



A: XXXIX-0000

ESTUDO DE PONTES DE CONCRETO ARMADO COM RELAÇÃO À APLICAÇÃO DE CARGAS MÓVEIS EXTRAPOLADAS

STUDY OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES WITH RESPECT TO THE APPLICATION OF EXTRAPOLATED TRAFFIC LOADS

Fernando M. Oliveira (A) (1); Francisco Evangelista Júnior (2)

(1) Mestrando na Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Brasília, Brasil.

Endereço para correspondência: merlim.fmo@gmail.com; (A) Apresentador

Área temática: Segurança, Funcionalidade e Confiabilidade Estrutural.

Resumo

O presente trabalho propõe realizar uma análise do trem-tipo normativo utilizado nas pontes brasileiras. A metodologia é aplicada no estudo da carga móvel normativa e nos veículos catalogados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), sendo para tais, abordados seus respectivos pesos extrapolados para um período de retorno de 50 anos fazendo-se uso do Método de Nowak (1999). São efetuadas análises em pontes de vãos de 20, 30 e 40 metros, sendo estudados os máximos momentos fletores. Os resultados nos trazem um indicativo para a inadequação do trem-tipo normativo nacional em face do tráfego extrapolado, com base nos momentos fletores últimos gerados. Dessa forma, estimula-se melhores práticas de fiscalização quanto ao peso dos veículos em nossas rodovias e necessidade de adequações das normas nacionais referentes às cargas móveis e/ou obras de artes especiais.

Palavras-chave: trem-tipo, projeto, pontes, estado limite último.

Abstract

The present work proposes to perform an analysis of the normative traffic load used in Brazilian bridges. The methodology is applied to the study of the traffic load of Brazilian code and to the vehicles catalogued by National Department of Transportation Infrastructure (DNIT), and for such, their respective extrapolated weights for a return period of 50 years are addressed by making use of the Method of Nowak (1999). Bridges from 20, 30 and 40 m spans are investigated, studying the maximum bending moment. The results bring us an indication of the inadequacy of the traffic load code in face of the extrapolated traffic, based on the generated ultimate bending moments. Thus, it encourages best inspections practices regarding the weight of the vehicles on our highways and the need for adaptation of the national code referring to traffic loads and/or bridges.

Keywords: traffic load, design, bridges, ultimate limit state.



1. INTRODUÇÃO

As pontes são estruturas que têm a finalidade de possibilitar a travessia de cursos d'água, tais como rios e riachos, ou ainda transpassar variedades de relevos, tais como vales. De acordo com a ABNT NBR 7188 (2013), as pontes são estruturas sujeitas à ação de cargas em movimento, com posicionamento variável, denominadas cargas móveis, utilizadas para transpor obstáculos.

Os projetos estruturais demandam normas atualizadas e capazes de refletir a realidade, uma vez que as cargas móveis normativas acabam se tornando defasadas diante das mudanças de peso e volume do tráfego nas rodovias nacionais, somando-se a isso ainda, a expectativa natural de aumento de carga desses trem-tipo.

O tráfego, consistindo de veículos e pedestres, origina forças com efeito estático e dinâmico, nos quais as normas vigentes ao longo mundo tentam representar tais carregamentos por meio de modelos. Tanto na norma brasileira, quanto em internacionais, as cargas móveis referentes aos veículos e/ou pedestres são consideradas através de trens-tipo idealizados, que não refletem necessariamente a realidade, seja em relação à carga por eixo, seja em relação à distribuição de eixos.

É perceptível que o Brasil tem apresentado uma evolução no transporte rodoviário e tal evolução tem provocado um aumento das cargas a serem transportadas, o que resulta por si só, em uma preocupação com relação a capacidade não só das pontes existentes como também das futuras obras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na presente seção serão abordados os tópicos fundamentais da pesquisa. Inicialmente, serão apresentadas as considerações normativas nacionais de dimensionamento de pontes, enfatizando o trem-tipo.

