Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Vida útil à fadiga da armadura longitudinal de vigas de pontes de concreto armado frente ao tráfego real de veículos pesados

F. Jr. R. Mascarenhas[1]* . R. Chust Carvalho[1]
* Autor de Contato: fer.jr.resende@hotmail.com
DOI: http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.375

Recepção: 18/12/2018 | Aceitação: 15/07/2019 | Publicação: 30/08/2018

RESUMO

Este trabalho analisa a vida útil à fadiga da armadura longitudinal em vigas de pontes de concreto armado considerando-se o número real de veículos pesados de 2 a 6 eixos em um trecho rodoviário do estado de São Paulo, Brasil. Utilizou-se modelos teóricos com um sistema estrutural com pontes com duas vigas biapoiadas com vãos de 10, 15 e 20 metros. Para determinação dos esforços emprega-se o software Ftool e na estimativa da vida útil à fadiga o método do dano acumulado. Ao fim, verifica-se que o tempo de vida útil à fadiga da armadura longitudinal varia de acordo com o tamanho do vão, sendo que nas três pontes analisadas a vida de serviço à fadiga é inferior a 30 anos.

Palavras-chave: pontes; concreto armado; fadiga; vida útil; vigas.

Citar como: Mascarenhas, F. Jr. R., Chust Carvalho, R. (2019), "*Vida útil à fadiga da armadura longitudinal de vigas de pontes de concreto armado frente ao tráfego real de veículos pesados*", Revista ALCONPAT, 9 (3), pp. 303 – 319, DOI: http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.375

[1] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2020.

© 2019 ALCONPAT Internacional

Fatigue service life of longitudinal reinforcement bars of reinforced concrete beams based on the real heavy traffic

ABSTRACT

This paper analyzes the fatigue service life of longitudinal reinforcement in reinforced concrete bridge beams by considering the actual number of heavy vehicles from 2 to 6 axes in a railway in the state of São Paulo, Brazil. Theoretical models with a structural system composed by bridges with two simply supported beams and spans of 10, 15 and 20 meters are used. Ftool is used to determine the internal stretches, and the cumulative damage method in the estimation of the fatigue life. At the end, it is verified that the fatigue service life of the longitudinal reinforcement varies according to the size of the span, and in the three analyzed bridges the fatigue service life is less than 30 years.

Keywords: bridges; reinforced concrete; fatigue; service life; beams.

Vida útil a la fatiga de la armadura longitudinal de vigas de puentes de hormigón armado frente al tráfico real de vehículos pesados

RESUMEN

Este documento analiza la vida de servicio a la fatiga del refuerzo longitudinal en vigas de puentes de concreto reforzado considerando el número real de vehículos pesados de 2 a 6 ejes en un tramo de carretera en el estado de São Paulo, Brasil. Se utilizan modelos teóricos en un sistema estructural de puentes con dos vigas doblemente apoyadas en tramos de 10, 15 y 20 metros. Para la determinación de los esfuerzos se utiliza el software Ftool y en la estimación de la vida útil a la fatiga o daño acumulado. Al final, se verifica que el tiempo de vida a la fatiga del refuerzo longitudinal varía según el tamaño del tramo, siendo que en los tres puentes analizados la vida de servicio a la fatiga es inferior a 30 años.

Palabras clave: puentes; concreto armado; fatiga; vida útil; vigas.

1. INTRODUÇÃO

Para Nowak e Fischer, (2016, p. 297), a infraestrutura de tráfego "não apenas garante a performance e eficiência econômica, mas também provém mobilidade e qualidade de vida para a população, contribuindo decisivamente, portanto, com a riqueza de um país".

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018), o transporte rodoviário de cargas no Brasil corresponde a 61,1% e o transporte de passageiros a 82,8% do total.

Pontes e viadutos são afetadas diretamente pela predominância da matriz rodoviária. Além de serem elementos importantíssimos nos sistemas de transportes, a garantia de bom funcionamento e de segurança dessas estruturas repercute nos desenvolvimentos socioeconômicos das cidades do entorno e mesmo de um país (Zhou; Chen, 2018; Bastidas-Arteaga, 2018).

Das diversas ações sob as quais pontes e viadutos estão submetidos citam-se as cargas permanentes, como o peso próprio, e as cargas móveis representadas pelos veículos que neles trafegam (Schneider; Marx, 2018). O volume anual e o peso dos veículos de cargas têm crescido nas rodovias brasileiras e ao redor do mundo (Pircher et al., 2011; Han et al., 2015; Deng et al., 2016; Han et al., 2017).

Esse crescimento tem gerado diversos problemas nos elementos constituintes de pontes e viadutos. Dentre os problemas estruturais aos quais pontes e viadutos estão susceptíveis, a fadiga merece

destaque (Pimentel et al., 2008; Baroni et al., 2009), pois a variabilidade e o regime das cargas móveis fazem com que essas estruturas estejam mais propensas a sofrerem com esse fenômeno.
Liu e Zhou (2018) reforçam o exposto acima ao afirmar que "a pesquisa acerca do problema de fadiga em vigas de concreto armado é de grande importância para o projeto, a manutenção e o reforço de pontes" (Liu; Zhou, 2018, p. 3512).
Baseado nisso, utilizando-se dados reais de tráfego de um anel rodoviário, serão estimados os tempos de vidas úteis à fadiga da armadura longitudinal das vigas de três pontes teóricas de concreto armado com vãos de diferentes tamanhos. Essas pontes serão dimensionadas utilizando-se o trem-tipo normativo brasileiro TB 450, da NBR 7188, que é um veículo de 450 kN de peso total (Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 2013).

