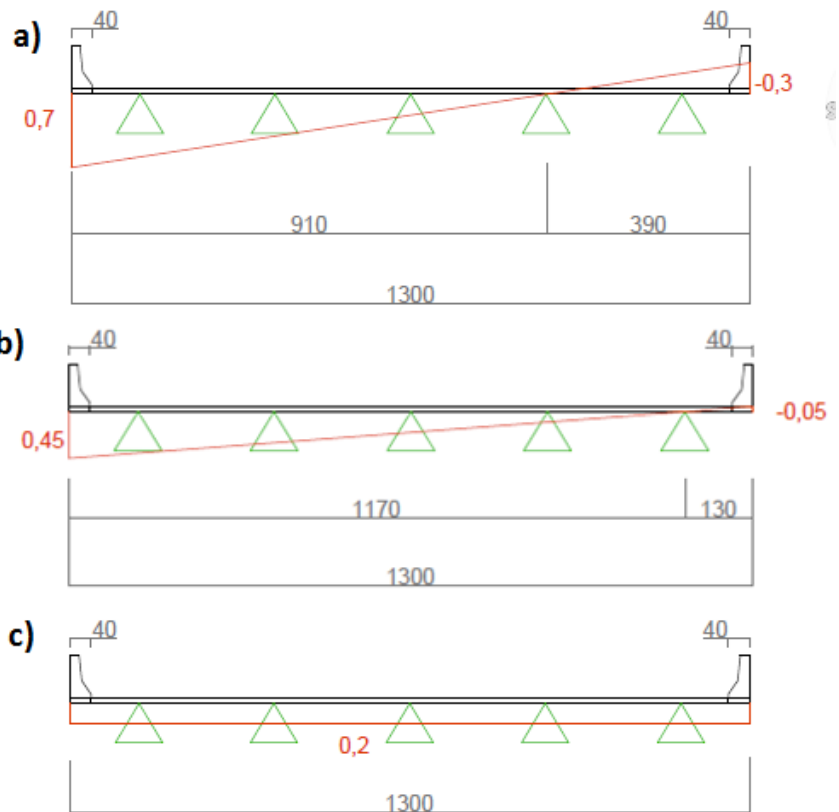
Onde

n = número de longarinas;

x_j = Excentricidade da carga a partir do CG da seção transversal

x_i = Distância da longarina em relação ao CG

Utilizando o Método de Courbon obteve-se a linha de influência para as três vigas v_1, v_2 e v_3 , de acordo com a figura 45.



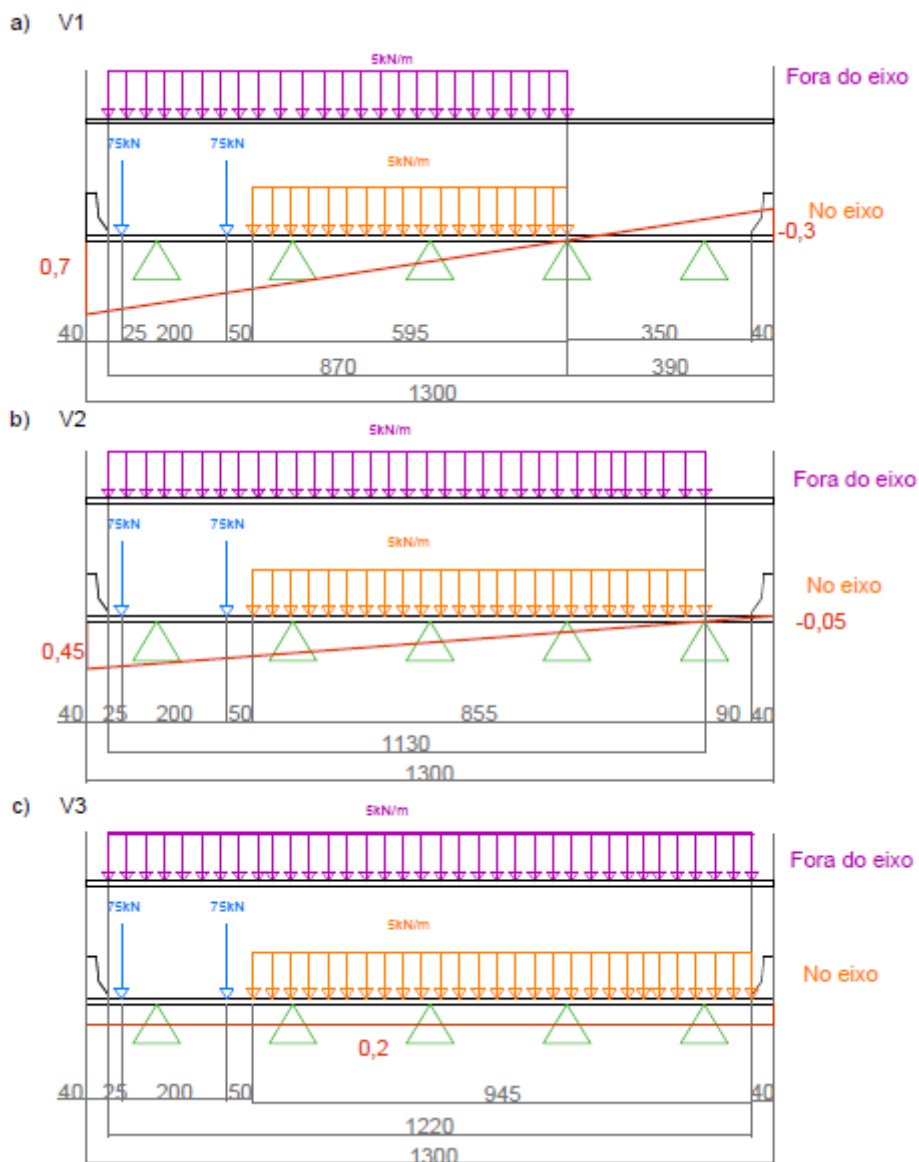
Medidas em cm

Figura 45 – Linha de Influência de reação para Ponte de 5 Vigas
a) Viga de Extremidade V1 b) Viga Intermediária V2 c) Viga Central V3

Fonte: O Autor, 2017

5.3.2 Viga mais crítica

Para simplificar a análise entre os modelos de Rossigali (2013) e o da NBR 7188 – 2013 primeiramente foi determinada a viga mais crítica da ponte de 5 vigas. Pode-se determinar a mais crítica calculando-se a carga Q e q do TB450, e considerando a que apresentar maior valor. A figura 46 apresenta a o carregamento na seção transversal para cada viga.



Medidas em cm

Figura 46 – TB450 distribuído para pontes de 5 vigas a) Viga de Extremidade V1 b) Viga Intermediária V2 c) Viga Central V3

Fonte: O Autor, 2017

O trem tipo é sempre colocado na posição mais desfavorável. Pela linha de influência de reação da viga central, qualquer posição da carga terá mesma influência em todas as vigas, ou seja, não importaria a posição. Porém quando a roda está encostada no guarda-rodas, a carga de multidão é um pouco maior do que se o trem tipo estivesse em outra posição. Como é possível ser verificado na figura 47.a) quando posicionado na extremidade o comprimento da carga distribuída é 9,45m e quando está em outra posição 47.b) o comprimento é 9,20m.