2.1 estados limites últimos

De acordo com a ABNT NBR 8681 (2003), estados limites são definidos como os estados a partir dos quais a estrutura apresenta desempenho inadequado às finalidades da construção. Ao se tratar de estado limite último (ELU), estes são definidos como estados que, determinam a perda de equilíbrio, ruptura, deformação plástica excessiva dos materiais ou instabilidade da estrutura, tornando-a inutilizável por razões de esgotamento da capacidade resistente ou riscos à segurança.

2.1.1 ações variáveis

Segundo a ABNT NBR 7187 (2021), as ações variáveis são ações de caráter transitório. Dentro do escopo deste trabalho será abordado apenas o efeito das ações verticais das cargas móveis (trens-tipo), dentre as ações variáveis.

De acordo com a ABNT NBR 7188 (2013), atualmente em vigência no Brasil, uma carga rodoviária padrão é definida de tal modo que ela assuma posição qualquer em toda a pista rodoviária com as rodas na posição mais desfavorável, inclusive acostamentos. O trem-tipo padrão normativo neste caso é o TB-450, definido como sendo um veículo tipo de 450 kN com seis rodas, sendo a carga estática concentrada P de cada roda, equivalente a 75 kN, posicionados em três eixos



de carga afastados entre si por 1,5m, ocupando uma área de 6x3m, e circundado por uma carga distribuída $p = 5 \text{ kN/m}^2$, conforme figura 1:

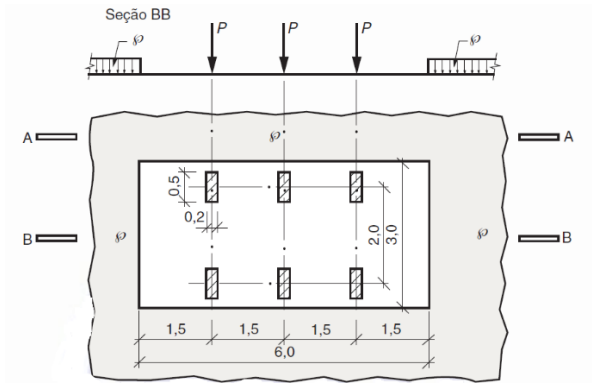


Figura 1. Veículo de projeto TB-450. Fonte: ABNT NBR 7188 (2013)

Além do veículo de projeto, a respectiva norma define os coeficientes de ponderação das cargas verticais móveis CIV (impacto vertical), CNF (número de faixas) e CIA (impacto adicional). O coeficiente de impacto é o produto dessas parcelas.

2.1.2 combinações

A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura, sendo que a verificação para o estado limite último deve ser realizada em função das combinações últimas.

Para obtenção dos esforços mais desfavoráveis no escopo deste trabalho, deve ser realizada a combinação última normal, dada pela equação 1, na qual estão incluídas as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas secundárias, com seus valores reduzidos de combinação, conforme ABNT NBR 8681 (2003).

$$F_d = \sum_{i=1}^n \gamma_{gi} F_{gik} + \gamma_q \left(F_{q1k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} F_{qjk} \right) \quad 1$$

2.2 veículos que trafegam nas rodovias do Brasil

Os veículos comerciais que trafegam no Brasil estão definidos dentro do Quadro de Fabricantes de Veículos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2012). Cada tipo de veículo tem uma composição diferente dos seus eixos, o que culmina em uma divisão dos veículos por classes. O DNIT sugere uma identificação representada por um código composto de até dois algarismos, intercalados por uma letra. O primeiro algarismo indica a quantidade de eixos da unidade tratora, enquanto o segundo algarismo, indica a quantidade de eixos das unidades rebocadas. Os principais códigos são descritos conforme o estabelecido:

- nSm : Cavalos mecânicos com n eixos transportando uma unidade rebocada do tipo semirreboque (S) de m eixos;



- nIm : a letra I indica que os m eixos estão espaçados de mais de 2,4 m, aumentando a carga possível;
- nCm : Caminhão plataforma com n eixos transportando um reboque acoplado com m eixos;
- nTm : Cavalo mecânico com n eixos transportando duas ou três unidades rebocadas do tipo semirreboque (T), que juntas totalizam m eixos. O total de eixos da composição é dado por $n+m$.

