

Análise comparativa entre comboios e o carregamento normativo da NBR 7188/2013 em tabuleiros de pontes rodoviárias de concreto

**Marcos Vinicio de Camargo¹, Lucas Augusto Milani Lopes²,
Lucas Dezotti Tolentino³**

¹Centro Universitário Filadélfia de Londrina/Docente/Especialista/marcos.camargo@unifil.br

²Centro Universitário Filadélfia de Londrina/Docente/Mestre/lucas.milani@unifil.br

³Centro Universitário Filadélfia de Londrina/ Discente/lucas.dezotti@gmail.com

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise comparativa entre os esforços em lajes de concreto armado de tabuleiros de pontes, provenientes da travessia de comboios, considerados a partir de modelos de cargas similares aos dos veículos reais que transitam nas estradas em relação ao trem tipo TB45 presente na NBR 7188/2013. Para tanto, foram delimitados quatro modelos de cargas móveis, obtidos através de uma base de dados rodoviários, que representam a maior incidência de circulação. Os comboios analisados tiveram os seus veículos tipo espaçados de 1 a 5 metros entre si, em duas pontes rodoviárias possíveis, de extensões de 40 e 50 metros. Os modelos estruturais de obras de arte rodoviárias foram simulados com base no método dos elementos finitos, através do software de análise estrutural CsiBridge 2017® v. 19.1.0. O carregamento sobre as pontes é constituído por sucessões de veículos deslocando-se com velocidade constante, equivalente a 40 km/h. As análises foram pautadas em prescrições contidas na normatização brasileira, sendo desprezado o coeficiente de impacto vertical e o coeficiente de impacto adicional na majoração das cargas dos modelos de veículos reais, isso é justificado devido à configuração dos veículos idealizados nos comboios simularem uma condição próxima a um engarrafamento, ao longo de todo o tabuleiro. Os resultados versam sobre a influência do espaçamento e do número de veículos, referentes a situações distintas de carregamento, no que tange a comparação de momentos fletores nas lajes com o TB45. Conclui-se que as solicitações devidas ao tráfego de modelos de veículos reais podem ser maiores que aquelas pertinentes a um veículo-tipo da norma brasileira, e a distribuição das cargas e seus respectivos valores são fatores determinantes para o cálculo dos esforços.

Palavras-chave

Comboios; NBR 7188/2013; pontes rodoviárias; cargas especiais; modelagem computacional.

Introdução

Assim como em outros países, o desenvolvimento do trânsito em rodovias no Brasil tem se caracterizado por uma multiplicidade de configurações de tipos de veículos, bem como o acréscimo de seu peso bruto e seu volume de tráfego.

Com o aumento do volume de transporte de cargas pesadas, ocorre a necessidade da verificação da capacidade portante da estrutura, assim como o conhecimento do comportamento da mesma sob solicitação de mais de um veículo realizando a passagem sobre o tabuleiro.

A análise conforme a NBR 7188/2013 considera o efeito da passagem de apenas um veículo tipo sobre a estrutura. Também, faz-se uso de carregamentos de multidão e coeficientes de majoração, obtidos em função do comprimento do vão a ser vencido pelo tabuleiro e inter-eixo das longarinas, o número de faixas e o material usado na estrutura da ponte.

A passagem simultânea de mais de um veículo na estrutura pode ser entendida como um cenário de comboio. A Resolução 01/2016 publicada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), define comboio como “o grupo constituído de 02 ou mais combinações de veículos transportadores, independentes, realizando transporte simultâneo e no mesmo sentido, separados por uma distância de até 150 metros”.

Assim, o presente artigo visa empregar modelos matemáticos computacionais, afim de obter esforços internos nas lajes do tabuleiro de uma ponte, quando a mesma é submetida a passagem simultânea de veículos.