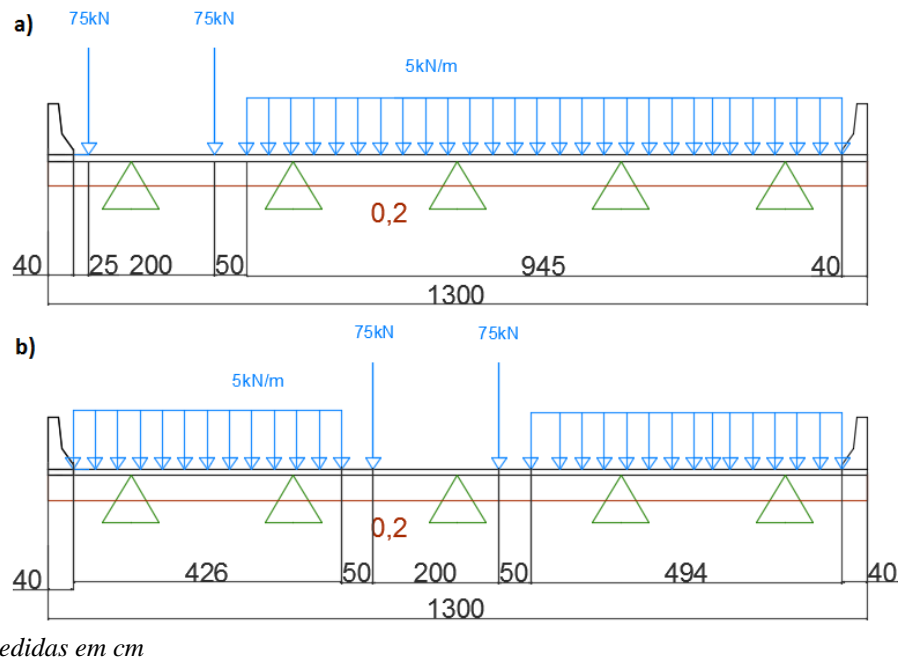


Figura 47 – Trem tipo na viga central a) Trem tipo na extremidade b) Trem tipo no meio

Fonte: O Autor, 2017

Então o trem tipo é posicionado na extremidade como para as outras vigas, para se obter as cargas máximas.

Assim são calculados os valores de carga para cada modelo e estão apresentados na tabela 15.

Tabela 15 – Cargas calculadas para pontes em 5 vigas

| Cargas em Pontes de 5 vigas | | | |
|-----------------------------|--------|-----------|-----------|
| Viga | Q (kN) | q1 (kN/m) | q2 (kN/m) |
| Viga de Extremidade (V1=V5) | 85,96 | 6,8 | 14,56 |
| Viga intermediária (V2=V4) | 57,98 | 7 | 12,3 |
| Viga Central (V3) | 30 | 9,85 | 12,2 |

Fonte: O Autor, 2017

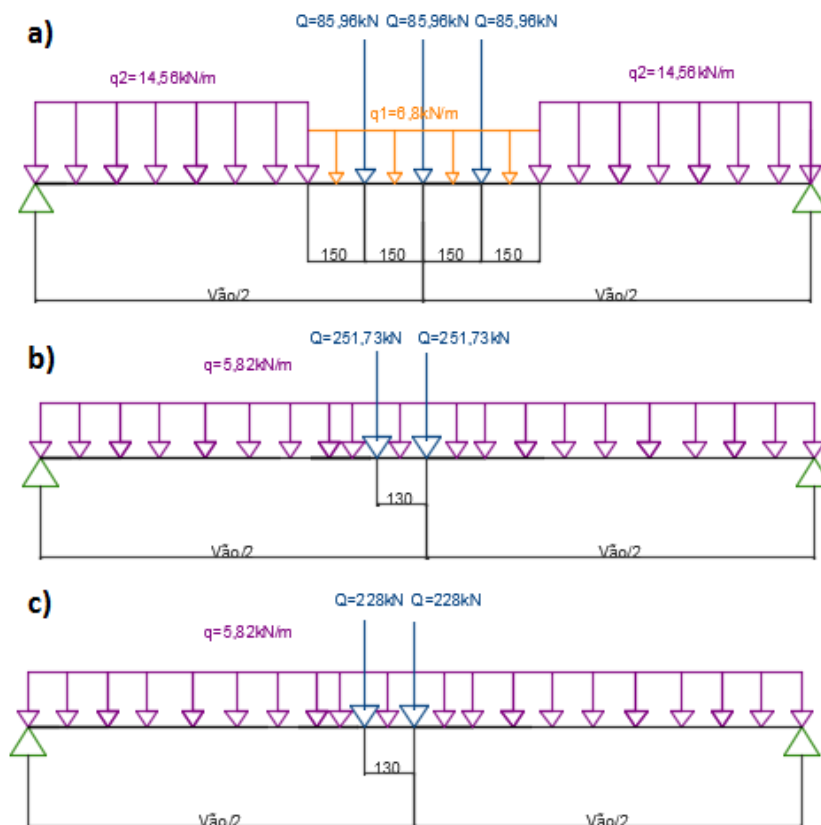
A carga na viga de extremidade é consideravelmente maior que nas outras vigas, portanto essa será usada como parâmetro de comparação para os modelos propostos.

5.3.3 Resultados

O cálculo de momento e força cortante na longitudinal é o mesmo apresentado no item 5.1.2.

As considerações feitas sobre o coeficiente de impacto no item 5.1.3 também são válidas para as pontes de 5 vigas.

A figura 48 apresenta a distribuição das cargas na longitudinal para o cálculo de momento e a tabela 16 contém os valores obtidos para cada vão



Medidas em cm

Figura 48 – Ponte de 5 vigas (Viga de extremidade): Distribuição de cargas na Longitudinal para Momento a) TB450 b) Modelo 1 c) Modelo 2 (Rossigali 2013)

Fonte: O Autor, 2017

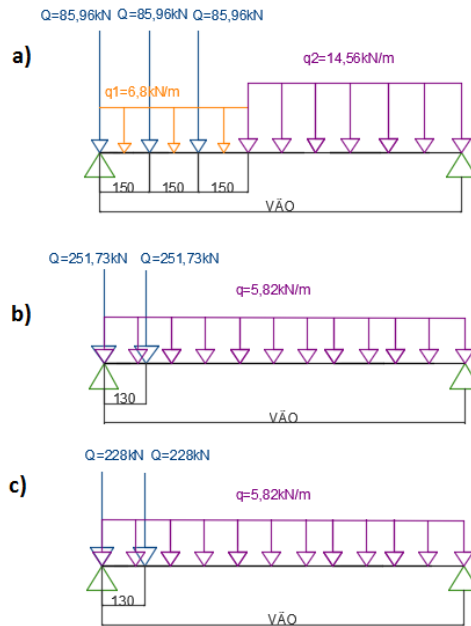
Tabela 16 – Momento para vigas de extremidade de pontes de 5 vigas (kN)

| Momento Fletor (kN.m) para viga V1 de pontes de 5 vigas | | | |
|---|-------|---------------------|----------------------|
| Vão (m) | TB450 | Modelo 1- Rossigali | Modelo 2 – Rossigali |
| 10 | 1043 | 1168 | 1067 |
| 20 | 2203 | 2645 | 2427 |
| 30 | 3958 | 4267 | 3933 |
| 40 | 6093 | 6035 | 5585 |

*O maior valor obtido está em destaque

Fonte: O Autor, 2017

Para a força cortante o trem tipo foi posicionado no apoio para o cálculo, figura 49, e a tabela 17 apresenta os resultados obtidos:



*Medidas em cm

Figura 49– Ponte de 5 vigas (viga de extremidade): Distribuição de cargas na Longitudinal para Força Cortante: a) TB450 b) Modelo 1 e c) Modelo 2 Rossigali (2013)

Fonte: O Autor, 2017

Tabela 17 – Força Cortante (kN) para vigas de extremidade de pontes de 5 vigas

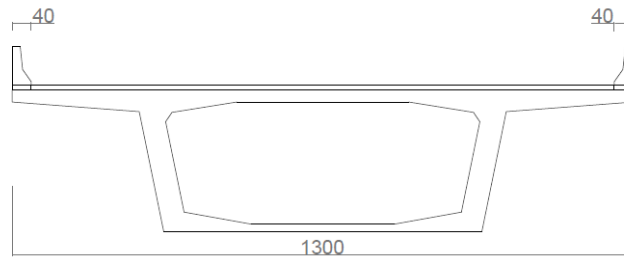
| Força cortante Máxima (kN) para viga V1 de pontes de 5 vigas | | | | |
|--|-------|----------------|---------------------|----------------------|
| Vão (m) | TB450 | TB450 (s/ CIA) | Modelo 1- Rossigali | Modelo 2 - Rossigali |
| 10 | 448 | 358 | 499 | 456 |
| 20 | 575 | 460 | 545 | 500 |
| 30 | 681 | 545 | 580 | 534 |
| 40 | 782 | 625 | 611 | 566 |

*O maior valor obtido está em destaque

Fonte: O Autor, 2017

5.4 PONTE SEÇÃO CELULAR

Para a ponte de seção celular será usado o mesmo tabuleiro do DNER de 13 metros, a figura 50 exemplifica a seção transversal.

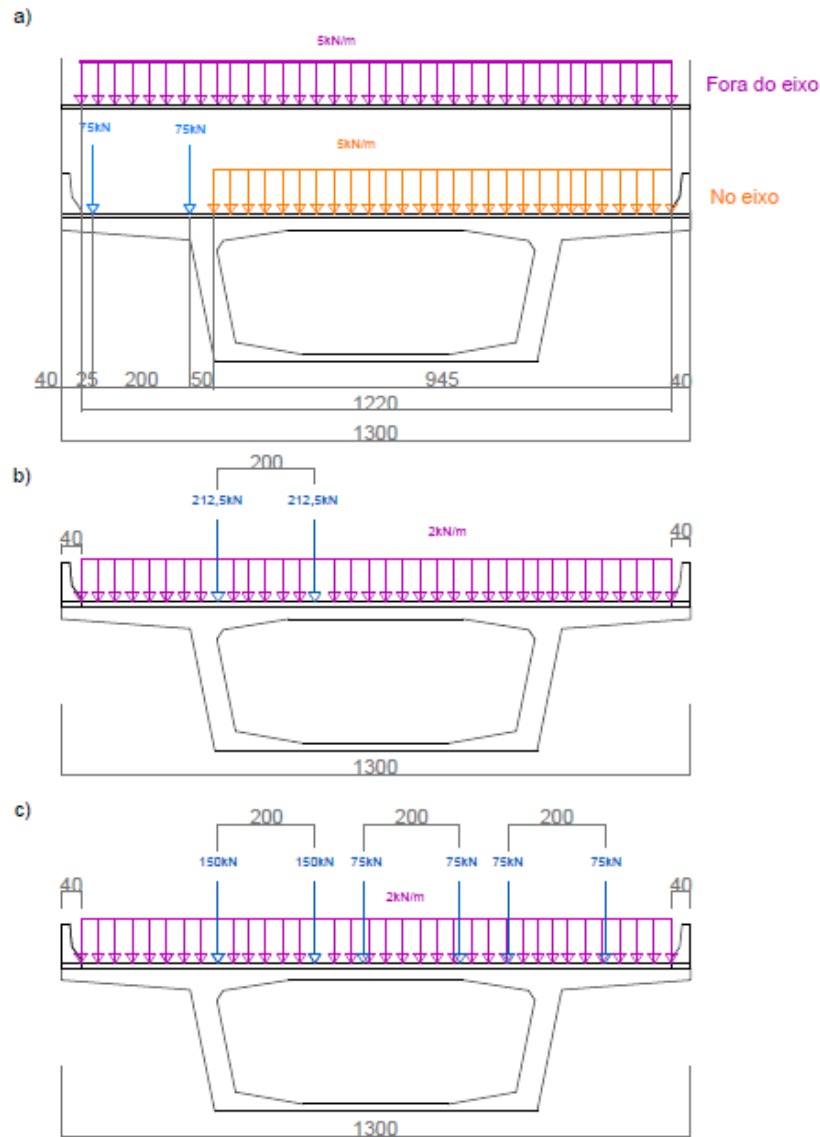


**Medidas em cm*

Figura 50 – Ponte de seção Celular

Fonte: O Autor, 2017

Os esforços são obtidos de maneira global para toda a seção, ou seja, com todo o tabuleiro carregado. O trem tipo é colocado na posição mais desfavorável, portanto no cálculo do TB450 para ponte celular ocorre o mesmo que para a viga central de ponte de 5 vigas, item 5.3.2, e as cargas concentradas são posicionadas na extremidade do tabuleiro. Para os modelos propostos por Rossigali (2013), a carga distribuída é independente das cargas concentradas e ocupam todo o tabuleiro, então qualquer posição resulta no mesmo valor. A figura 51 mostra os três trens tipo distribuídos no tabuleiro transversal.



Medidas em cm

Figura 51 – Distribuição do Trem tipo no tabuleiro de Seção celular a) TB450 b) Modelo 1 e c) Modelo 2 Rossigali (2013)

Fonte: O Autor, 2017

Para o cálculo da carga Q apenas soma-se as cargas pontuais P , e a carga distribuída q é obtida multiplicando a distância pela carga p .

5.4.1 Resultados

O cálculo de momento e força cortante na longitudinal é o mesmo apresentado no item 5.1.2.

As considerações feitas sobre o coeficiente de impacto no item 5.1.3 também são válidas para as pontes de 5 vigas.

A figura 52 apresenta a distribuição das cargas na longitudinal para o cálculo de momento e os valores obtidos para cada vão estão dispostos na tabela 18.

