

Efeitos de cargas permanentes, trens-tipo e veículos reais em pontes em vigas

PAULO DE TARSO CRONEMBERGER MENDES – PROFESSOR DOUTOR

MARIA DE LOURDES TEIXEIRA MOREIRA – PROFESSORA DOUTORA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ

PAULO DE MATTOS PIMENTA – PROFESSOR DOUTOR

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

1. INTRODUÇÃO

A rede de rodovias brasileiras conta com elevado número de pontes com faixas etárias as mais variadas, tendo sido projetadas seguindo os padrões estabelecidos pela NB-6 de 1946, 1950, 1960 e 1982. As alterações ocorridas nessa norma visaram adaptar os trens-tipo de projeto à evolução da frota de veículos circulantes.

Os dados sobre as pontes existentes nas rodovias federais brasileiras [1] possibilitam identificar no estoque de pontes suas características estruturais, trens-tipo de projeto, número e dimensões dos vãos, entre outros. Dessas pontes, 93% possuem vão menor que 40,0 m e 50% menor que 20,0 m, 83% são em viga de concreto armado, 50% delas são simplesmente apoiadas.

Este trabalho resgata os trens-tipo das normas NB-6 de 1946, 1950, 1960 e 1982, apresenta as características dos veículos reais da frota em circulação, determina seus efeitos sobre pontes representativas do estoque de pontes brasileiras com vãos entre 6,0 m e 40,0 m, de modo a comparar os resultados e estabelecer a importância de cada um dos carregamentos e contribuir para a avaliação da situação

das condições de estabilidade e da necessidade de adoção de medidas que minimizem os danos às pontes existentes.

2. EVOLUÇÃO DAS NORMAS DE PROJETO

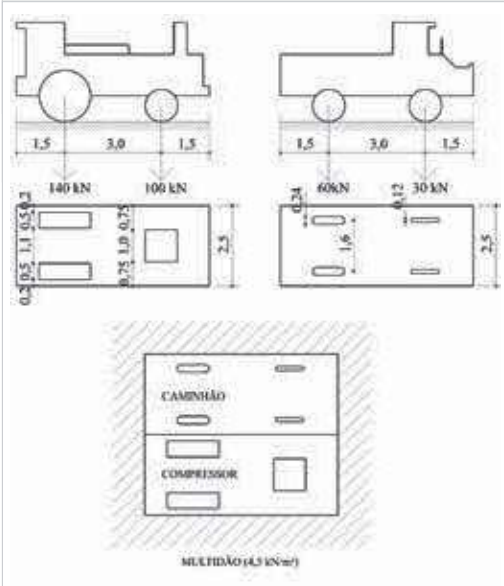
As pontes das rodovias federais construídas entre 1946 e 1950 foram projetadas com o trem-tipo da NB-6 de 1946 [2]. O padrão de carregamento proposto compreendia um compressor de 240 kN e tantos caminhões de 90 kN quantas fossem as faixas de tráfego menos uma, e multidão de 4,50 kN/m², conforme indicado na Figura 2.1. Os efeitos dinâmicos eram considerados com um coeficiente de impacto $\phi = 1,3$.

Em 1949, foi instituída a NPER-6/1949, que estabelecia como trem-tipo de projeto um compressor de 240 kN (140 kN no eixo traseiro e 100 kN no eixo dianteiro) e tantos caminhões de 120 kN (80 kN no eixo traseiro e 40 kN no eixo dianteiro) quantas fossem as faixas de tráfego menos uma, e multidão de 5,00 kN/m², conforme indicado na Figura 2.2. O coeficiente de impacto continuou $\phi = 1,3$.

Em vista da alteração ocorrida com a NB-6 em 1960, as pontes das rodovias federais construídas entre 1960 e



Figura 2.1 – Esquema de carregamento da NB-6/1946

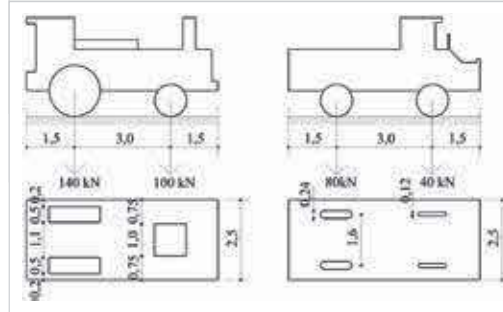


1982 foram projetadas para um padrão de carregamento correspondente a um veículo de 360 kN (120 kN em cada um dos três eixos), multidão de 5,00 kN/m² anterior e posterior ao veículo e multidão de 3,00 kN/m² nas faixas laterais ao veículo, conforme indicado na Figura 2.3. Para consideração dos efeitos dinâmicos foi adotado um coeficiente de impacto variável com o vão da ponte, expresso por:

$$\varphi = 1,4 - 0,007.L \quad [2.1]$$

onde L é o vão da ponte.