Modelo estrutural de ponte rodoviária

O modelo estrutural adotado representa uma ponte rodoviária com seção típica do Departamento de Estradas de Rodagem (DER). A figura 01 apresenta a seção transversal da ponte a ser analisada, com 12,80 metros de largura, traçado retilíneo, composta por seis vigas longarinas de seção I, com uma distância de 2,42 metros entre eixos.

A área de tráfego é formada pela pista de rolamento, com duas faixas de tráfego de veículos, delimitadas com sentidos opostos de largura 3,50 metros cada, e acostamento em ambos os lados com 2,50 metros de largura. Para proteção são empregadas barreiras new jersey em concreto armado moldadas “in loco”.

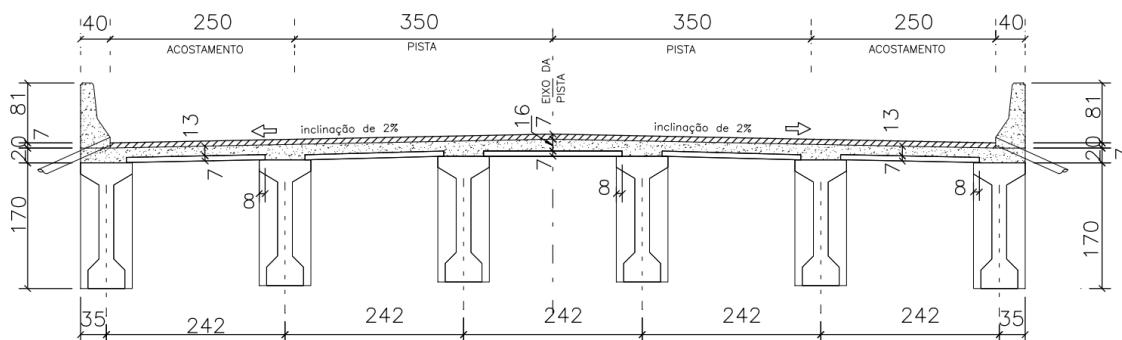


Figura 1 – Seção transversal da ponte

Para a modelagem da estrutura foi empregado o software comercial de análise estrutural CsiBridge 2017® v. 19.1.0. A ponte foi idealizada com elementos de área e barras, com todo modelo utilizando concreto fck 40 como material.

A discretização dos componentes é pré configurada pelo software, resultando em 204 elementos de área, 102 elementos de barra e 366 nós para a estrutura de 50 metros, e 168 elementos de área, 84 elementos de barra e 309 nós considerando o comprimento de 40 metros.

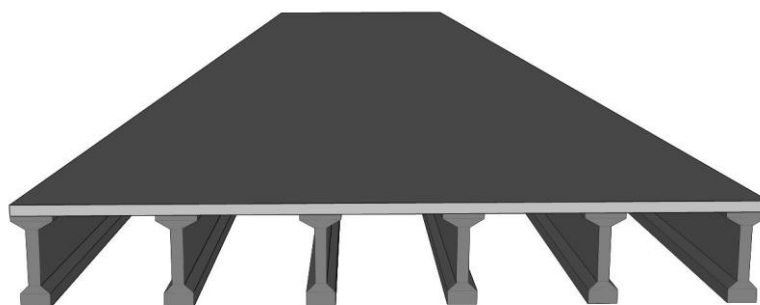


Figura 2 – Vista do modelo no software

Caracterização do carregamento de acordo com a NBR 7188/2013

Os carregamentos permanentes são calculados automaticamente pelo software, acrescentando as barreiras laterais, obtido multiplicando a área de 0,23 m² pelo peso específico do concreto $\gamma_c = 2,50 \text{ tf.m}^3$, dividindo o valor pela base de 0,40 m, resultando no carregamento distribuído na área de contato de 1,45 tf/m². Para a camada asfáltica o valor foi encontrado multiplicando o peso específico do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) $\gamma_a = 2,40 \text{ tf.m}^3$, pela espessura da camada de 0,07 m, assim obtendo a carga de 0,17 tf/m². O carregamento de multidão foi aplicado em todo o tabuleiro.