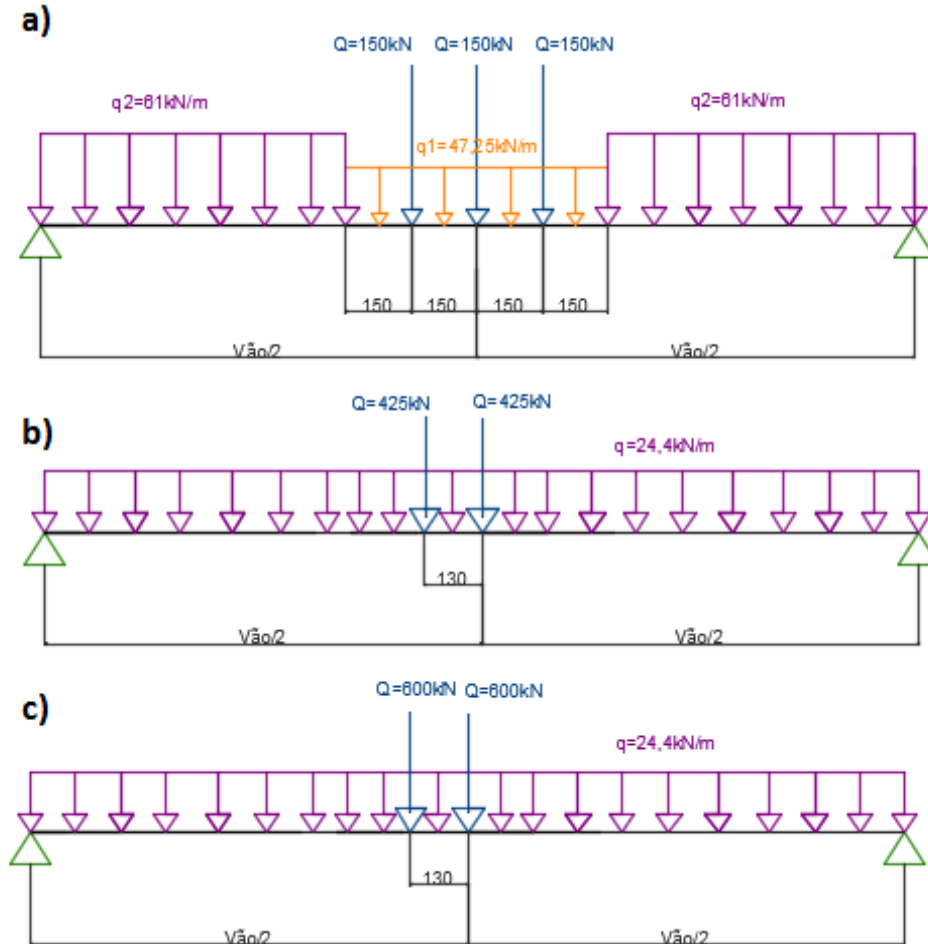


Figura 52 – Ponte Celular: Distribuição de cargas na Longitudinal para Momento a) TB450 b) Modelo 1 e c) Modelo 2 Rossigali (2013)

Fonte: O Autor, 2017

Tabela 18 – Momento para pontes de seção celular (kN)

| Momento Fletor (kN.m) para Pontes de seção celular | | | |
|--|---------------|---------------------|----------------------|
| Vão (m) | TB450 (c/CIA) | Modelo 1- Rossigali | Modelo 2 – Rossigali |
| 10 | 2568 | 2154 | 2915 |
| 20 | 6155 | 5194 | 6830 |
| 30 | 11960 | 8844 | 11350 |
| 40 | 19410 | 13100 | 16490 |

*O maior valor obtido está em destaque

Fonte: O Autor, 2017

Para a força cortante o trem tipo foi posicionado no apoio para o cálculo, figura 53, e novamente foram calculados os valores de TB450 sem CIA. A tabela 19 apresenta os resultados obtidos:

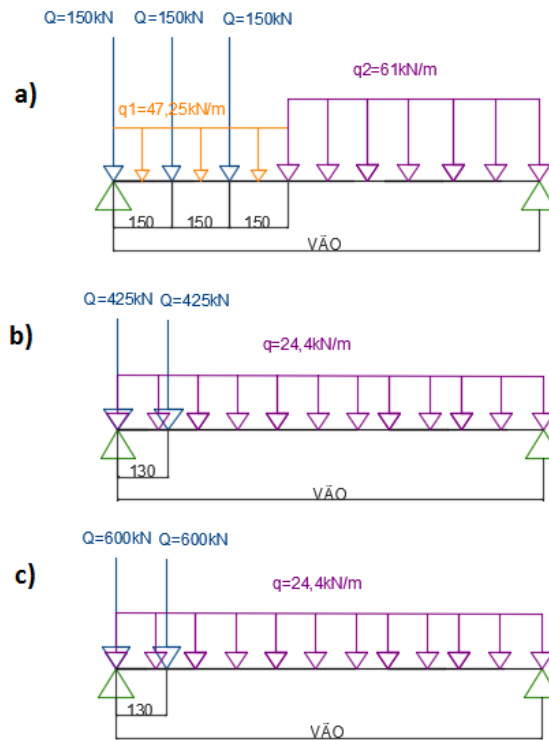


Figura 53 – Ponte Celular: Distribuição de cargas na Longitudinal para Força Cortante
a) TB450 b) Modelo 1 e c) Modelo 2 (Rossigali 2013)

Fonte: O Autor, 2017

Tabela 19 – Força Cortante (kN) para pontes de seção celular

| Força cortante Máxima (kN) | | | | |
|----------------------------|-------|----------------|---------------------|----------------------|
| Vão (m) | TB450 | TB450 (s/ CIA) | Modelo 1- Rossigali | Modelo 2 - Rossigali |
| 10 | 1082 | 865 | 916 | 1244 |
| 20 | 1582 | 1266 | 1066 | 1405 |
| 30 | 2032 | 1626 | 1198 | 1540 |
| 40 | 2463 | 1970 | 1324 | 1669 |

**O maior valor obtido está em destaque*

Fonte: O Autor, 2017

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para realizar a análise dos valores obtidos, foram montados gráficos com a variação do viés para momento fletor e força cortante do trem tipo TB450 da NBR 7188 - 2013 e ambos modelos propostos por Rossigali (2013).

6.1 Pontes de 2 vigas

Para pontes de duas vigas os modelos propostos por Rossigali (2013) apresentaram valores de solicitações próximos com diferença de no máximo 3%, sendo que o modelo 1 apresenta valores maiores que o modelo 2 em todos os casos. A figura 54 apresenta o gráfico de comparação entre os valores de momento obtidos.

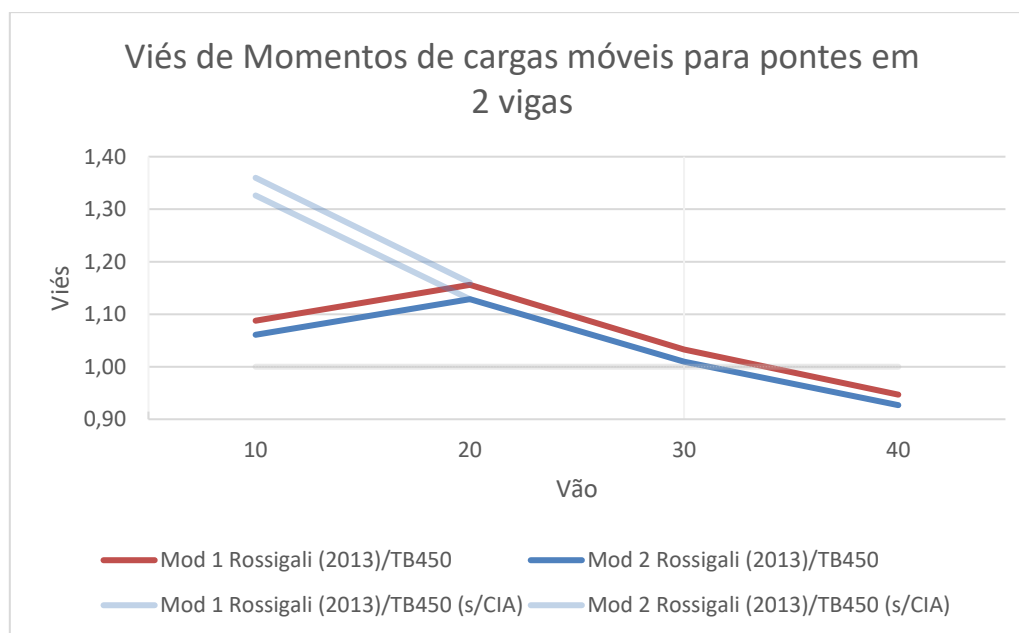


Figura 54 – Gráfico com viés de Momentos para Ponte de duas Vigas

Fonte: O Autor, 2017

Supondo tanto o modelo 1 quanto o modelo 2 como representativos do tráfego real verifica-se que os momentos obtidos pelo TB450 são valores menores que o tráfego real para pontes de até aproximadamente 32m. A implementação do CIA a partir da versão de 2013 da NBR7188 para vãos de 10m proporcionou uma melhora para essas pontes aproximando o valor de momento de projeto do valor real.