Figura 2.2 – Esquema de carregamento da NPER-6/1949



Em 1978, a NB-1 passou por nova revisão, mas as normas NB-2 e NB-6 só sofreram alteração em 1987 e 1982, respectivamente. Dessa forma, somente em 1982 houve alteração no padrão de carregamento para o qual deveriam ser projetadas as pontes. Este padrão de carregamento passou a ser composto por um veículo de 450 kN (150 kN em cada um dos três eixos), multidão de 5,00 kN/m² ao redor do veículo e multidão de 3,00 kN/m² nos passeios, conforme indicado na Figura 2.4. Para consideração dos efeitos dinâmicos foi mantido o coeficiente de impacto adotado pela revisão anterior.

3. VEÍCULOS REAIS EM CIRCULAÇÃO

Os veículos que trafegam nas rodovias brasileiras devem obedecer ao disposto na Lei 9.503, de 23 de setembro de 1997, que instituiu o Código de Trânsito Brasileiro (CTB), e nas resoluções emanadas do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), como a Resolução Nº 12/98 – CONTRAN,

Figura 2.3 – Esquema de carregamento da NB-6/1960

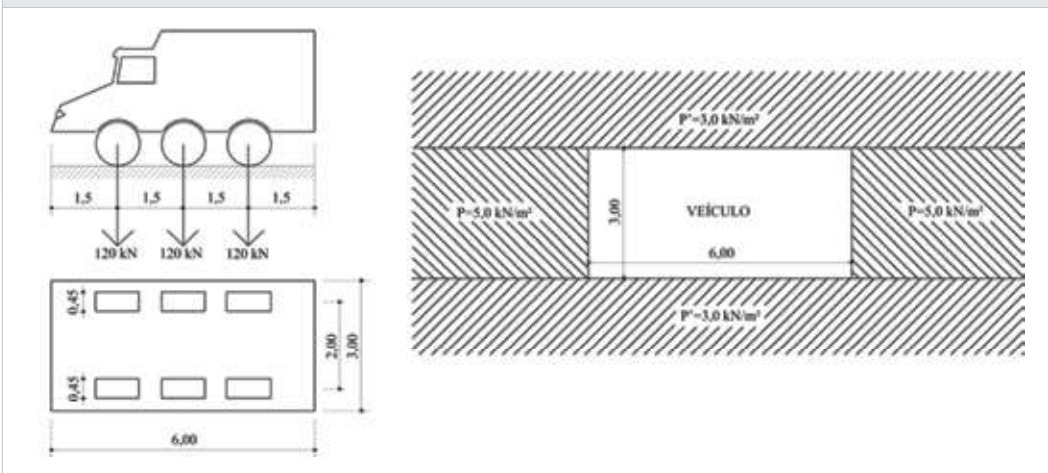
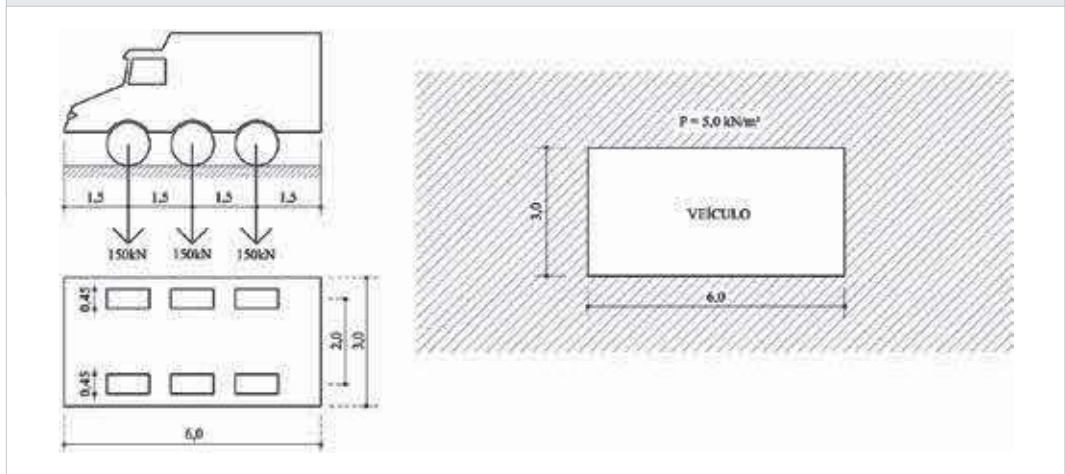