A carga de multidão e os carregamentos móveis foram majorados pelos coeficientes de ponderação para cargas verticais presentes na normatização, ou seja, o coeficiente de impacto vertical (CIV), coeficiente do número de faixas (CNF) e coeficientes de impacto adicional (CIA), considerando duas situações de vãos em estudos.

Tabela 1 – Coeficientes de ponderação

Comprimento da ponte (m)	Número de faixas	CIV	CNF	CIA
50,00	2,00	1,21	1,00	1,25
40,00	2,00	1,24	1,00	1,25

A figura 3 representa a classificação de eixo nos veículos.

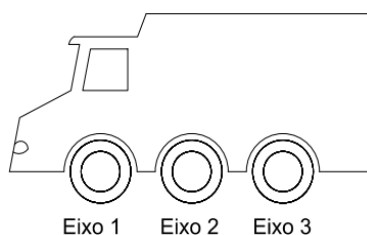


Figura 3 – Esquema representativo dos eixos

Tabela 2 – Cargas por eixo e multidão para o TB-45

Veículos	Quantidade de eixos	Comprimento do vão (m)	Eixo 1 (tf)	Eixo 2 (tf)	Eixo 3 (tf)	Carga de multidão (tf/m ²)
TB-45	3,00	50,00	22,73	22,73	22,73	0,78
TB-45	3,00	40,00	23,18	23,18	23,18	0,77

Caracterização do carregamento devido à comboios

Os referentes veículos adotados neste estudo foram selecionados com base nos trabalhos de Rossigali (2013) e Luchi (2006). A base de dados desenvolvida pelos autores agrupa diversas informações que contemplam características dos veículos pesados que transitam nas rodovias, coletadas em postos de pesagem. Sendo delimitado a análise aos modelos que apresentam maior incidência de circulação nas vias, retratados nas figuras abaixo.