1.1 Metodologia

Como referencial teórico serão utilizados artigos científicos digitais provenientes de periódicos e congressos tanto em Línguas Portuguesa e Inglesa. Outrossim serão empregados livros que sejam referência na área, bem como as Normas pertinentes, a exemplo, NBR 7188:2013 e a Norma Brasileira NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, NBR 6118:2014.
As avaliações numéricas aqui realizadas dar-se-ão através de Métodos Analíticos com a utilização das equações matemáticas descritas no item 2 deste artigo. A vida útil à fadiga será determinada através da metodologia do Dano Acumulado, e serão determinados os momentos fletores nos meios dos vãos das vigas de concreto armado através da utilização do software de elementos finitos de análise estrutural Ftool (FTOOL, 2008). A escolha pela utilização do Ftool deve-se ao fato de ser uma ferramenta gratuita e por ser amplamente emprego em trabalhos técnicos e no meio acadêmico, seja como ferramenta pedagógica ou no meio científico.

2. FADIGA

De acordo com NBR 6118, "a fadiga é um fenômeno associado a ações dinâmicas repetidas, que pode ser entendido como um processo de modificações progressivas e permanentes da estrutura interna de um material submetido a oscilação de tensões decorrentes dessas ações" (ABNT, 2014, p. 193).
Sendo a fadiga "a progressiva deterioração de uma estrutura pelo crescimento de fissuras devido às variações de tensões (ciclos) resultantes da aplicação de cargas repetidas, tais como induzidas em componentes de pontes sob cargas de" reais de veículos pesados, esses ciclos podem ser baixos ou altos (Habeeba et al., 2015, p. 2561).
A variação de tensão é dada pela diferença entre as tensões máxima e a mínima, sendo essa variação expressa pela equação (1):

$$\Delta\sigma = \sigma_{máx} - \sigma_{mín} \qquad (1)$$

Onde: $\Delta\sigma$ é a variação de tensão; $\sigma_{máx}$ é a tensão máxima e $\sigma_{mín}$ é a tensão mínima.
A razão R entre as tensões é expressa por:

$$R = \frac{\sigma_{mín}}{\sigma_{máx}} \qquad (2)$$

Dentre as diferentes metodologias adotadas na análise de fadiga, será utilizado o princípio do Dano Acumulado, ou regra de Palmgren-Miner. Essa abordagem será adotada devido ao fato de na fadiga de pontes ocorrerem variações não uniformes de tensões (Santos, Pfeil, 2014). Segundo Pimentel

et al. (2008) e Wang et al. (2013), o dano acumulado D relaciona linearmente o número de ciclos experimentados n com o número de ciclos necessários para levar à estrutura à ruptura N:

$$D = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} \qquad (3)$$

Onde: D é o dano acumulado; n_i é o número de ciclos experimentados; N_i é o número N de ciclos necessários para levar a estrutura à ruptura por fadiga. Wang et al. (2013, p. 3) explicam que D é "linearmente proporcional a n_i para cada variação de tensão $\Delta\sigma_i$".

Freitas (2014, p. 24-25) comenta que "a aplicação do Método do Dano Acumulado tem como principal vantagem o seu rigor, dada a ausência de fórmulas de conversão e simplificação". A autora ainda completa ao afirmar que "quando o estudo se foca num número reduzido de elementos, a aplicação deste método pode ser viável", como é o caso deste trabalho que analisa vigas longarinas de concreto armado (Freitas, 2014, p. 24-25).

Branco et al. (1999) pontuam as seguintes conclusões acerca dos resultados obtidos para o dano acumulado D:

- D>1 – A vida útil real à fadiga da peça estrutural analisada é inferior à prevista, portanto, a falha estrutural por fadiga ocorrerá durante a vida útil estimada, o que requer que medidas sejam adotadas para se retardar e/ou controlar tal processo;
- D=1 – A vida útil real à fadiga da peça estrutural analisada é a prevista;
- D<1 – A vida útil real à fadiga é superior à prevista, portanto a peça estrutural possui um tempo de vida útil, ou vida residual (VR).

A partir da determinação do dano acumulado pode-se determinar o tempo de vida útil à fadiga:

$$VU = \frac{1}{D} \qquad (4)$$

Neste contexto, faz-se relevante esclarecer os conceitos de Vida Funcional da Obra e Vida Útil de Projeto (VUP). Branco e Paulo (2012, p. 2) explicam que "a caracterização da vida de uma ponte tem de começar pela definição da sua vida funcional, ou seja, pela caracterização da máxima capacidade de tráfico pretendida" durante a vida funcional das OAEs.

Os autores ainda pontuam que a "vida funcional é frequentemente inferior à vida estrutural da ponte" e, uma vez que os problemas comecem a ocorrer essas estruturas devem passar por processo de reabilitação, "por exemplo aumentando a sua largura ou construindo uma nova ponte perto" daquela com problemas, "de modo a garantir a manutenção da qualidade funcional da travessia" (Branco, Paulo, 2012, p. 2).

De acordo com Branco et al. (2013, p. 5), a VUP "está associada às condições de segurança e de utilização da estrutura, nomeadamente garantindo que não ocorram situações de colapso, deformações excessivas, etc.". Branco e Paulo (2012) esclarecem que pontes e viadutos costumavam ser projetados para uma VUP de 50 anos e que atualmente esse tempo passou para 75 anos e em alguns países e a depender da significância da obra, de 100 a 120 anos. Portanto, a vida útil à fadiga está relacionada à vida útil estrutural da ponte sob o aspecto da fadiga.

As chamadas Curvas S-N ou Curvas de Wöhler, também empregas nos cálculos relativos à fadiga, são representações gráficas que relacionam o módulo da tensão (S) com o número de ciclos (N) necessários para se levar um material à ruptura e são traçadas a partir de dados experimentais (Pereira, 2006; Baroni, 2010).