Neste trabalho serão utilizados veículos 2S2, cujo peso bruto total combinado (PBTC) é de 415 kN, 2S3-C e 2S3-L, cujos PBTC são de 450 kN, 3S3-C e 3S3-L, cujos PBTC são de 485 kN, 3T4, cujo PBTC é de 570 kN e 3T6, cujo PBTC é de 740 kN. A escolha desses veículos se deu dentre aqueles mais pesados e cuja legislação em vigor, a Resolução do CONTRAN nº 882, de 13 de dezembro de 2021, deixa a prerrogativa de dispensa de autorização especial de trânsito, a critério da autoridade competente.

2.3 extrapolação dos pesos brutos dos veículos

De acordo com Ferreira (2006), no caso de estado limite último é de fundamental interesse o máximo efeito do carregamento durante a vida útil da estrutura. Entretanto, como os dados da ação do tráfego de veículos é muitas vezes limitada, se faz necessário prever os máximos esforços para períodos mais longos.

Neste trabalho será destacado o método elaborado por Nowak (1999), cuja extrapolação é realizada através do traçado de uma linha seguindo a tendência pontos extremos da cauda superior da distribuição, sendo considerado para tal, que a legislação não sofrerá mudanças quanto aos limites de peso e a população de caminhões continuará a mesma. Trata-se de uma extrapolação pelo inverso do período de retorno.

A figura 2 mostra a extrapolação realizada por Nowak (1999) do esforço de momento fletor, para uma ponte com vão de aproximadamente 9 metros (30 ft), a partir da razão entre o momento fletor médio e o valor nominal de projeto referente ao trem-tipo americano, denominado HS-20:

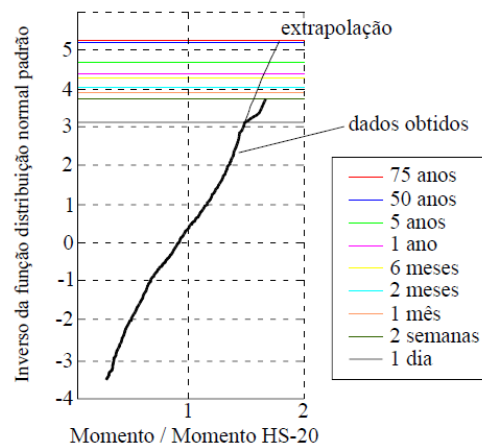


Figura 2. Extrapolação de momento fletor para ponte com vão de 9 metros (30 ft). Fonte: Ferreira (2006) apud Nowak (1999).



O peso bruto médio extrapolado para um determinado tempo T é dado pela interseção da linha de extrapolação com o valor de Z no período que se deseja, no qual Z é o inverso da função de distribuição normal padrão para o período desejado e o desvio padrão deste peso bruto extrapolado é a inclinação da reta de extrapolação obtida. Neste trabalho, será mostrado a extrapolação dos pesos brutos para depois se obter os esforços, considerando dados de pesagens oriundos de Moura (2019).

O peso por eixo extrapolado é determinado a partir do PBTC ponderado pela parcela do peso legal do respectivo eixo. Dessa forma o peso por eixo será dado pela equação 2:

$$P_{\text{eixo}} = \frac{\text{Peso legal por eixo}}{\sum \text{Peso legal por eixo}} \cdot \text{peso total extrapolado} \quad 2$$

3. METODOLOGIA

O procedimento a ser utilizado se baseia em comparações teóricas entre os máximos esforços solicitantes provenientes dos trens-tipo normativos (NBR 7188:2013) empregados no projeto estrutural de obras de artes especiais, com os máximos esforços gerados pelos trens-tipo fruto catalogados pelo DNIT com seus respectivos pesos máximos extrapolados para um período de retorno de 50 anos, levando-se em conta os coeficientes e parâmetros estabelecidos em norma.