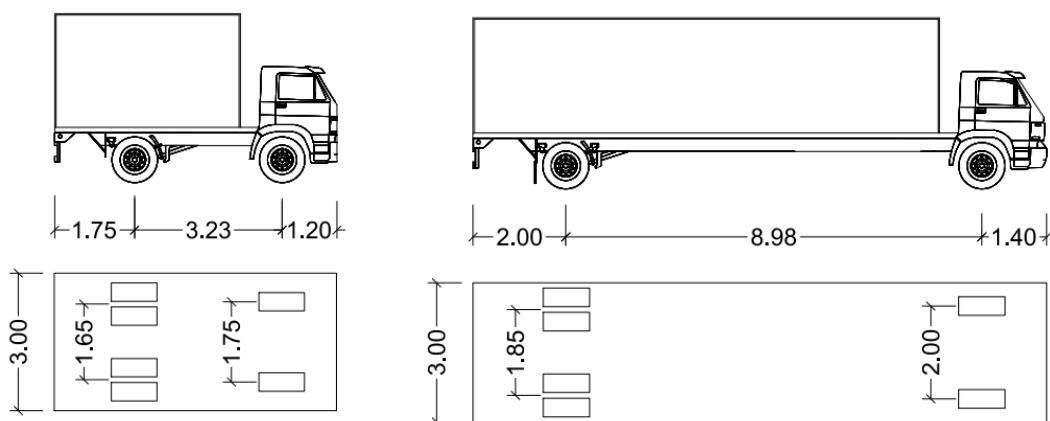


Figura 4 – Modelo de veículo 2CC e 2C

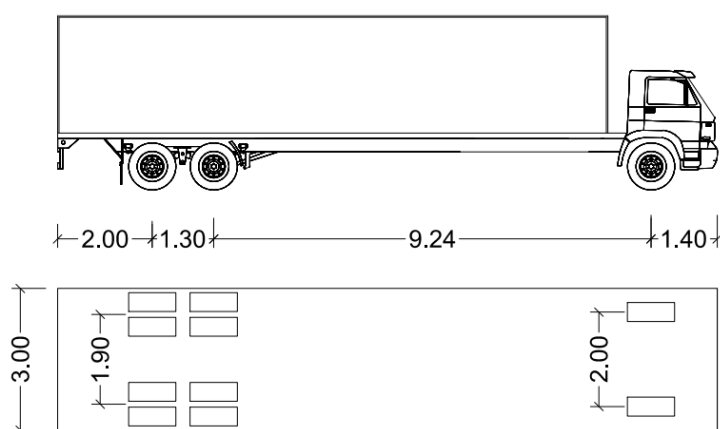


Figura 5 – Modelo de veículo 3C

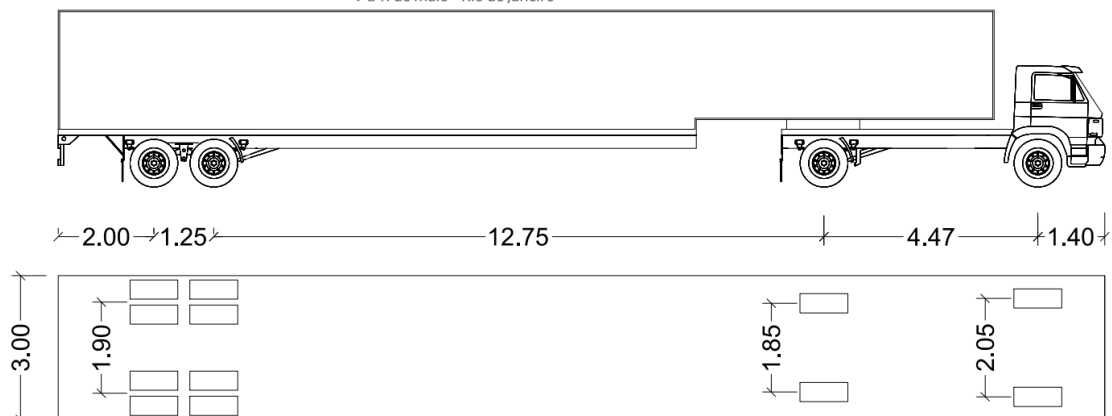


Figura 6 – Modelo de veículo 2S2

As cargas dos eixos, em cada classe, devem ser consideradas como variáveis aleatórias, pois suas magnitudes dispõem de grande amplitude de valores em relação ao peso total. Sendo os valores das cargas máximas adotadas, por eixo, obtidos considerando tanto os limites técnicos de carga por eixo dos fabricantes, quanto os valores máximos encontrados em medições nos postos de pesagem (ROSSIGALI, 2013).

Tabela 3 – Cargas por eixo

Veículos	Quantidade de eixo	Eixo 1 (tf)	Eixo 2 (tf)	Eixo 3 (tf)	Eixo 4 (tf)
2C	2,00	10,75	14,84		
2CC	2,00	8,11	11,19		
3C	3,00	11,93	16,13	16,13	
2S2	4,00	12,67	17,63	12,40	12,40

A quantidade de veículos presentes no tabuleiro da ponte está relacionada ao comprimento do vão, o espaçamento entre os modelos e das características da classe em estudo.

Para comportar o maior número de veículos no tabuleiro da ponte, as distâncias entre os modelos foram estabelecidas em 1,00 m, 2,00 m, 3,00 m, 4,00 m e 5,00 m. Exemplificando a estruturação dos comboios foi utilizado um modelo de carro 2CC, conforme a figura 7.