Figura 2.4 – Esquema de carregamento da NB-6/1982



que estabelece limites de peso e dimensões dos veículos e a Resolução Nº 211/06 – CONTRAN, que estabelece os requisitos necessários à circulação de veículos de carga.

As pesquisas de tráfego apontam para uma grande diversidade de tipos de veículos que compõem a frota em circulação no país e para um número infinito de possibilidades para as distâncias entre eixos dos veículos. Para a determinação dos esforços solicitantes provocados pelos veículos reais circulantes, foram selecionados alguns

veículos como representativos da frota, considerando as pesquisas de trânsito apresentadas pelo CENTRAN [3]. Como representativa dos veículos leves foi adotada uma Van, com os carregamentos apresentados na Figura 3.1. Como representativo do segmento de veículos de trans-

Figura 3.1 – Veículo VAN –
 $E_1 = 16,0 \text{ kN}/E_2 = 22,4 \text{ kN}/d_{12} = 3,00 \text{ m}$

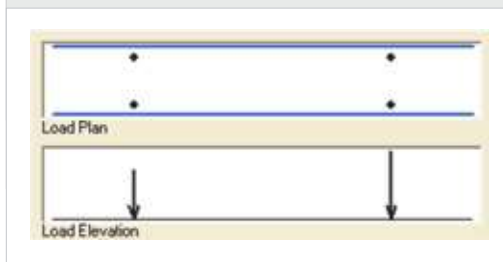


Figura 3.2 – Veículo ONÍB-DD-TRUC (4CB)–(E_1 a E_2)=64,5 kN/(E_3 a E_4)=72,5

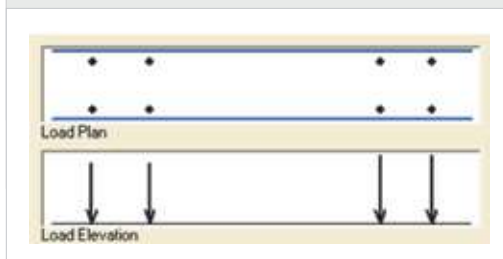


Figura 3.3 – Veículo RT-74/20 (3T6) –
 $E_1 = 57,0 \text{ kN}/(E_2 \text{ a } E_9) = 90,0 \text{ kN}/$
 $d_{12} = 4,075\text{m}/d_{23} = 1,45 \text{ m}/d_{34} =$
 $1,95\text{m}/d_{45} = 1,25\text{m}/d_{56} = 3,55\text{m}/d_{67} =$
 $1,25\text{m}/d_{78} = 2,75\text{m}/d_{89} = 1,25\text{m}$

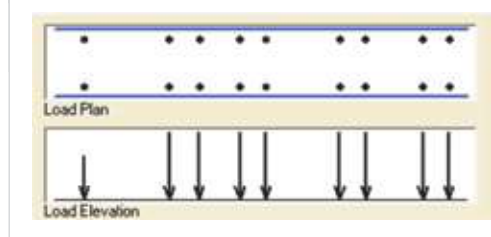


Figura 3.4 – Veículo RT-74/25 (3T6-b) –
 $E_1 = 57,0 \text{ kN}/(E_2 \text{ a } E_9) = 90,0 \text{ kN}/$
 $d_{12} = 3,975\text{m}/d_{23} = 1,45\text{m}/d_{34} = 4,95\text{m}/$
 $d_{45} = 1,25\text{m}/d_{56} = 3,05\text{m}/d_{67} = 1,25\text{m}/$
 $d_{78} = 5,55\text{m}/d_{89} = 1,25\text{m}$