2.1 Fadiga no concreto

A NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 192) estabelece que a verificação da fadiga em pontes seja feita através da determinação da combinação frequente de ações, mesmo que o fenômeno "seja controlado pela acumulação do efeito deletério de solicitações repetidas", isto é, pelo processo do dano acumulado. Para tanto, a combinação frequente de ações é dada pela equação 5.

$$F_{d,ser} = \sum_{i=1}^{m} F_{gik} + \psi_1 . F_{q1k} + \sum_{j=1}^{n} \psi_{2j} . F_{qjk} \quad (5)$$

Onde: $F_{d,ser}$ é o valor de cálculo das ações para combinações em Estado Limite de Serviço (ELS); F_{gik} são as ações permanentes; F_{q1k} é a ação variável principal; F_{qjk} são as ações variáveis secundárias; ψ_1 é o fator de redução de combinação frequente; ψ_{2j} é o fator de redução de combinação quase permanente, sendo ψ_1 igual a 0,5 para verificação das vigas

Ações de fadiga de alta intensidade, isto é, capazes de provocar danos com menos de 20.000 ciclos não são abordadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), sendo apenas as ações de média e baixa intensidade e número de repetições de até 2.000.000 de ciclos tratados pela norma. Ainda de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 193), "para a consideração do espectro de ações, admite-se que podem ser excluídas aquelas de veículos com carga total até 30 kN, para o caso de pontes rodoviárias".

Schlafli e Bruhwiler (1998), Ray e Kishen (2014) e Ruiz et al. (2015) sustentam que o comportamento mecânico de elementos de concreto armado está intimamente ligado ao comportamento da armação. Com isso, a ruptura do elemento está associada à ruptura da armação, que na maioria das vezes ocorre à flexão (Schlafli; Bruhwiler, 1998, Ray; Kishen; 2014, Ruiz et al., 2015).

Maggi (2004, p. 8) explica que a fadiga no concreto "começa em uma escala microscópica e é associada ao aumento da abertura das fissuras e à redução da rigidez". Dentre os fatores que influenciam a resistência do concreto à fadiga citam-se: "variação de tensão, histórico das ações, propriedades dos materiais, frequência das ações, gradiente de tensão e períodos de folga" (Maggi, 2004, p. 8).

Zanuy et al. (2011) pontuam que em termos gerais os ciclos repetidos atuantes em um membro estrutural fazem com que o mesmo perca rigidez em função das fissuras excessivas e das deformações. Essa perda de rigidez deve-se à degradação do concreto em sua região comprimida e à redução do chamado "tension stiffening". Junges (2017, p. 91) explica que "o termo tension stiffening refere-se à capacidade do concreto em suportar tensões de tração entre fissuras devido à transferência de forças das barras para o concreto por meio da aderência".

A figura 1 apresenta a redução do tension stiffening à medida que se aumenta o número de ciclos, baseado nos ensaios realizados por Zanuy et al. (2011). Destacam-se dois fatos relevantes acerca da figura: primeiramente, à medida que se aumenta o número de ciclos mais se aproxima do Estádio II puro; e a redução gradual do *tension stiffening* é fruto da perda de aderência entre as barras de aço e o concreto. Na figura 1, o termo em inglês "State I" significa "Estádio I" e o termo "State II" significa "Estádio II".

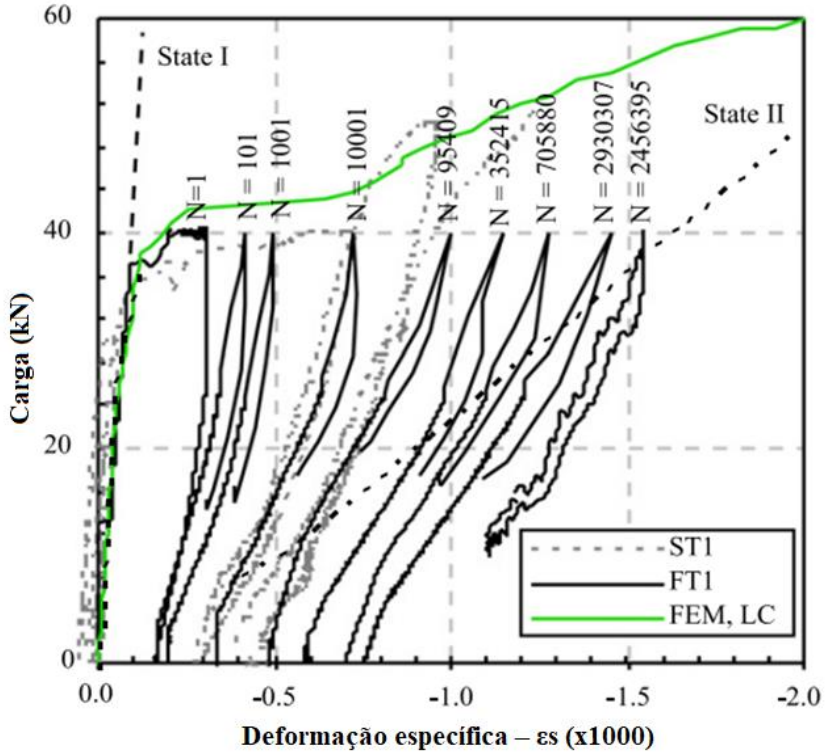

Figura 1. Falha por fadiga em um elemento de concreto armado (Zanuy et al., 2011)

2.1 Fadiga na armadura

Schlafli e Bruhwiler (1998) esclarecem que a propagação da fadiga na armadura pode ser dividida em duas fases. Na primeira fase a propagação das trincas dá-se de forma estável, já na segunda fase observa-se uma fratura frágil na seção restante (Schlafli; Bruhwiler, 1998). O manual ACI 215R-74 ainda acrescenta que a fadiga na armação é o que gera maiores preocupações para os projetistas (ACI, 1997).