As extrapolações dos pesos brutos dos caminhões serão obtidas fazendo-se uso do método de Nowak (1999), optando-se por geometrias de pontes simplesmente biapoiadas, tomando como parâmetro vãos de 20m, 30m e 40m, com a laje do tabuleiro integrada à quatro longarinas.

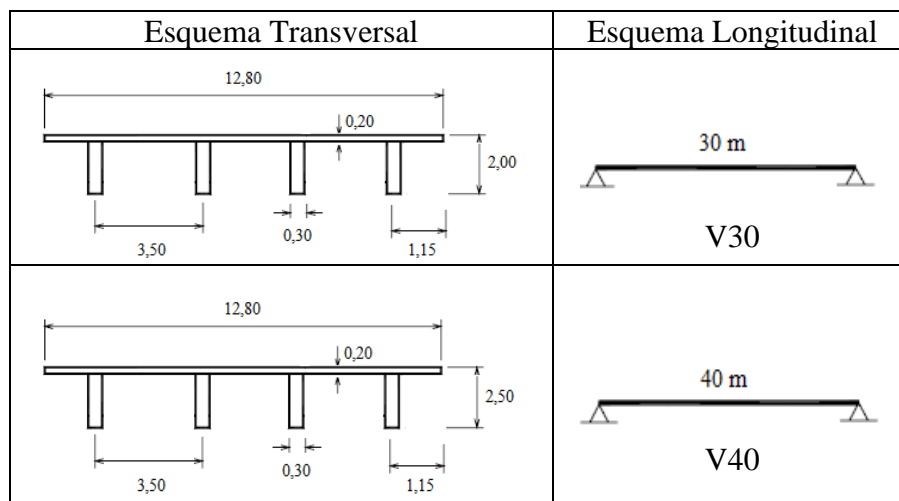
Foi utilizado, tanto para as vigas quanto para a laje, concreto com resistência característica à compressão (f_{ck}) igual a 30 MPa. Para o peso específico do concreto armado, será seguido aquele preconizado pela ABNT NBR 6118:2014, a qual determina que pode ser adotado o valor de 25 kN/m³.

Além da ação do peso-próprio da estrutura considera-se cargas de guarda-rodas nas extremidades da ponte de 5,8 kN/m, referentes a elementos de concreto com área transversal de 0,232 m² e carga de pavimentação de 1,2 kN/m² referentes à espessura de 5 cm, considerando-se o peso específico da faixa de rolamento como sendo de 24 kN/m³.

Ainda, o estudo realizado contempla apenas o efeito das ações verticais, usualmente empregado na análise de veículos especiais sobre as pontes, tomando como hipótese básica que as pontes não apresentam patologias que possam comprometer sua integridade estrutural.

Tabela 1. Geometrias adotadas.

Esquema Transversal	Esquema Longitudinal



As simulações estruturais são realizadas com auxílio do *software CSIBridge*, e os resultados são analisados no sentido de observar se o trem-tipo normativo vigente na norma brasileira, atende ao ELU quando comparados aos veículos com extrapolação dos pesos brutos, levando-se em conta o período de retorno de 50 anos.

Para a análise dos veículos é considerado o coeficiente de impacto e a carga de multidão, sempre circundando os trens-tipos, conforme previstos pela ABNT NBR 7188 (2013). Em outras palavras, os esforços são obtidos substituindo-se o veículo normativo pelos veículos catalogados pelo DNIT escolhidos. Todas as análises foram submetidas à carga de multidão, uma vez que ela é representativa da passagem de veículos mais leves.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os esforços obtidos da análise estrutural das obras de arte foram apresentados, de maneira geral, na forma de gráficos, tomando-se como referência para todos os casos analisados, a carga móvel da classe 45. Foram apresentados os respectivos valores relativos entre os esforços provenientes dos veículos catalogados pelo DNIT e a carga móvel normativa, além da comparação dos esforços considerando os coeficientes de ponderação para obtenção dos esforços no ELU, conforme equação 1.