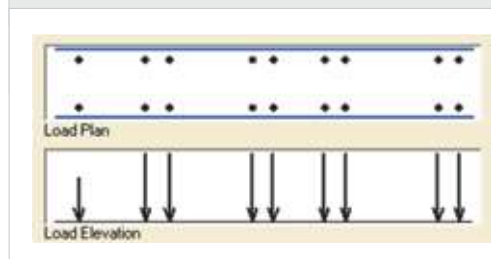


Figura 3.5 – Veículo BT-74/25 (3Q6) –
 $E_1 = 57,0 \text{ kN}/(E_2 \text{ a } E_9) =$
 $90,0 \text{ kN}/d_{12} = 3,06\text{m}/d_{23} =$
 $1,25\text{m}/d_{34} = 7,03\text{m}/d_{45} = 1,25 \text{ m}/d_{56} =$
 $1,25\text{m}/d_{67} = 6,15\text{m}/d_{78} = 1,25\text{m}/d_{89} = 1,25\text{m}$

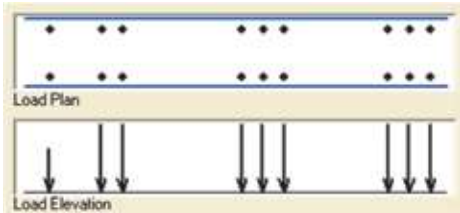
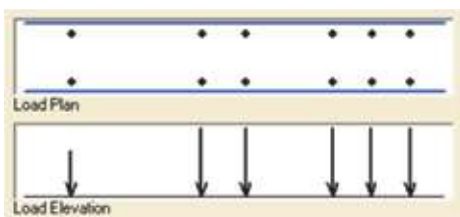


Figura 3.6 – Veículo BB-48/14 (3J3) –
 $E_1 = 60,0 \text{ kN}/(E_2 \text{ a } E_6) = 90,0 \text{ kN}/$
 $d_{12} = 4,20\text{m}/d_{23} = 1,40\text{m}/d_{34} =$
 $2,80\text{m}/d_{45} = 1,25\text{m}/d_{56} = 1,25\text{m}$



porte de passageiros foi adotado um ônibus direcional duplo trucado ONIB-DD-TRUC (4CB), conforme visto na Figura 3.2. Foram também considerados os veículos propostos no Relatório Técnico elaborado pelo Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da USP [4], quais sejam o Rodotrem 74/20 (3T6), Rodotrem 74/25 (3T6), Bi-trem 74/25 (3Q6) e caminhão basculante BB 48/14 (3J3), apresentados nas Figuras 3.3 a 3.6, cujas cargas por eixo consideram o percentual de tolerância de 5% em relação à carga máxima prevista por eixo.

4. MODELO ADOTADO

Para a análise, foi selecionada uma ponte representativa das pontes existentes na rede de rodovias federais brasileiras. Os diferentes padrões de carregamento das normas, descritos em 2, quando aplicados a uma ponte típica provocam esforços solicitantes de valores distintos, que devem ser comparados, para efeito de verificação das condições em que o padrão de carregamento de uma nor-

ma mais recente também é atendido pelo padrão de uma norma mais antiga, ou para comparação com o efeito das cargas reais.

Os modelos utilizados, como o apresentado na Figura 4.1, onde os eixos das barras representativas das longarinas são coplanares aos elementos de casca representativos do tabuleiro, remetem ao processo tradicional de avaliação dos esforços em que a contribuição do carregamento chega às longarinas como reações do tabuleiro sobre as mesmas, sem uma consideração mais precisa quanto à ligação entre esses elementos.

A análise efetuada com o SAP2000 restringiu-se aos momentos fletores máximos nas longarinas, com vãos de 6,0 a 40,0 m, provocados pelos padrões de carregamento das normas e por veículos reais em circulação, com geometrias e cargas por eixo determinadas por legislação específica, conforme Figuras 3.1 a 3.6, trafegando nas faixas indicadas nas Figuras 4.2 a 4.4.

Figura 4.1 – Modelo com elementos de barra e casca

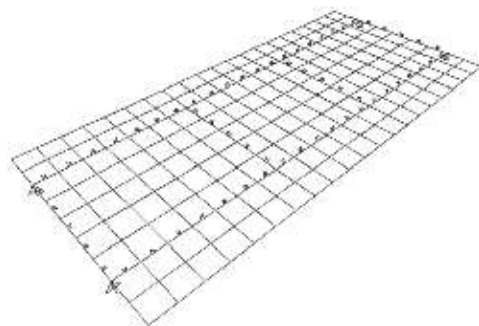


Figura 4.2 – Faixas de atuação do TB240-I e TB240-II, multidão (verde), caminhão (róseo) e compressor (vermelho)