A figura 55 apresenta os gráficos de comparação para a Força cortante. O gráfico 55.a) faz uma comparação com o TB450 com CIA e a 55.b) com TB450 sem o CIA, por ser um coeficiente recente e ter grande impacto nos resultados, foi feita uma comparação.

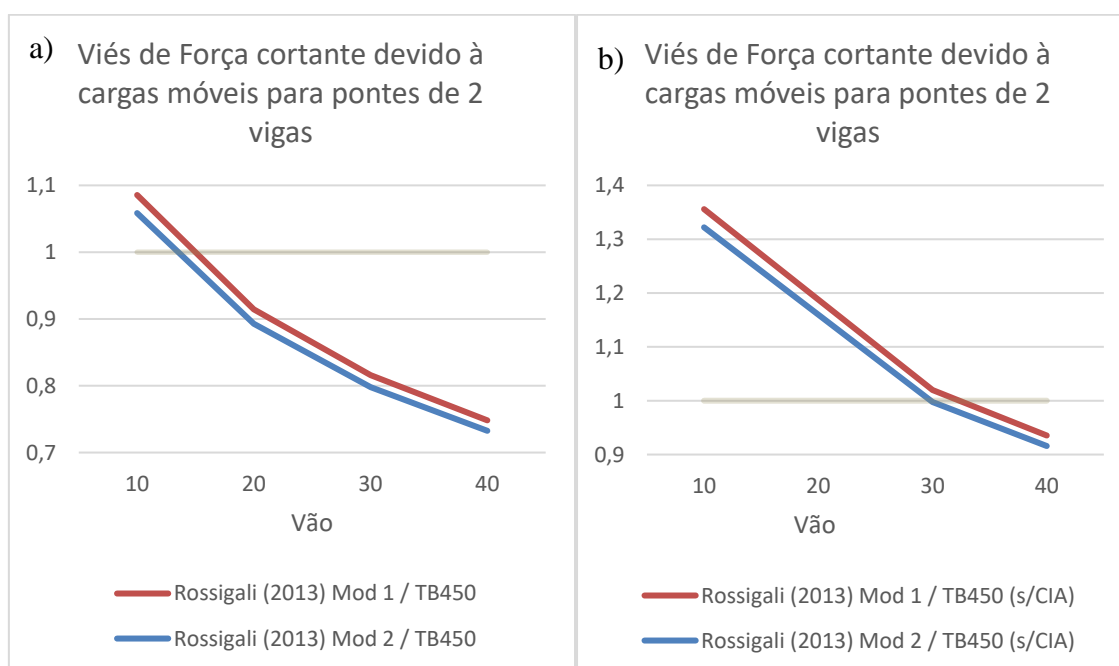


Figura 55 – Gráficos com viés de Força Cortante para Pontes de 2 vigas a) TB450 (com CIA) b) TB450 (s/ CIA)

Fonte: O Autor, 2017

Supondo-se que os dois modelos representam o tráfego real verifica-se que quanto a força cortante, o TB450 com CIA apresenta valores conservadores em relação ao tráfego real em pontes com mais de 13m de vão. Para pontes com vão maiores a diferença entre o valor de projeto (TB450) e o valor de tráfego real chega a 36%, o que pode ter como consequência um superdimensionamento da estrutura. Os valores de projeto obtidos sem o CIA são significativamente menores que o tráfego real, chegando a ser 36% menores para pontes de 10m. É interessante lembrar que esse coeficiente foi instituído em 2013, então a grande maioria das pontes não levaram em conta esse coeficiente.

É importante ressaltar que o coeficiente de majoração para cargas variáveis é $\gamma_q = 1,5$ pela norma NBR 8681-2003, portanto embora as pontes tenham sido dimensionadas para uma carga menor, ainda estão dentro da margem de segurança de estado limite último.

6.2 Pontes de Cinco Vigas

Para a viga de extremidade da ponte de cinco vigas, os modelos propostos por Rossigali (2013) apresentaram valores de solicitações mais distantes com diferença de aproximadamente 10%, sendo que o modelo 1 apresenta valores maiores que o modelo 2 em todos os casos. A figura 56 apresenta o gráfico de comparação entre os valores obtidos de momento para a viga de extremidade da ponte de 5 vigas.

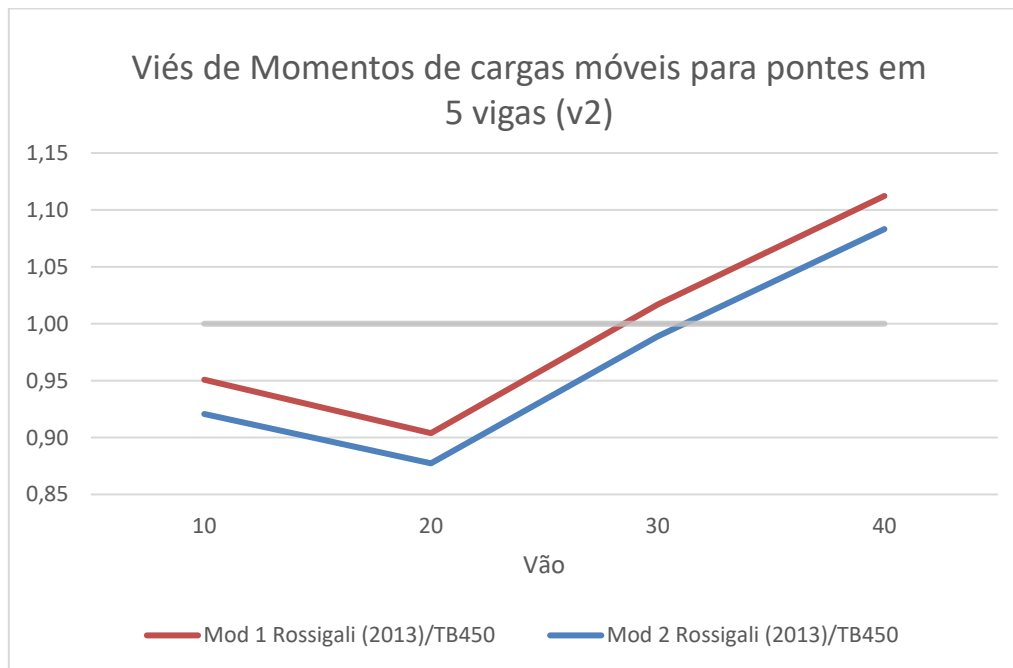


Figura 56 – Gráfico com viés para momento em vigas de extremidade de ponte de 5 vigas

Fonte: O Autor, 2017

Supondo o modelo 1 representativo do tráfego real verifica-se que os momentos obtidos pelo TB450 são menores que o tráfego real para pontes de até 39m.