Baroni (2010, p. 42) esclarece que "os fatores que influenciam a resistência das barras de aço à fadiga são: tensão mínima", diâmetro, curvatura e emenda das barras, tipo de viga. Portanto, a vida útil à fadiga no aço pode ser estimada através da equação (Santos, Pfeil, 2014, p. 41):

$$N = N_{fad} \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_{fad}}{\Delta\sigma} \right)^{m} \qquad (6)$$

N_{fad} vale 10^6; $\Delta\sigma_{fad}$ é igual ao $\Delta_{fsd,\,fad}$; m é a inclinação do trecho, de acordo com a figura 2 (Junges, 2017), dada pela NBR 6118:2014. Sendo que os valores de $\Delta f_{sd,\,fad}$ são dados segundo a Tabela 23.2 da NBR 6118:2014. As tensões máxima e mínima no aço podem ser determinadas através das equações:

$$\sigma_{s,máx} = \alpha_E \cdot \frac{M_{máx} \cdot x_i}{I_{II}} \qquad (7)$$

$$\sigma_{s,mín} = \alpha_E \cdot \frac{M_{mín} \cdot x_i}{I_{II}} \qquad (8)$$

Onde: $\sigma_{s,máx}$ é a máxima tensão de compressão no aço; $\sigma_{s,mín}$ é a mínima tensão de compressão no aço; x_i é a distância da linha neutra até à face inferior; α_E é a relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

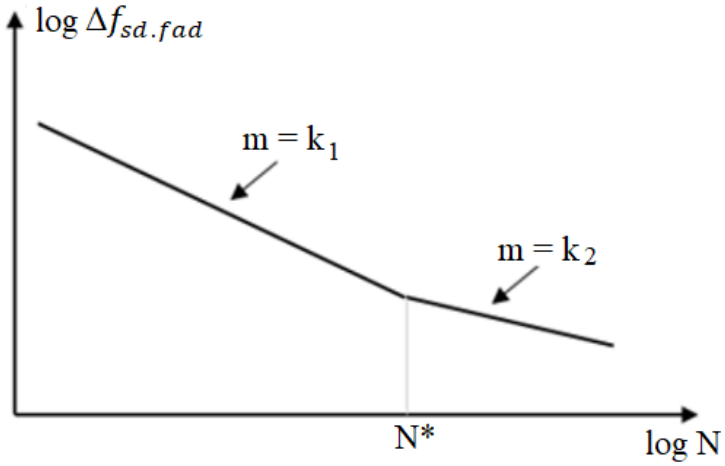

Figura 2. Curvas de resistência característica à fadiga (curvas S-N) para o aço (Junges, 2017)

Como neste trabalho serão empregas armaduras passivas, a curva S-N pode assumir dois valores, $k_1 = 9$ e $k_2 = 5$. Partindo disso, pode-se determinar as constantes $Const_1$ e $Const_2$ para ambas as curvas através das seguintes equações:

$$Const_1 = .\left(\Delta\sigma_{Sd,\,fad}\right)^5.N \tag{9}$$

$$Const_2 = .\left(\Delta\sigma_{Sd,\,fad}\right)^9.N \tag{10}$$

Para diferentes valores de $\Delta f_{sd,\,fad}$, para 10^6 ciclos, tem-se as constantes conforme a tabela 1.

Tabela 1. Valores de $\Delta f_{sd,\,fad}$

$\Delta f_{sd,\,fad,mín}$ **(MPa)**	$Const_1$	$Const_2$	$\Delta f_{sd,\,fad}$ **(MPa)**
190	3,64E+17	6,45E+26	205,21
185	3,18E+17	5,08E+26	199,81
180	2,78E+17	3,97E+26	194,41
175	2,41E+17	3,08E+26	189,01
165	1,80E+17	1,81E+26	178,21
150	1,12E+17	7,69E+25	162,01

Fonte: Próprio Autor (2019).

Portanto, toda vez que $\Delta\sigma_s$ for maior que $\Delta f_{sd,\,fad}$, as áreas de aço devem ser multiplicadas pelo coeficiente de fadiga k.

$$k = \frac{\Delta\sigma_s}{\Delta f_{sd,fad}} \qquad (11)$$

2.3 Fadiga em pontes de concreto armado

Zhang et al. (2012) pontuam que o crescimento econômico pelo qual a China tem passado nos últimos anos contribui de maneira direta para o aumento expressivo no tráfego de veículos pesados nas rodovias do país. Tal fato implica na resistência à fadiga de pontes e viadutos rodoviários. Através dos estudos conduzidos, os autores obtiveram algumas conclusões. Primeiramente, eles afirmam que o princípio do Dano Acumulado, ou regra de Palmgren-Miner, adequada e um "método prático para se determinar o dano à fadiga" para vigas simplesmente apoiadas (Zhang et al., 2012, p. 793).

Os autores também concluíram que "é recomendado que o coeficiente de dano relativos à fadiga seja atualizado para o novo" código chinês de cargas móveis de pontes rodoviárias, para pontes com vãos menores que 20 m (Zhang et al., 2012, p. 793).

Rossigali et al. (2015, p. 124) relatam que é crescente a preocupação e busca por modelos de cargas mais compatíveis com a realidade "para o projeto de pontes rodoviárias no Brasil" e que tias modelos "estão em desenvolvimento com a montagem de um banco de dados de tráfego real, simulações de tráfego, modelagem analítico-numérica da interação dinâmica veículo-estrutura e extrapolações". Considerando tal fato, os autores analisam pontes de concreto armado de pequenos vãos, com pistas simples e duas faixas sob diferentes cenários de tráfego.

Os autores empregaram técnicas de confiabilidade estrutural e distribuições de probabilidade para se analisar o fluxo de veículos. Ao fim, eles concluíram que o modelo de cargas atual proposto pela NBR 7188:2013, "não é adequado para representar as solicitações reais e pode estar, em alguns casos, contra a segurança" (Rossigali et al., 2015, p. 124).

Segundo Alencar *et. al* (2016, p. 2), A imposição à estrutura de novas condições de tráfego associada ao comportamento à fadiga do material pode vir a gerar danos estruturais com níveis distintos de severidade, e, à medida que a magnitude das cargas transportadas aumenta, o problema torna-se ainda mais relevante".

Wang et al. (2015) e Xin et al. (2017) também destacam que as autoridades e engenheiros estruturais tem dado mais atenção ao processo de fadiga oriundo do aumento dos veículos pesados nas rodovias e da velocidade dos mesmos.