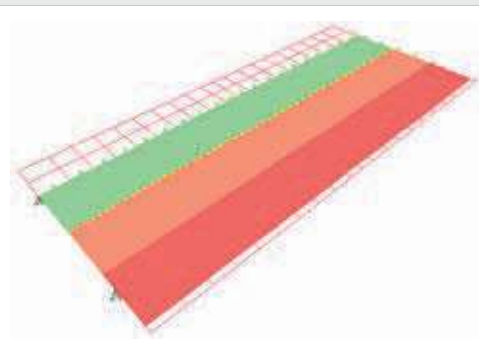


Figura 4.3 – Faixas de atuação do TB360 e TB450, multidão (verde) e veículo (vermelho)

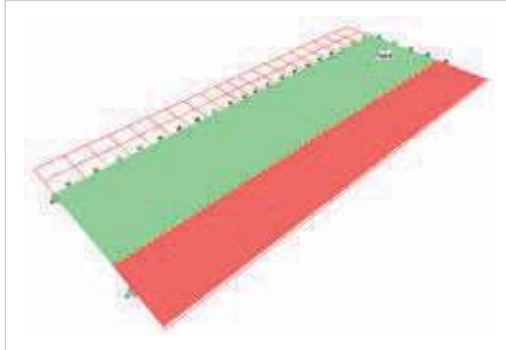
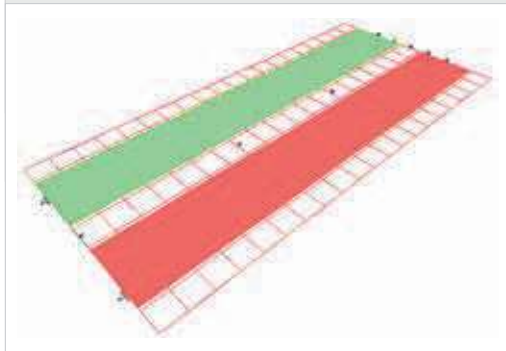


Figura 4.4 – Faixas de circulação dos veículos reais

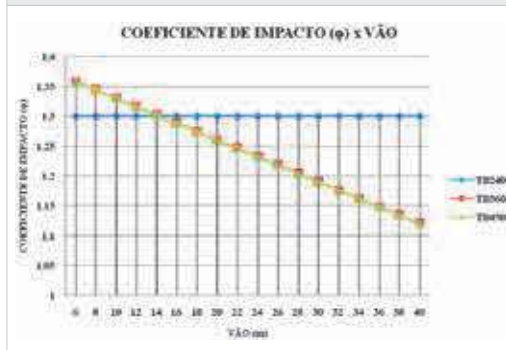


5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 COEFICIENTE DE IMPACTO

A Figura 5.1 apresenta os valores dos coeficientes de impacto em função do vão para os trens-tipo TB240, TB360

Figura 5.1 – Variação do coeficiente de impacto (ϕ) com o vão – TB240/TB360/TB450



e TB450 para vãos de 6,0 m a 40,0 m. Para pontes com vão maior que 14,0 m, o coeficiente de impacto do TB240 é sempre superior aos do TB360 e TB450, o que constitui um fator favorável na análise das pontes mais antigas.

De acordo com medições efetuadas, apresentadas por PENNER [5], o coeficiente de impacto pode assumir valores substancialmente maiores que os considerados por norma, a depender das características da estrutura e do pavimento, da velocidade do veículo e da intensidade das cargas por eixo. Para veículos carregados, o valor do coeficiente de impacto pode chegar a 1,5.

5.2 ESFORÇOS PROVOCADOS PELOS VEÍCULOS ESTUDADOS

Inicialmente foram feitas análises com os valores nominais dos carregamentos previstos nas normas e nos veículos em circulação. Na Figura 5.2, são apresentados os momentos fletores máximos para pontes simplesmente apoiadas com vãos de 6,0 m a 40,0 m relativos aos carregamentos permanentes – peso próprio, pavimento e defensas – somente ao peso próprio, aos trens-tipo previstos nas normas – TB240-I (NB-6/1946) e II (NB-6/1950), TB360, TB450, aos veículos atuando em faixa simples – rodotrens RT-74/20 e RT-74/25, treminhão BT-74/25, trucado semi-reboque BB-48/14 e aos ônibus trucados ONIB-TRUC e direcional duplo ONIB-DD-TRUC. Observa-se a elevada participação dos carregamentos permanentes em relação ao carregamento móvel nas pontes com vãos superiores a 20,0 m.