Supondo o modelo 2 representativo do tráfego real verifica-se que os momentos obtidos pelo TB450 são menores que o tráfego real para pontes com até aproximadamente 29m. Mesmo para vãos pequenos os valores de projeto (TB450) não apresenta diferença maior que 10% do tráfego real.

O uso do CIA para vãos de 10m proporcionou uma melhora para essas pontes aproximando o valor de momento de projeto do valor real (independente de qual modelo seja mais representativo).

O TB450 apresenta valores mais próximos do modelo 2 que do modelo 1. Mas ainda assim para vãos pequenos há uma divergência entre o valor de projeto e tráfego real.

A figura 57 apresenta os gráficos de comparação para a Força cortante. O gráfico 60.a) faz uma comparação com o TB450 com CIA e a 60.b) com TB450 sem o CIA, por ser um coeficiente recente e ter grande impacto nos resultados, foi feita uma comparação.

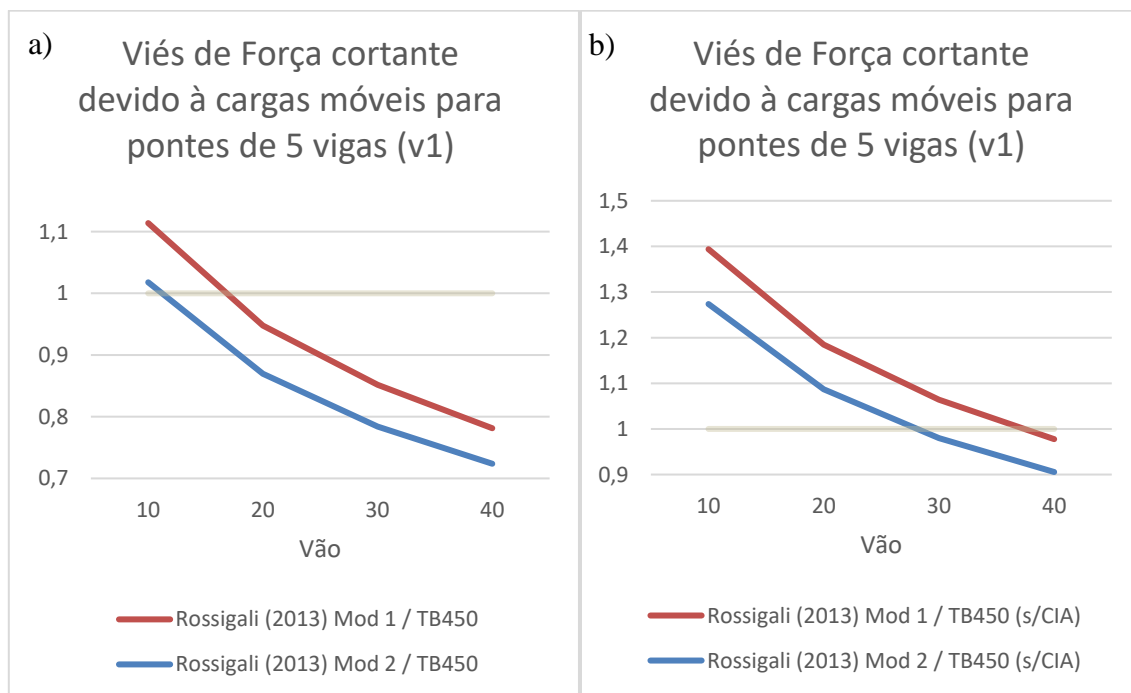


Figura 57 – Gráficos com viés de Força Cortante para Pontes de 5 vigas a) TB450 (com CIA) b) TB450 (s/ CIA)

Fonte: O Autor, 2017

O comportamento do gráfico é similar ao de gráfico de cortante de 2 vigas. A diferença entre o gráfico com e sem CIA é realmente considerável. Supondo o modelo 1 como real, o TB450 só passa a apresentar valores maiores a partir de 17m com CIA e 38m sem CIA. Supondo o modelo 2 como representante do tráfego real, praticamente todos os valores com CIA são maiores que o tráfego real e a partir de 28m sem o CIA.

6.3 Ponte Celular

Para pontes de seção celular, os modelos propostos por Rossigali (2013) apresentaram valores de solicitações ainda mais distantes com diferença de até 35% entre um e outro, sendo que o modelo 2 apresenta valores maiores que o modelo 1 em todos os casos. A figura 58 apresenta os gráficos de comparação entre os valores de momento e força cortante obtidos.

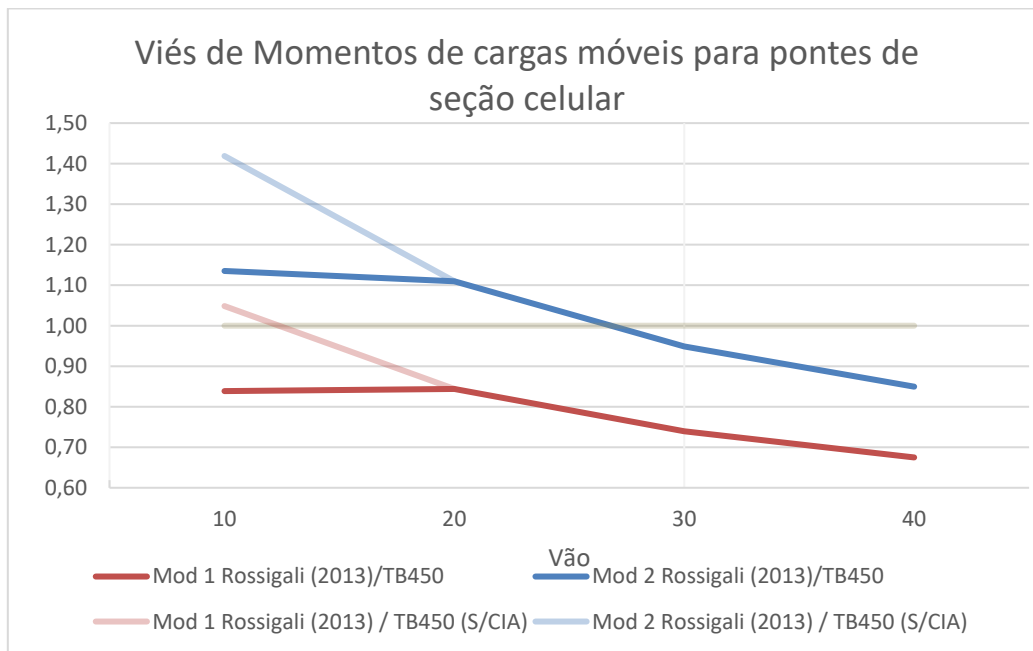


Figura 58 – Gráfico com viés para momento de pontes de seção celular

Fonte: O Autor, 2017

Supondo o modelo 2 representativo do tráfego real verifica-se que as solicitações obtidas pelo TB450 são menores que o tráfego real para todas pontes quando considerado o CIA, no entanto para pontes com maiores vãos, a diferença chega a ser 33% maior que o tráfego real.

Supondo o modelo 1 representativo do tráfego real verifica-se que as solicitações obtidas pelo TB450 são menores que o tráfego real para pontes de até 27m.