Almeida e Fortes (2016), Mota et al. (2018) e Camargo et al. (2018) demonstram que as solicitações oriundas dos tráfegos reais mais recentes de veículos nas rodovias brasileiras podem ser maiores que aquelas calculadas pelo TB 450.

Trabalhos mais recentes como o desenvolvido por Deng e Yang (2018) trataram da formulação de métodos para determinação da permissão e dos limites legais de pesos dos veículos pesados levando-se em consideração o dano acumulado de fadiga nas pontes. Os autores obtiveram resultados relativos ao dano por fadiga para diferentes variações de tensões em seus estudos e informam que tais resultados "podem ser usados para determinar a carga limite para pontes novas e antigas" (Deng; Yan, 2018, p. 7).

Braz et al. (2018, p.1; 4) analisaram "quatro modelos de ponte de concreto armado de duas longarinas à luz das normatizações brasileiras e europeias" e as quatro pontes são "hiperestáticas, com f_{ck} de 50 MPa, aço CA-50 e vãos principais de 20 m". Ao se realizar a análise e comparação dos resultados, os autores verificaram que:

O tratamento normativo europeu se mostrou mais conservador que o brasileiro no que diz respeito à fadiga das armaduras e ao dimensionamento. Este comportamento é um reflexo do rigor normativo europeu que adota veículos de projeto e coeficientes de majoração das cargas específicos

para a fadiga, bem como um único valor de resistência à fadiga para as diferentes bitolas de armadura (Braz et al., 2018, p. 10).

3. BASE DE DADOS DE TRÁFEGO

Para se realizar as verificações e os cálculos pertinentes ao processo da fadiga, serão utilizadas as informações dos volumes anuais de tráfego de 2009 a 2017, fornecidos pela CCR RodoAnel, a qual tem sob sua administração 29,30 quilômetros do trecho oeste do anel viário Mario Covas, que integra as rodovias Raposo Tavares, Castello Branco, Anhanguera, Bandeirantes e Régis Bittencourt" (CCR RODOANEL, 2018). Os dados fornecidos referem-se ao número anual de veículos de cargas de 2 a 6 eixos, conforme exposto na tabela 2.

Tabela 2. Tráfego comercial anual de veículos

Ano	Comercial de 2 eixos	Comercial de 3 eixos	Comercial de 4 eixos	Comercial de 5 eixos	Comercial de 6 eixos
2009	5.531.774	3.306.437	1.180.226	663.505	889.091
2010	6.476.748	4.213.663	1.874.607	1.995.312	1.773.380
2011	3.820.060	4.652.486	2.169.154	2.170.282	2.109.843
2012	7.097.189	4.775.874	1.344.816	2.082.505	2.289.120
2013	6.208.545	5.072.068	1.792.046	2.492.961	3.194.281
2014	5.309.203	5.258.467	883.935	2.796.359	4.004.225
2015	5.008.912	2.540.180	856.232	2.487.752	4.076.946
2016	4.714.630	4.142.964	816.219	2.226.043	3.817.949
2017	4.718.774	3.941.475	988.906	2.205.195	3.898.191

Fonte: CCR RODOANEL (2018).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para os cálculos e verificação à fadiga, utilizou-se um modelo teórico com um sistema estrutural uma ponte com duas vigas biapoiadas com vãos L de 10 m, 15 m e 20 m, respectivamente denominados V10, V15, V20. A escolha por pontes compostas por apenas 2 vigas é devido ao fato do Brasil ainda possuir elevado número de OAEs antigas construídas com 2 vigas. Segundo dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2017), 12,95% possuem até 10 m e 16,40% de 10,01 a 20 m. Ademais, 86,28% das pontes e dos viadutos brasileiros tem largura de até 13 m (DNIT, 2017). Já o "Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias" (DNIT, 2004) esclarece que as pontes e os viadutos projetadas após 1985 devem ter seção transversal com largura total de 12,80 m e largura da pista de 12,00 m. Baseado nisso, será adotada a seção transversal de 12,80 m para os três vãos analisados.

São assumidas 2 faixas de tráfego para todas as pontes analisadas. Ademais, seguindo as diretrizes do "Manual de Projeto de Obras-de-Arte Especiais" (DNER, 1996), cada faixa terá dimensão adotada de 3,60 m, totalizando 7,20 m de largura da pista, e 2,40 m cada um dos acostamentos. A figura 3 mostra a seção transversal das três pontes.

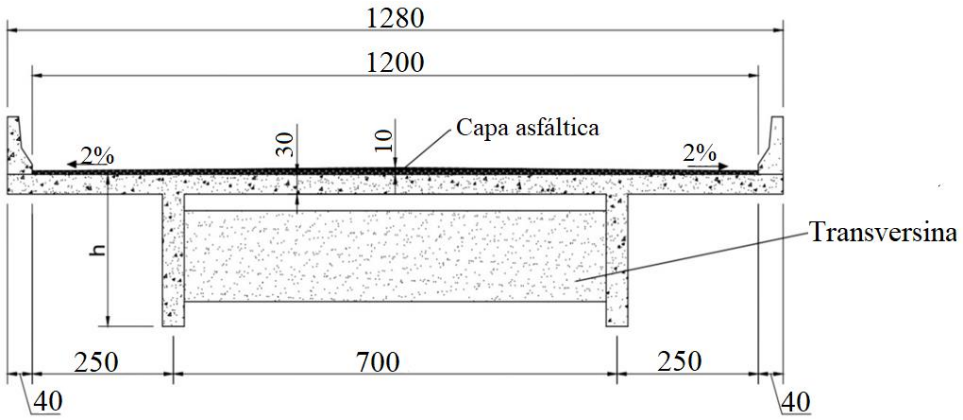

Figura 3. Seção transversal da ponte (cotas em centímetros) (Próprio Autor, 2019).

Há vigas transversinas intermediárias colocadas a cada 5 m com largura constante de 0,30 m e altura de 0,80 m. As transversinas não estão ligadas nas lajes, logo, elas têm a função apenas de travamento. Em função da simplificação dos cálculos, adotou-se as seguintes hipóteses: a laje da ponte não costuma ser de espessura constante, mas neste trabalho a espessura da laje será adotada como constante; será adotada espessura constante para a capa asfáltica de 10 cm. A seção "T" das vigas utilizadas é apresentada na figura 4.