A Figura 5.3 apresenta as informações contidas na figura anterior, exceto as curvas referentes ao peso próprio

Figura 5.2 – Comparação dos efeitos de cargas permanentes e móveis

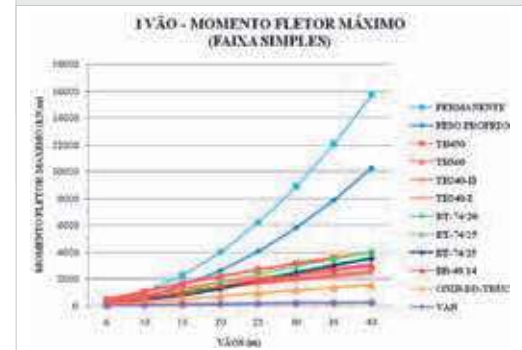


Figura 5.3 – Comparação dos efeitos de cargas móveis reais, excluindo peso próprio - veículos atuando em faixa simples

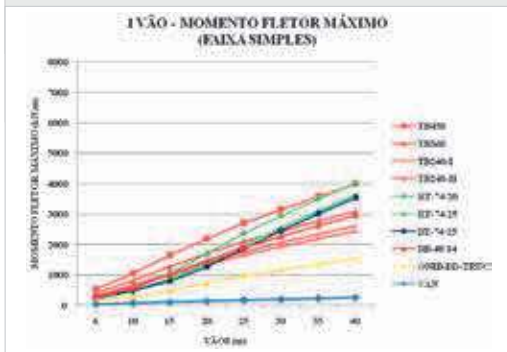
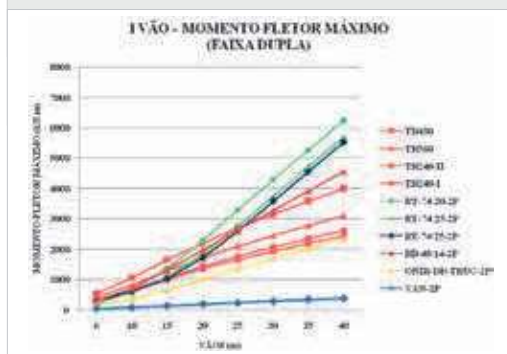


Figura 5.4 – Comparação dos efeitos dos carregamentos, excluindo peso próprio, com veículos atuando nas duas faixas



e às cargas permanentes, para uma comparação entre os efeitos dos trens-tipo das normas com os dos veículos reais. Verifica-se que o veículo RT-74/20 é o que provoca as maiores solicitações, chegando a ultrapassar as solicitações oriundas do TB450 a partir dos 40,0 m de vão.

Os ônibus, representados pelo direcional duplo trucado, e os veículos leves, representados pela Van, apresentam solicitações sempre muito inferiores até mesmo às apresentadas pelo TB240-I.

Na Figura 5.4, são apresentados os momentos fletores máximos para pontes simplesmente apoiadas com vãos de 6,0 m a 40,0 m relativos aos trens-tipo previstos nas normas - TB240-I e II, TB360, TB450, aos veículos rodotrens RT-74/20 e RT-74/25, treminhão BT-74/25, trucado semi-reboque BB-48/14, ônibus direcional duplo trucado ONIB-DD-TRUC e à Van, atuando simultaneamente nas duas faixas de rolamento.

Observa-se que os esforços oriundos do veículo RT-74/20 ultrapassam os valores do TB450 para pontes com vão superior a 20,0 m, ultrapassam os valores do TB360 para pontes com vão superior a 15,0 m e ultrapassam os valores do TB240 para pontes com vão superior a 10,0 m.