A figura 59 apresenta os gráficos de comparação para a Força cortante. O gráfico 59.a) faz uma comparação com o TB450 com CIA e a 59.b) com TB450 sem o CIA

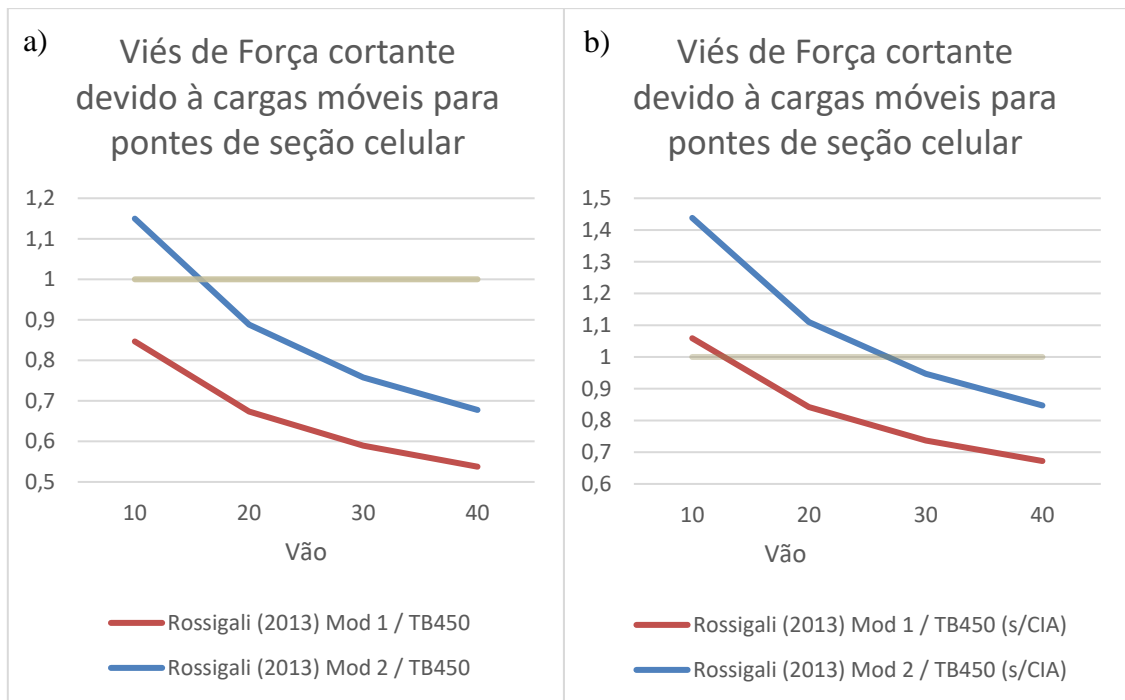


Figura 59 – Gráficos com viés de Força Cortante para Pontes de seção celular a) TB450 (c/CIA) b) TB450 (s/ CIA)

Fonte: O Autor, 2017

Supondo o modelo 1 representativo do tráfego real, o trem tipo de projeto com CIA gera uma força cortante maior para todos os vãos, mas também para grandes vãos apresenta uma diferença de 47% a mais que o tráfego real.

Supondo o modelo 2 representativo do tráfego real, o trem tipo de projeto com CIA passa a ser maior que os valores reais a partir de pontes de 15m; para grandes vãos, o valor de projeto é superdimensionado, chegando a ser 33% maior que o valor real. Por outro lado, sem o CIA, o mesmo modelo pode chegar a ser 47% menor para pequenos vãos.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTURO

7.1 Comentários gerais e conclusões

Com o aumento do tráfego nas rodovias torna-se necessário uma reavaliação do trem tipo de norma. Rossigali (2006, 2013) com o intuito de modernizar as cargas de norma realizou um estudo do tráfego real em pontes de 2 vigas e chegou a dois modelos representativos. O presente trabalho realizou uma comparação do trem tipo de cargas móveis da NBR 7188 – 2013, TB450, com os modelos obtidos por Rossigali (2013).

Foram apresentados alguns conceitos de pontes, as classificações mais importantes para o projeto e como as ações atuam na estrutura. Para as pontes rodoviárias a principal carga variável é o carregamento móvel provocado pelo tráfego de veículos sobre a pista. As cargas são consideradas através de trens tipo idealizados, que não necessariamente representam os veículos passantes naquela ponte, mas uma combinação que poderia resultar nos esforços mais críticos.

Ao avaliar o histórico de edições da norma brasileira que estabelece as cargas em pontes rodoviárias, pode-se constatar que nunca houve uma mudança significativa na definição do modelo de carga móvel recomendado para projeto. Por isso tem surgido pesquisas com o intuito de encontrar modelos que representem mais fielmente o tráfego real.

Foram consideradas nas análises pontes biapoiadas de 2 vigas, 5 vigas e seção celular, com os vãos variando de 10m a 40m.

Para o cálculo de solicitações em pontes de duas vigas é usada a análise simplificada de linha de influência 0-1. Foi feita uma comparação com os valores obtidos para o TB450 para vigas biapoiadas por esse método e os valores obtidos em Rossigali (2013) através do programa computacional SAP 2000®. Foi possível observar que as solicitações obtidas através de elementos finitos são 11% menores do que os obtidos pelo método manual de linha de influência. Considerando que é uma simplificação os resultados são satisfatórios por serem mais conservadores.

Para as pontes de 5 vigas é preciso calcular os esforços para 3 vigas: Vigas de extremidades, vigas intermediárias e viga central. A linha de influência para cada viga foi encontrada através do Método de Courbon e determinou-se a viga mais crítica, ou seja, com maiores carregamentos na longitudinal. A viga de extremidade apresentou os

maiores valores e passou a ser representativa da ponte de 5 vigas para a comparação dos modelos.

Foram calculados os momentos e forças cortantes máximos com o TB450 e com os dois modelos propostos por Rossigali (2013) para as três pontes analisadas.

Para a ponte de duas vigas, os dois modelos apresentaram valores próximos um do outro, o que é compatível com o estudo realizado pelo autor para esse tipo de ponte.

Para a viga de extremidade da ponte de 5 vigas os modelos propostos em Rossigali (2013) apresentaram uma diferença maior entre eles.

Apesar da diferença entre os valores dos modelos, os gráficos para as duas pontes tiveram um comportamento similar: As solicitações do modelo 1 foram sempre maiores que as do modelo 2; os momentos obtidos com o TB450 deram inferiores para pontes de pequenos vãos, mas para pontes com vãos maiores, os valores passaram a ser satisfatórios. O gráfico de força cortante apresenta uma discrepância maior entre os valores de projeto e o valor de tráfego real. O uso do coeficiente de impacto adicional teve grande impacto tanto no cálculo de momento da ponte de 10m quanto no de força cortante.

Para a ponte de seção celular os modelos apresentam valores ainda mais distantes um do outro, e o gráfico apresentou um comportamento diferente. O modelo 2 passa a ser o mais crítico. Como houve uma diferença muito grande entre os dois modelos, não é possível fazer uma análise do TB450, deve ser estudado qual modelo melhor representa o tráfego real.

Conclui-se, portanto, que para pontes de duas vigas, o TB450 precisa ser revisado de modo que apresentem valores mais próximos do tráfego real. Para pontes de 5 vigas e ponte de seção celular, deve-se estudar mais a fundo qual modelo seria o mais representativo do tráfego real. É importante ressaltar que em Rossigali (2013) só foram consideradas pontes de duas vigas.

O coeficiente de impacto adicional proporcionou uma melhora significativa para as pontes de vãos pequenos, mas ao ser usado na força cortante de grandes vãos, pode levar à um superdimensionamento da estrutura.