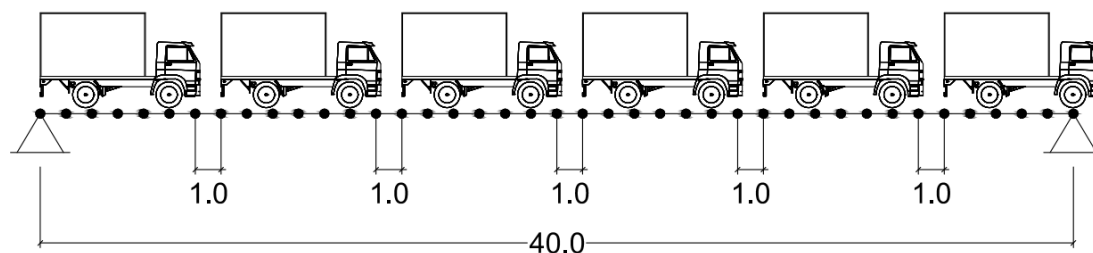


Figura 7 – Composição de comboios considerando o espaçamento de 1,00 m para o tabuleiro de 40,00 m.

O procedimento descrito na figura 7 foi implementado para as demais classes de veículos abordados pelo estudo. São empregados comboios distintos, variando a classe dos modelos. Conseqüentemente, conforme o comprimento do carro a quantidade de veículos sobre o tabuleiro é variável.

A metodologia das análises foi baseada na normatização brasileira vigente, a NBR 7188/2013. Restringindo a velocidades dos veículos a 40,00 km/h, devido a distância entre os modelos que assemelha a um engarrafamento, onde transitaram somente pelas faixas de tráfego presentes no projeto.

Análise e discussão dos resultados

Os resultados são exibidos em formas de tabelas, sendo verificados os momentos fletores ocasionados em duas direções nas lajes, a direção do momento fletor transversal (M_{11}) e momento fletor longitudinal (M_{22}). A convenção dos momentos fletores está ilustrado na figura abaixo.

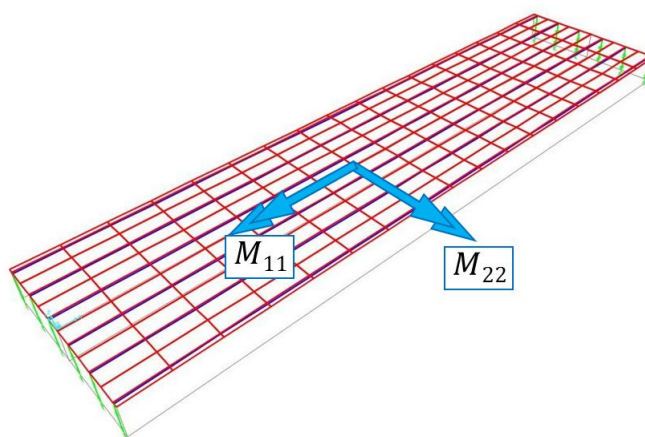


Figura 8 – Convenção de momentos fletores na laje

Inicialmente são retratados os resultados obtidos das análises para o vão de 40,00 metros. Abordando os maiores valores encontrados para as combinações de carregamentos atuantes no tabuleiro conjunto com a ação dos veículos.

Tabela 4 – Comparação entre momentos fletores para o vão de 40 metros

Modelo	Quantidade de veículos	M11		M22	
		M neg (tf.m/m)	M pos (tf.m/m)	M neg (tf.m/m)	M pos (tf.m/m)
TB-45	1,00	-14,78	7,85	-12,25	5,85
2C	3,00	-11,21	6,44	-9,94	4,28
2CC	6,00	-10,73	6,36	-7,35	-
2CC	5,00	-	-	-	4,97
3C	3,00	-13,03	-	-12,89	5,46
3C	2,00	-	7,53	-	-
2S2	2,00	-12,77	7,11	-8,82	4,90