Embora o conhecimento dos esforços nominais sirva para uma comparação dos mesmos, importam para as verificações os valores nominais afetados pelos respectivos coeficientes de impacto.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam os esforços correspondentes para as situações em que os veículos atuam em faixa simples e em faixa dupla, respectivamente. Observa-se que os esforços oriundos do veículo RT-74/20 atuando em faixa simples são compatíveis com os previstos para o TB450, mas considerando o veículo

Figura 5.5 – Comparação dos efeitos dos carregamentos, excluindo carga permanente, com os respectivos coeficientes de impacto. Veículos atuando em faixa simples



Figura 5.6 – Comparação dos efeitos dos carregamentos, excluindo carga permanente, com os respectivos coeficientes de impacto. Veículos atuando em duas faixas

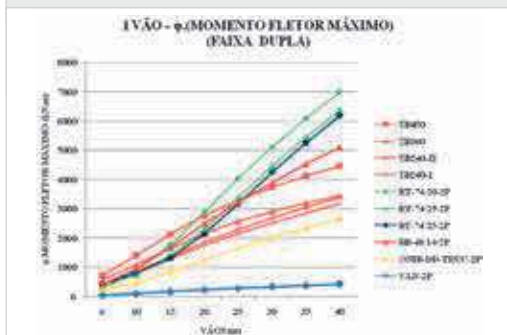


Figura 5.7 – Diferença entre momento máximo provocado pelo RT-74/20 e os padrões das normas, considerados os respectivos coeficientes de impacto

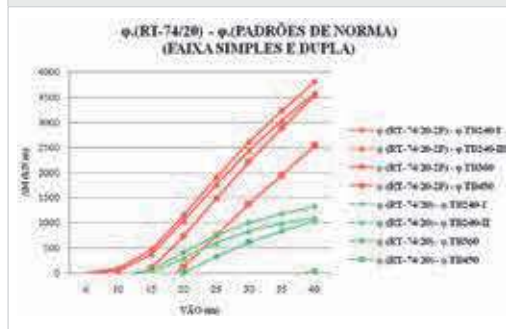
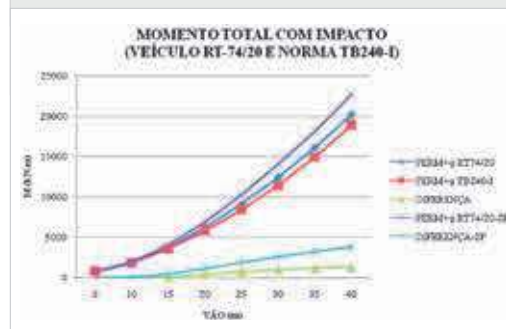


Figura 5.8 – Comparação entre momento máximo provocado pelo RT-74/20 e o padrão TB240-I, considerando o coeficiente de impacto



atuando simultaneamente nas duas faixas, esses valores superam os correspondentes ao TB450 para pontes com vão superior a 20,0 m, superam os correspondentes ao TB360 para pontes com vão superior a 15,0 m e superam os correspondentes ao TB240-I para pontes com vão superior a 10,0 m.

A Figura 5.7 apresenta as diferenças entre os valores dos esforços oriundos do veículo RT-74/20 e os oriundos

dos padrões de norma TB450, TB360, TB240-I e TB240-II, afetados pelos respectivos coeficientes de impacto, para as situações em que os veículos atuam em faixa simples e em faixa dupla.

A Figura 5.8 ressalta as diferenças entre os valores dos esforços oriundos do veículo RT-74/20 e os oriundos do TB240-I, afetados pelos respectivos coeficientes de impacto, para as situações em que os veículos atuam em faixa simples e em faixa dupla.

Para uma ponte com vão de 20,0 m, o momento fletor máximo oriundo do padrão de norma TB240-I, afetado pelo coeficiente de impacto mais o carregamento permanente é de 5.756,0 kN.m, enquanto para o veículo RT-74/20, afetado pelo coeficiente de impacto mais o carregamento permanente, é de 6.166,0 kN.m e de 6.903,0 kN.m em faixa simples e faixa dupla, respectivamente.

Embora as diferenças entre os momentos fletores provocados pelo TB-74/20 e o TB240-I sejam significativas, quando considerado o efeito global dos carregamentos essas diferenças assumem uma importância menor do que se poderia esperar.

Considerando para a ponte da Figura 4.1, com 20,0 m de vão, $b_w = 40$ cm, $b_f = 440$ cm (segundo o item 14.6.2.2 da NBR6118), $h = 200$ cm, $h_f = 25$ cm e o TB-240-I, as áreas de aço calculadas encontram-se na Tabela 5.1, para um concreto com $f_{ck} = 18,0$ MPa e aços CA-25 ($d' = 15$ cm) e CA-50 ($d' = 8,5$ cm).