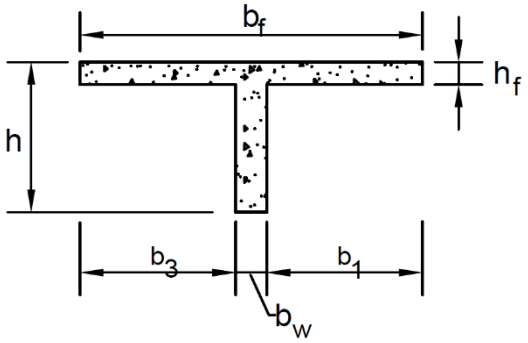

Figura 4. Seção transversal das vigas (Próprio Autor, 2019).

A tabela 3 demonstra os valores adotados para as seções transversais das pontes em análise e a tabela 4 as propriedades dos materiais empregados.

Tabela 3. Valores das dimensões das seções transversais das vigas das pontes

Ponte	b_1 **(cm)**	b_3 **(cm)**	b_w **(cm)**	b_f **(cm)**	h_f **(cm)**	h **(cm)**
V10	100	100	35	235	30	100
V20	200	200	35	435	30	200
V30	300	300	35	635	30	300

Tabela 4. Propriedade dos materiais

Concreto		**Aço**	
f_{ck} **(MPa)**	f_{yk} **(MPa)**	f_{yk} **(MPa)**	Es **(MPa)**
35,0	500,0	500,0	210.000

4.1 Trem-tipo normativo

No que concerne o posicionamento do TB 450, a NBR 7188:2013 esclarece que a carga móvel pode assumir qualquer posição ao longo de toda a seção transversal da ponte onde se tenha pista rodoviária, desde que as rodas estejam na posição mais desfavorável, "inclusive acostamento e faixas de segurança". A carga distribuída também deve ser aplicada na posição mais desfavorável, "independentemente das faixas rodoviárias" (ABNT, 2013, p. 4). A figura 5 apresenta o veículo do TB 450 posicionado na seção mais desfavorável da seção transversal.

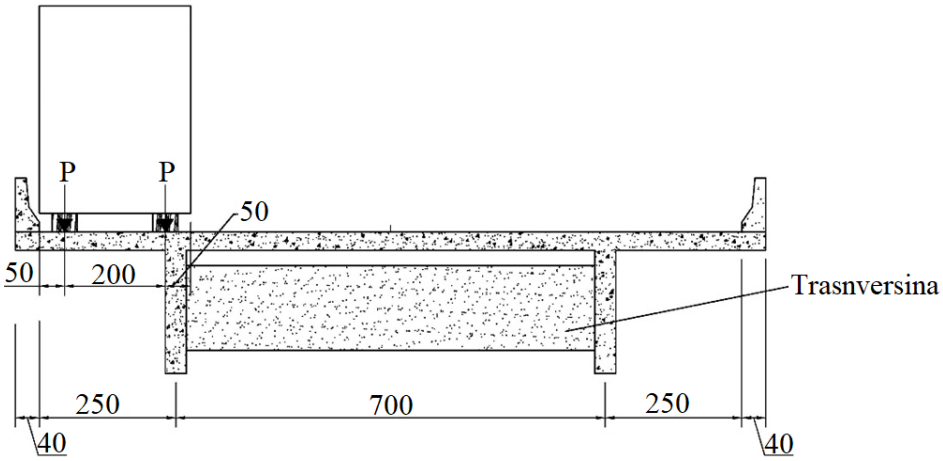

Figura 5. Veículo tipo TB 450 na seção transversal, para a situação de esforço máximo na viga da esquerda da figura (cotas em centímetros) (Próprio Autor, 2019).

Essa posição crítica é determinada utilizando-se a técnica de linhas de influência e um modelo simplificado já consagrado que pode ser viso em inúmeras publicações tais como Carvalho (2017). Neste caso usa-se a linha de influência de reação de apoio, desta forma, considerando-se o trem-tipo na posição que leva a maior reação da viga estudada chega-se ao conjunto de cargas chamados de trem-tipo longitudinal (TTL), com o qual os esforços de momento fletor das vigas serão determinadas.

No que se refere a determinação dos esforços, neste caso o momento fletor, oriundos do TB 450, faz-se as seguintes considerações:

a) Seguindo as diretrizes da NBR 6118:2014, item 23.5.3, a combinação de ações a ser considerada será a frequente. Portanto, os momentos máximos e mínimos oriundos das combinações das cargas permanentes e móveis no meio do vão da viga serão dados pela combinação frequente das ações;
b) Será considerado o diâmetro das barras de aço de 25 mm.

4.2 Veículos reais

Os veículos que trafegam, ao longo da vida útil da ponte, podem assumir diversas posições em sua seção transversal, o que acaba por gerar esforços diferentes nas vigas longarinas de acordo com a posição na qual a carga móvel esteja.

Toledo (2011) avaliou o posicionamento dos veículos reais nas rodovias em relação às faixas de tráfego. A autora concluiu que "a análise com o veículo centrado na faixa é uma boa aproximação para o cálculo da vida útil à fadiga da estrutura, uma vez que os resultados obtidos para este caso foram mais desfavoráveis do que para o caso do veículo excêntrico" (Toledo, p. 63, 2011).

O "Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Taffic loads on bridges" (2002) destaca que para a avaliação transversal das cargas verticais dos veículos reais que trafegam nas rodovias, metade deles trafega centrado na faixa de tráfego e que os demais se distribuem de forma simétrica ao

longo da faixa, como demostra a distribuição de frequência de posicionamento transversal de veículos em uma ponte mostrada na figura 6 (EUROCODE 1, 2002).