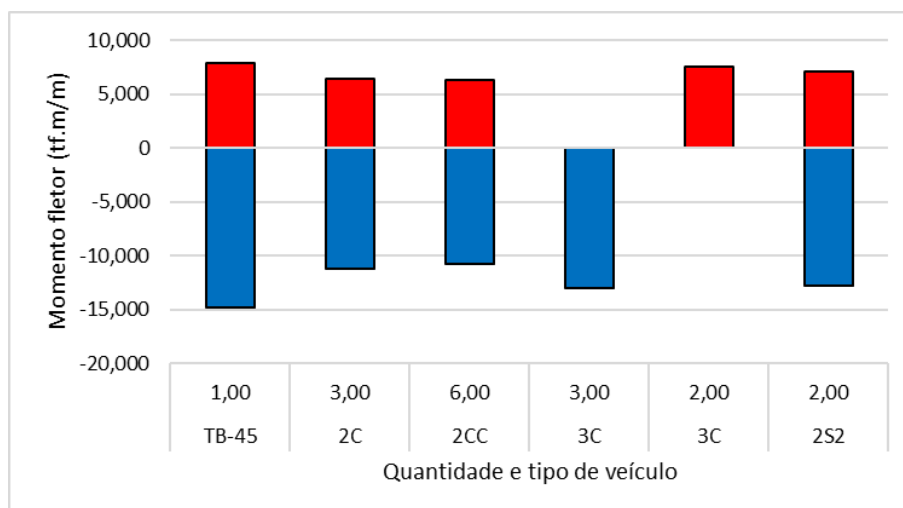


Figura 9 – Comparação entre momentos fletores na direção M11

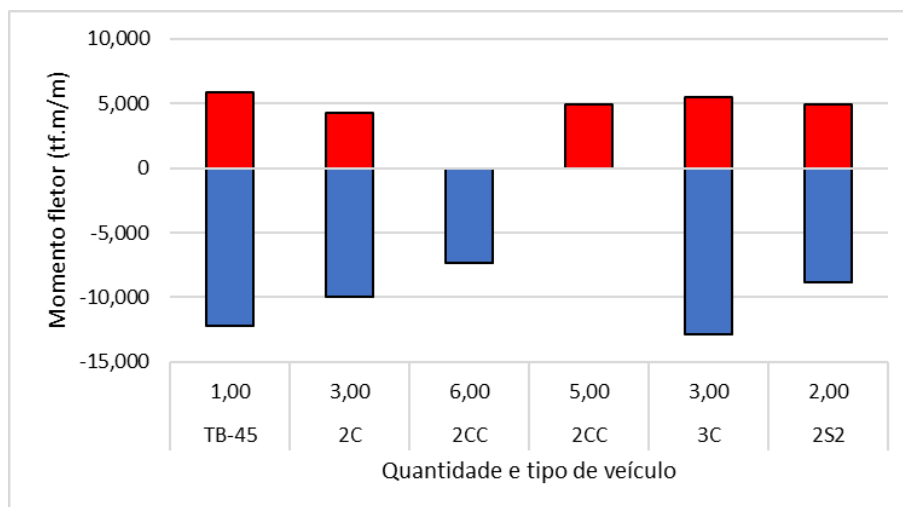


Figura 10 – Comparação entre momentos fletores na direção M22

Decorrente do comprimento do tabuleiro e do modelo 2S2, a análise ficou restrita somente ao espaçamento de 1,00 metro entre os veículos, uma vez que acima de tal valor os carros encontram-se parte fora do tabuleiro da ponte.

Observando a tabela 4 os maiores valores de esforços na direção M11 são encontrados no modelo 3C, com a passagem simultânea de 3,00 veículos no caso do momento fletor negativo e 2,00 veículos para o momento fletor positivo. Na direção M22 os maiores esforços são registrados para o modelo 3C durante a transição de 3,00 veículos sobre a estrutura. Dentre tais grandezas, apenas o momento negativo na direção M22 superam os valores encontrados para o TB-45.