7.2 Sugestões para trabalhos de TCC

- Estender a análise para pontes com balanços e pontes contínuas para avaliação dos momentos negativos da norma e de Rossigali;

- Estender a análise para pontes em laje;

- Estender a análise para pontes com diferentes números de vigas.

- Avaliar as solicitações em serviço da Norma e Rossigali considerando a análise de fadiga;

- Comparar as solicitações de acordo com a carga da NBR, ASHTOO e Eurocódigo para as pontes consideradas;

- Comparar os valores obtidos da análise simplificada (Método de Courbon) das pontes em grelha com valores obtidos por programa de elementos finitos ou grelha.

- Comparar os valores obtidos da análise simplificada (Método de Courbon) para pontes em grelha com vigas de inércia diferente com valores obtidos por programa de elementos finitos ou grelha.

- Comparar os valores obtidos da análise simplificada das pontes celulares com valores obtidos por programa de elementos finitos ou grelha.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anuário CNT do transporte – estatísticas consolidadas 2016 - 2ª tiragem. – Brasília CNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1940, NB-1 – “Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1941, NB-2 – “Cálculo e Execução de Pontes em Concreto Armado”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1943, NB-6 – “Carga móvel em ponte rodoviária”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1960, NB-6 – “Carga móvel em ponte rodoviária”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984, NBR 7188 – “Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987, NBR 7187 – “Projeto e Execução de Pontes de Concreto Armado e Protendido – Procedimento”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003, NBR 7187 – “Projeto de Pontes de Concreto Armado e de Concreto Protendido – Procedimento”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003, NBR 8681 – “Ações e segurança nas estruturas – Procedimento”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007, NBR 6118 – “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento”. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013, NBR 7188 – “Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre”. Rio de Janeiro, RJ.

BASTOS, Paulo S. dos S. “Exemplos de estruturas Protendidas”. [2011?]. Apostila - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA UNESP, São Paulo, [2011?]. Disponível em: <http://www.feb.unesp.br/pbastos/pag_protendido.htm>. Acesso em: 11 jul. 2017

Blog Mega Engenharia. “Ponte Rio-Niterói – Rio de Janeiro”. Disponível em: <<http://megaengenharia.blogspot.com.br/2012/05/ponte-rio-niteroi-rio-de-janeiro.html>>. Acesso em: 18 jun. 2017.

Blog Mega Engenharia. “Ponte da Amizade - Foz do Iguaçu”. Disponível em: <<http://megaengenharia.blogspot.com.br/2013/01/ponte-da-amizade-foz-do-iguacu.html>>. Acesso em: 18 jun. 2017.

Blog Mega Engenharia. “Ponte da Normandia – França”. Disponível em: <<http://megaengenharia.blogspot.com.br/2013/08/ponte-da-normandia-franca.html>>. Acesso em: 18 jun. 2017.

CAVALCANTI, Paulo de Sá Pereira. “Trens tipo de projeto: Evolução dos trens tipo de projetos das Normas Brasileiras”. 2004. 14 f. Apostila de Pontes - FACENS, Sorocaba, 2004.

Congresso brasileiro de pontes e estrutura, VII, 2014, Rio de Janeiro. “Efeitos da Mudança da NBR 7188:2013 nos Projetos de Pontes. Estudo de Caso: Projeto de Recuperação da Ponte sobre o Rio Correias na BR 101/SC”. Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos/trab_100.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2017.

Deutsche Institut für Normung, 1952, DIN 1072 - Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen. Berlin, Deutschland.

Deutsche Institut für Normung, 1967, DIN 1072 - Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen. Berlin, Deutschland.

Deutsche Institut für Normung, 1985, DIN 1072 - Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen. Berlin, Deutschland.

DIÁRIO do Litoral. “Novo acesso ao porto de Santos é proposto”. Disponível em: <<http://www.caminhoes-e-carretas.com/2015/09/novo-acesso-ao-porto-de-santos-e.html>>. Acesso em: 21 jun. 2017.

EL DEBS, M. K., MALITE, M. et al., “Um Estudo das Conseqüências do Tráfego de Combinações de Veículos de Carga sobre as Pontes da Rede Viária do DER-SP”. XXX Jornadas Sul-americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, DF, maio, 2001.

EL DEBS M.K.; TAKEYA, T. Introdução às pontes de concreto. Texto provisório de apoio à disciplina de pontes. SET 412. (Apostila), São Carlos, 2009.

FERREIRA, L. M. Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FROTA, Luiz Eduardo Carneiro. “Estudo comparativo entre o método de courbon e modelos computacionais para análise de tabuleiros de pontes”. Monografia de

bacharelado (departamento de engenharia civil e ambiental) - Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2014.

G1 Globo Mato Grosso. “Começa a instalação de vigas para viaduto em obra da Copa em MT”. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mato-grosso/noticia/2013/07/comeca-instalacao-de-vigas-para-viaduto-em-obra-da-copa-em-mt.html>>. Acesso em: 20 jul.2017

IBRACON, Revista Concreto e Construções, 80ª edição, 2015, São Paulo. “Modelos de dimensionamento, normalização e métodos de avaliação de pontes e viadutos”. 124 p. Disponível em: <http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao80/files/assets/basic-html/index.html#1>. Acesso em: 16 jul. 2017.

JORNAL Etc e Tal . “S. João do Porto: Campanha brilhou nas Rugas!”. Disponível em: <<http://etcetaljornal.pt/j/2016/07/s-joao-do-porto-campanha-brilhou-nas-rugas/>>. Acesso em: 19 jul. 2017

LEONHARDT, F. “Construções de concreto: princípios básicos da construção de pontes de concreto”. Rio de Janeiro: Interciência, 1979.

LUCHI, L. A. R., “Reavaliação do trem-tipo à luz das cargas reais nas rodovias brasileiras”. Tese de D.Sc., EPUSP, São Paulo, SP, 2006.

MARTHA, L. F. “Análise de Estruturas: conceitos e métodos básicos”, Elsevier Ediora, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

MASON, J. “Pontes em concreto armado e protendido: princípios do projeto e cálculo”. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977.

MENDES, P.T.C., “Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras”. Tese de D.Sc., EPUSP, São Paulo, SP, 2009.

MORAES, J.C.; ALVES, R; SOUZA, M.; OLIVEIRA, P. E.; KANO, S.A. “Rodoviarismo. Evolução das obras de arte no estado de São Paulo”, São Paulo, 1994.

NACHRECHNUNG von Straßenbrücken: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand. Disponível em: <<https://www.infograph.de/de/nachrechnung-von-strassenbruecken>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

PFEIL, W., “Pontes em Concreto Armado. Volume 1”. 3a edição. Rio de Janeiro, RJ, Livros Técnicos e Científicos, 1985.

QUADROS, H.S. “Projeto estrutural de ponte: comparativo de soluções com vigas seções T pré-moldada e caixa moldada in loco”. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

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, 2006.

ROSSIGALI, C. E., 2013, “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.

SANTOS, M. F., “Contribuição ao estudo do efeito de combinação de veículos de carga sobre pontes rodoviárias de concreto”. Dissertação de M.Sc., EESC/USP, São Carlos, SP, 2003.

SUSSEKIND, J.C .”Curso de análise estrutural 1”. Rio de Janeiro: Globo, 1974.

THOMAZ, E., Notas de aula de Concreto Protendido – Pontes pré-moldadas – IME, RJ, 2002.