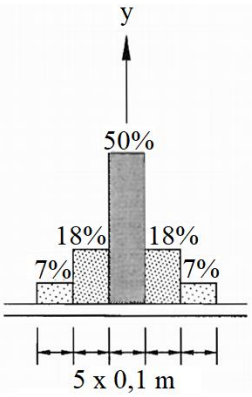

Figura 6. Distribuição de frequência do posicionamento transversal dos veículos na ponte

Este trabalho adotará as seguintes considerações no modelo de cargas móveis dos veículos reais:

a) O procedimento para se determinar o TTL máximo é o mesmo empregado para o veículo TB 450, entretanto, os veículos reais de carga são posicionados conforme mostrado na figura 7;
b) Transversalmente os veículos terão as mesmas dimensões, conforme figura 7;
c) 100% dos veículos estarão posicionados no centro da faixa de tráfego;
d) Será considerado apenas um veículo de carga trafegando na ponte;
e) O momento fletor e os demais cálculos levarão em conta as cargas devido aos veículos reais de carga e as cargas distribuídas de acordo com a NBR 7188 (ABNT, 2013), representando os veículos de pequeno porte que podem acompanhar a passagem do veículo de carga;
f) Os momentos oriundos dos veículos reais de carga não são ponderadas pelo fator de redução de combinação frequente para Estado Limite de Serviço (ELS) ψ_1, uma vez que a NBR 6118 (ABNT, 2014) não prevê tão procedimento para as cargas reais.
g) Cada veículo gera um ciclo de tensão, o qual será usado para a determinação da vida útil à fadiga pelo Método do Dano Acumulado.

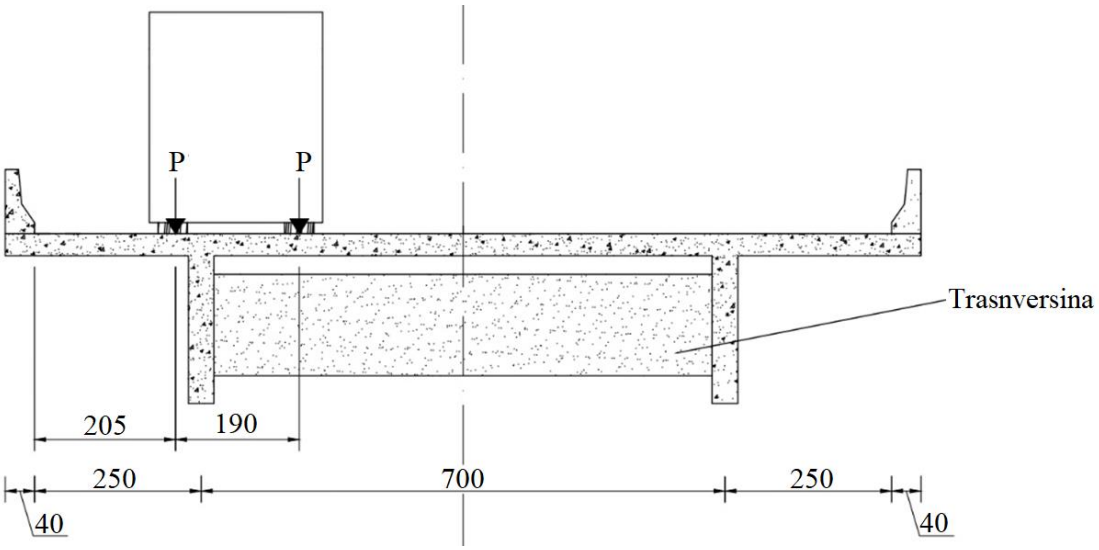

Figura 7. Posição transversal adotada para os veículos de carga (cotas em centímetros) (Próprio Autor, 2019).

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Utilizando-se o veículo normativo TB 450 e os veículos de 2 a 6 eixos, calculou-se os momentos fletores máximos, no meio da viga para os três tipos de pontes. Destaca-se que os valores calculados para as cargas móveis estão multiplicados pelo coeficiente de impacto (CI) que varia de acordo com o tamanho do vão. A tabela 5 apresenta os momentos fletores calculados devido ao peso próprio e os oriundos das cargas móveis para as estruturas biapoiadas.

Tabela 5. Momentos fletores calculados para vigas biapoiadas

Momentos fletores no meio do vão (kN.m)								
Viga	**CI**	**Peso Próprio**	**TB 450**	**Comercial de 2 eixos**	**Comercial de 3 eixos**	**Comercial de 4 eixos**	**Comercial de 5 eixos**	**Comercial de 6 eixos**
V10	1,35	1162,1	1251,3	443,1	541	563,9	632,1	585,9
V15	1,33	2725,5	2269,0	881,6	1051,2	1143,0	1261,1	1192,3
V20	1,27	5096,0	3130,1	1447,5	1688,8	1849,6	2037,9	2002,8

Na determinação do número de ciclos N à fadiga no aço, faz-se necessário determinar o valor de "m" da Curva S-N. Como as variações de tensões no aço calculadas são inferiores à variação de tensão limite para o diâmetro de 25 mm, que é 17,5 kN/cm2, é utilizado o valor de m=9.
A figura 8 apresenta a vida útil consumida de cada respectivo ano analisado para cada ponte. Ademais, são apresentadas na tabela 6 estimativas de vidas úteis à fadiga na armadura longitudinal, mostrando o consumo da resistência à fadiga ao longo dos nove anos considerados e o tempo necessário para se atingir 100% de consumo. Destaca-se que os resultados apresentados não consideram os danos relativos à fadiga ou quaisquer outros danos anteriores, apenas durante os 9 anos de dados considerados; isto é, há a consideração de como se as pontes fossem novas.