Os resultados para o comprimento de vão de 50,00 metros, de modo semelhante mostram os maiores valores obtidos para as combinações de carregamentos atuantes no tabuleiro conjunto com a ação dos veículos.

Tabela 5 – Comparação entre momentos fletores para o vão de 50 metros

Modelo	Quantidade de veículos	M11		M22	
		M neg (tf.m/m)	M pos (tf.m/m)	M neg (tf.m/m)	M pos (tf.m/m)
TB-45	1,00	-15,80	9,67	-11,39	6,66
2C	3,00	-12,29	8,27	-11,11	5,37
2CC	6,00	-11,47	-	-9,63	6,10
2CC	7,00	-	8,30	-	-
3C	3,00	-15,17	9,44	-14,71	6,75
2S2	2,00	-13,97	8,92	-9,87	6,15

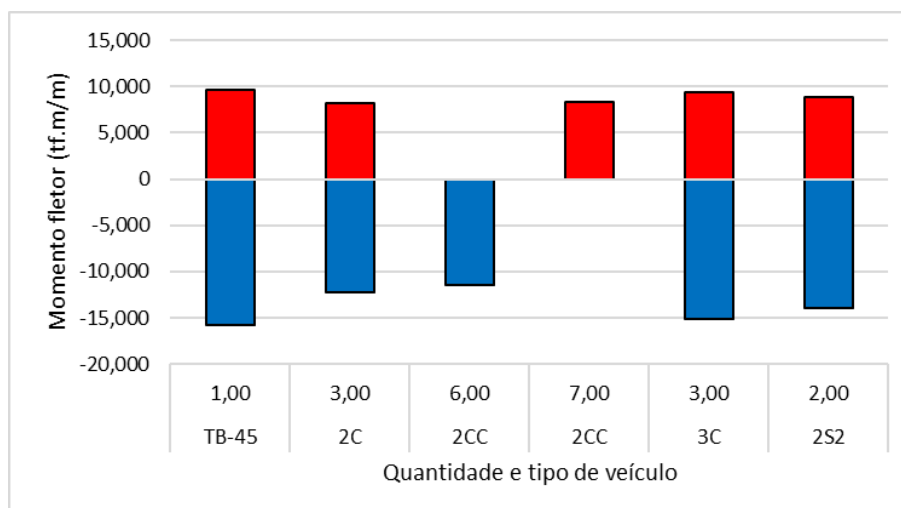


Figura 11 – Comparação entre momentos fletores na direção M11

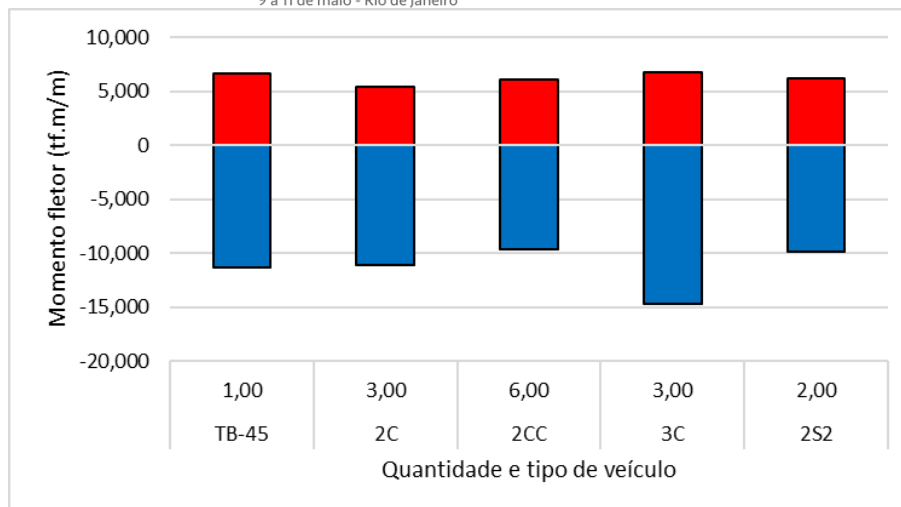


Figura 12 – Comparação entre momentos fletores na direção M22

Analisando a tabela 5 os maiores valores de momento fletores nas direções M11 e M22 são observados para o modelo 3C, tanto os esforços positivos quanto os negativos, considerando a passagem simultânea de 3,00 veículos sobre a estrutura. Tais valores no caso da direção M22 superam os esforços encontrados para o trem tipo normativo.