A tabela 2, abaixo, mostra os parâmetros estatísticos obtidos e empregados para obtenção dos pesos extrapolados.

Tabela 2. Parâmetros obtidos na extrapolação dos PBTC. Fonte: Adaptado de Moura (2019)

Veículo	Reta de Extrapolação	Z (50 anos)	μ (kN)	σ (kN)
2S2	$Z=0,0085822x-0,3709664$	5,069	634,65	116,52
2S3-C	$Z=0,0079872x-1,9211597$	4,804	841,99	125,20
2S3-L	$Z=0,0183318x-10,139489$	4,998	825,75	54,55
3S3-C	$Z=0,012631x-4,2007849$	4,658	701,35	79,17
3S3-L	$Z=0,0054374x-0,5242377$	4,886	994,86	183,91
3T4	$Z=0,007018x-2,2421119$	4,885	1015,57	142,49
3T6	$Z=0,0831947x-61,912913$	4,540	798,66	12,02



Os esforços de momento fletor positivo máximo considerando os coeficientes de ponderação das ações e coeficiente de impacto, conforme ABNT NBR 7188 (2013), para as pontes simplesmente biapoiadas V20, V30 e V40 são apresentados abaixo para o período de retorno de 50 anos:

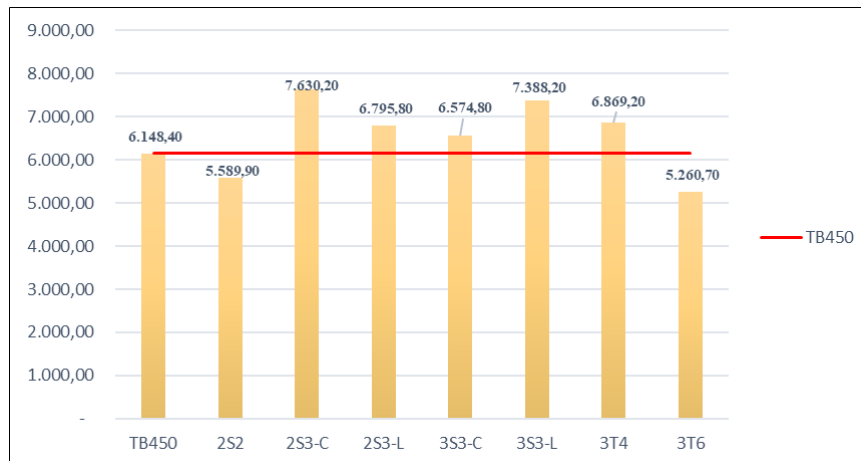


Figura 3. Esforços de Momento Fletor Positivo Máximos T=50 anos - V20

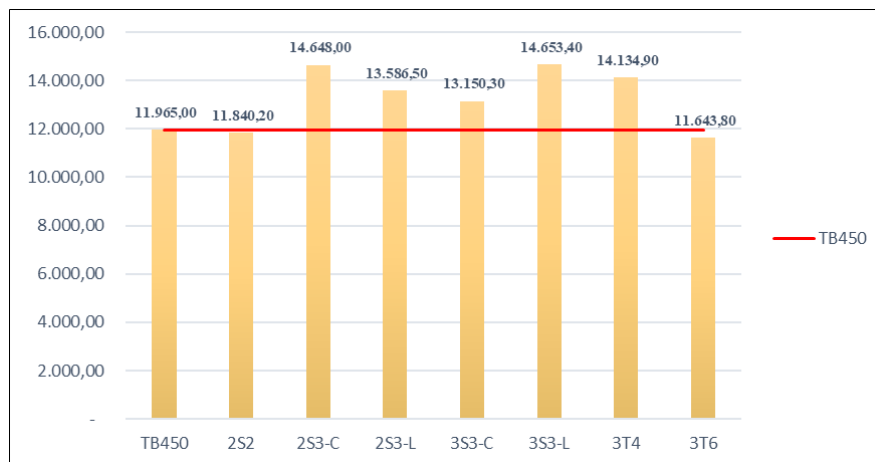


Figura 4. Esforços de Momento Fletor Positivo Máximos T=50 anos – V30

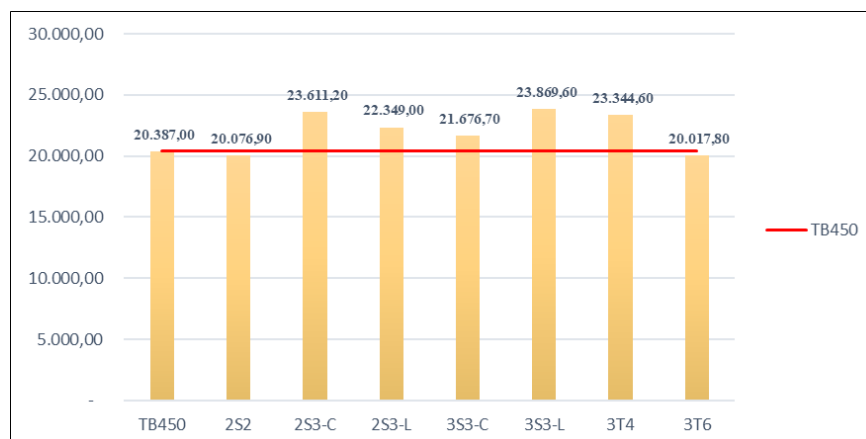


Figura 4. Esforços de Momento Fletor Positivo Máximos T=50 anos – V40



5. CONCLUSÕES

Da análise dos resultados, verifica-se que as pontes de classe 45, cujo trem-tipo normativo é o TB-450, tiveram os valores normativos superados de forma majoritária, quando comparados aos caminhões objeto de estudo, em todos os vãos e para o período de retorno analisado. As maiores solicitações encontrados foram para o vão de 20 m, no caso dos veículos 2S3-C e 3S3-L extrapolados, cujos esforços de momento fletor para ELU obtidos foram respectivamente 24,1% e 20,2% do valor de referência do TB-450. Constatou-se, ainda, que o momento fletor referente somente à carga móvel superou em até 38,9% o TB-450, caso este encontrado na ponte de 20 metros de vão, sob o carregamento do caminhão 2S3-C com seu respectivo peso extrapolado para o período de retorno de 50 anos.