A Figura 5.9 apresenta a variação da área de aço necessária nas três situações de carregamento em função da largura da mesa de compressão, considerados no dimensionamento os aços CA-25 e CA-50. Observa-se pouca variação na área de aço calculada para larguras de mesa comprimida superiores a 2,0 m, o que indica pouca sensibilidade a danos no tabuleiro quando estes ocorrem a mais de 1,0 m afastado do eixo da longarina.

Tabela 5.1 – Área da armadura longitudinal – Seção T – Aços CA-25 e CA-50

	M (kN.m)	CA-25 A_s (cm ²)	CA-50 A_s (cm ²)
PERM+ ϕ .TB240-I	5.756,0	205,5 (42 Φ 25)	99,1 (21 Φ 25)
PERM+ ϕ .RT-74/20	6.166,0	220,6 (45 Φ 25)	106,3 (22 Φ 25)
PERM+ ϕ .RT-74/20-2P	6.903,0	247,8 (51 Φ 25)	119,4 (25 Φ 25)

Figura 5.9 – Variação da área de aço calculada com a largura da mesa comprimida



6. CONCLUSÕES

Os trens-tipo TB240-I e TB240-II, embora aparentemente tenham carga total muito inferior aos trens-tipo TB360 e TB450, consideravam um compressor com carga total de 240 kN e caminhões com 90,0 kN e 120,0 kN, respectivamente, totalizando 330,0 kN e 360,0 kN ou mais, dependendo do caso. Além disso, para vãos superiores a 14,0 m, o coeficiente de impacto constante e igual a 1,3, para os trens-tipo TB240-I e TB240-II, supera em até 16% os coeficientes de impacto adotados para o TB360 e TB450 (vão de 40,0 m).

Para vãos superiores a 20,0 m, os esforços solicitantes provocados pelo carregamento permanente superam os esforços provocados pelos diversos trens-tipos e por todos os veículos reais, considerando faixa simples, chegando a atingir quatro vezes a intensidade dos esforços pelo carregamento móvel mais desfavorável.

Considerando as cargas móveis em faixa simples

e os coeficientes de impacto, o mais desfavorável dos veículos reais (RT-74/20) provoca esforços solicitantes inferiores àqueles previstos pelos trens-tipo TB240-I, TB240-II, TB360 e TB450 para vãos inferiores a 15,0 m. Para vãos entre 15,0 m e 20,0 m, os esforços solicitantes provocados pelo veículo RT-74/20 são inferiores aos previstos pelo TB360 e TB450. Para vãos entre 20,0 m e 35,0 m os esforços solicitantes provocados pelo veículo RT-74/20 são inferiores aos previstos pelo TB450. Para vãos superiores a 35,0 m, os esforços solicitantes provocados pelo veículo RT-74/20 são superiores aos previstos pelo TB450 vigente.

Considerando as cargas móveis em faixa dupla e os coeficientes de impacto, o mais desfavorável dos veículos reais (RT-74/20) provoca esforços solicitantes inferiores àqueles previstos pelos trens-tipo TB240-I, TB240-II, TB360 e TB450 para vãos inferiores a 10,0 m. Para vãos entre 10,0 m e 15,0 m, os esforços solicitantes provocados pelo veículo RT-74/20 são inferiores aos previstos pelo TB360 e TB450. Para vãos entre 15,0 m e 20,0 m, os esforços solicitantes provocados pelo veículo real RT-74/20 são inferiores aos previstos pelo TB450. Para vãos superiores a 20,0 m, os esforços solicitantes provocados pelo veículo RT-74/20 são superiores aos previstos pelo TB450 vigente.

No cálculo da armadura necessária, a contribuição da largura da mesa comprimida só é significativa para largura total inferior a 10% do vão. Eventuais danos no tabuleiro distantes do eixo da longarina mais de 5% do seu vão não repercutem na área de aço necessária.

Referências Bibliográficas

- [01] MENDES, P. T. C. Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- [02] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB 6: Carga Móvel em Pontes Rodoviárias. Rio de Janeiro: ABNT, 1946 – 1960 – 1982.
- [03] CENTRO DE EXCELÊNCIA EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES – CENTRAN. Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem – PDNEP. Volume II. Pesquisa de Tráfego. Junho/2006.
- [04] ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – USP. Análise das Consequências do Tráfego de CVCs (Combinações de Veículos de Carga) sobre as Obras de Arte Especiais da Rede Vária do DER – SP. Relatório Técnico. Junho, 2001.
- [05] PENNER, E. Avaliação de Desempenho de Sistemas Estruturais de Pontes de Concreto. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. ●