Com relação aos resultados obtidos inicialmente para a ponte de 40,00 metros de comprimento, a condição de carregamento crítico que provoca maior momento fletor na direção M11 foi registrada para o TB45, verificando a diferença de 4,16% para o momento fletor positivo comparado ao 3C. Para o momento fletor negativo o intervalo observado foi de 13,42% maior em relação ao valor encontrado para o 3C. Na direção M22 o maior momento fletor positivo é atribuído ao TB45, sendo 6,97% superior ao segundo maior valor registrado, no caso dos momentos fletores negativos a maior solicitação é provocada pelo modelo 3C, superior 5,28% ao esforço obtido pelo TB45.

Para o tabuleiro de 50 metros, os maiores valores de momento fletor na direção M11 são obtidos para o TB45, onde é superior 2,43% comparado ao modelo 3C para o momento fletor positivo e 4,14% considerando o momento fletor negativo. Para a direção M22 as maiores grandezas foram observadas para o modelo 3C, sendo superior 1,23% ao esforço gerado pelo TB45 no caso de momento fletor positivo, para o momento fletor negativo a maior solicitação encontrada supera em 29,16% o esforço ocasionado pelo TB45.

Conclusões

A análise comparativa entre os esforços solicitantes provocados pelos comboios de veículos e trem tipo normativo, revela que a diferença entre os valores encontrados para o momento fletor em relação ao trem tipo TB45 na maioria dos casos foram abaixo de 10,00%. Cabe ressaltar que o modelo de veículo 3C em condição de comboio é classificado como condição de carregamento crítico, pois causa esforços próximos ao TB45 e em determinadas situações maiores.

A pequena diferença de resultados na maior parte dos casos pode ser atribuída principalmente pela da adoção de coeficientes de majoração de cargas presentes na normatização brasileira. Outro fator a ser levado em consideração é a não utilização do coeficiente de impacto vertical e o coeficiente de impacto adicional para a condição de comboio.

A normatização brasileira segue uma trajetória conservadora mostrando resultados relevantes quando comparado aos demais modelos de veículos analisados no trabalho.

Assim, pode-se concluir que a maior quantidade de veículos sobre a ponte não indica a situação mais crítica para o cálculo dos esforços. A condição de comboio pode ocasionar solicitações maiores que aquelas pertinentes a um veículo-tipo da norma brasileira dependendo da distribuição das cargas e seus respectivos valores. O maior momento fletor tanto positivo quanto negativo gerado pelo tráfego simulado foi ocasionado pela presença simultânea de 3 caminhões do modelo 3C.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.
- BRASIL. Resolução n. 01, de 14 de jan. de 2016. Cargas Indivisíveis. Brasília, p. 01-32, jan. 2016. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/sistema-de-gerenciamiento-de-autorizacao-especial-de-transito-siaet/RESOLUO012016DNITCargasIndivisveis.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2017.
- CSiBRIDGE v19.1.0 – Integrated 3-d Bridge Analysis, Design and Rating – Advanced Version 19.1.0 – Computers and Structures, Inc.
- LUCHI, Lorenzo Augusto Ruschi e. Reavaliação do trem-tipo à luz de cargas reais nas rodovias brasileiras. 2006. 257 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- ROSSIGALI, Carlos Eduardo. Atualização do modelo de cargas móveis para pontes rodoviárias de pequenos vãos no Brasil. 2013. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.