Por fim, é importante frisar que a constante verificação de cargas móveis em pontes deveria ser realizada de maneira periódica com intuito de compreender a evolução do tráfego, que é frequente ao longo do tempo pela própria modernização dos veículos. Ademais, se faz necessária a fiscalização constante das rodovias por meio da pesagem de veículos para que possam subsidiar trabalhos como este, além de garantir a segurança estrutural das obras de arte especiais e pavimentos ao longo da malha rodoviária brasileira.

AGRADECIMENTOS

À toda equipe docente do Programa de Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, que contribuíram para a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6118 (2014). Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 7187 (2021). Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 7188 (2013). Carga móvel rodoviária e de pedestre em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 8681 (2003). Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro.
- DNIT. (2012). Quadro de Fabricantes de Veículos, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ.
- FERREIRA, L.M. (2006). Aplicação da Teoria da Confiabilidade na Obtenção de Limites para o Peso de Veículos de Cargas em Pontes de Concreto. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MOURA, M.W. (2019). Avaliação Da Confiabilidade de Longarinas de Concreto Protendido de Pontes Rodoviárias em Relação ao Estado Limite Último de Flexão. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
- NOWAK, A. S. (1999). Calibration of LRFD Bridge Design Code. Washington, Transportation Research Board.
- ROSSIGALI, C. E. (2013). Atualização do Modelo de Cargas Móveis para Pontes Rodoviárias de Pequenos Vãos no Brasil. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.