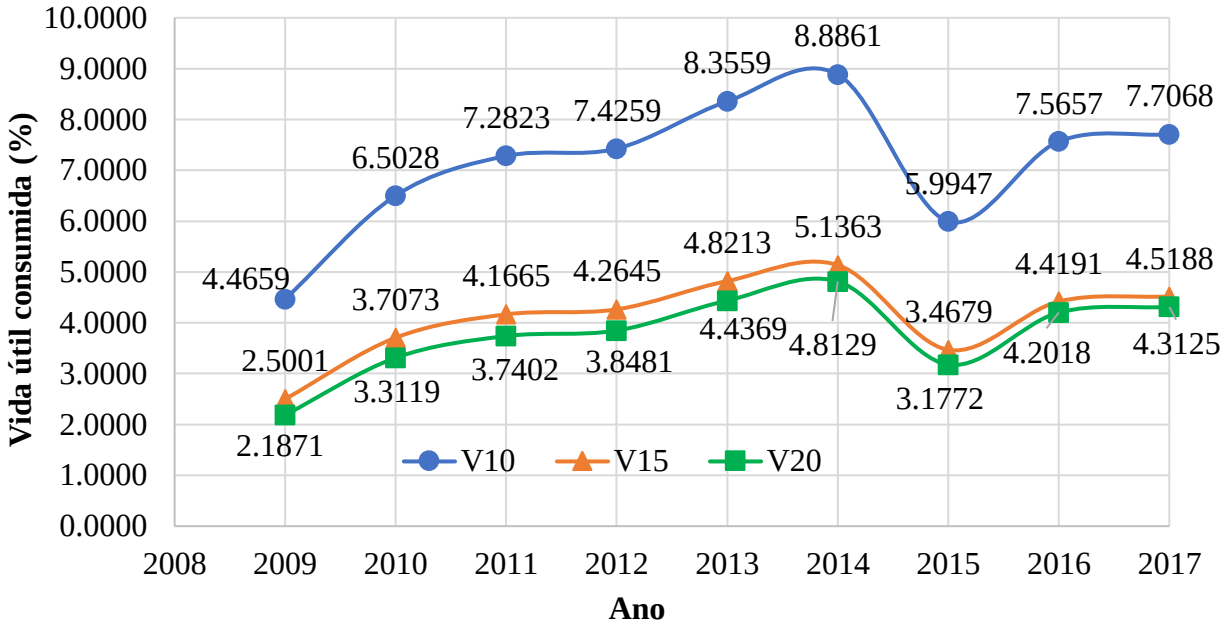

Figura 8. Consumo da vida útil da armadura longitudinal (Próprio Autor, 2019).

Tabela 6. Vida Útil no Aço

Ponte	Consumo em 9 anos (%)	Consumo de 100% (anos)
V10	64,19	14,02
V15	37,00	24,32
V20	34,03	26,45

Por se tratar de um fluxo elevado de veículos por ano, com um tráfego médio anual de 16.200.000, as três pontes analisadas apresentaram tempo de vida útil à fadiga das armaduras longitudinais inferiores a 30 anos. Ademais, verifica-se que o consumo de 100% da resistência à fadiga na armadura longitudinal, varia de acordo com o vão, sendo que quanto menor o vão, menor a vida útil à fadiga.

Para se aumentar o tempo de vida útil à fadiga do aço, sugere-se uma ou algumas das possibilidades a seguir: 1) Aumentar o número de vigas; 2) Mudar a seção transversal das pontes analisadas; 3) Modificar as dimensões do perfil transversal das vigas; 4) Aumentar a resistência à compressão característica do concreto; 5) Rever os procedimentos para verificação e/ou dimensionamento à fadiga de vigas de pontes rodoviárias presente nas normas brasileiras.

6. CONCLUSÕES

Frente às análises realizadas neste artigo é possível concluir que apesar do veículo normativo TB 450 apresentar momentos fletores no meio do vão superiores àqueles apresentados para aqueles veículos reais aqui considerados, nas pontes aqui analisadas, o elevado número de veículos no trecho analisado requer atenção quanto ao rápido consumo de resistência à fadiga.

O tempo necessário para se atingir o consumo de 100% da vida útil à fadiga na armadura longitudinal nas três pontes analisadas possuem valores diferentes, mas todas teriam tempo de vida útil à fadiga de menos de 30 anos. Tal resultado é crítico e preocupante, sobretudo se for levado em consideração um VUP de 50 a 80 anos.

Logo, faz-se necessário a adoção de algumas medidas para se aumentar o tempo de vida útil à fadiga dessas pontes de concreto armado de duas longarinas biapoiadas, como, por exemplo, empregar um número maior de vigas por tabuleiro e/ou modificar a seção transversal das vigas.

Ademais, deve-se considerar a elevada idade das pontes e viadutos brasileiros, pois as análises e cálculos aqui realizados levam em consideração que as pontes são novas, cujos danos são apenas aqueles apresentados ao longo dos nove anos analisados. Portanto, atenção especial deve ser dada a essas estruturas com idade elevada.

7. AGRADECIMENTOS

Faz-se especial agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ligada ao Ministério da Educação do Brasil, pelo apoio através da bolsa de estudos concedida ao autor correspondente, permitindo o mais benéfico desenvolvimento deste trabalho.

Agradece-se também, à CCR RodoAnel pela gentileza no fornecimento dos dados relativos ao número de veículos pesados, os quais foram fundamentais para a realização deste artigo, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv), da UFSCar, por todo apoio concedido.

8. REFERÊNCIAS

Alencar, G., et al. (2016), "*Análise Dinâmica e Verificação à Fadiga dos Viadutos de Acesso da Nova Ponte Ferroviária Sobre o Rio Sado*" in: Iberian Latin American Congress in Computational Methods in Engineering, ABMEC, Brasília (Brasil), pp. 1-16.

Almeida, E. P., Fortes, A. S. (2016), "*Análise da Carga Móvel em Pontes e Viadutos Rodoviários*" in: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, ABECE, Rio de Janeiro (Brasil), pp. 1-10.

American Concrete Institute. (1997). *ACI 215R-74: Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading*. Michigan.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013), *NBR 7188: Carga Móvel Rodoviária e de Pedestres em Pontes, Viadutos, Passarelas e outras estruturas*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.

Baroni, H. J. M. et al. (2009), *"Vida Útil de Fadiga de Elementos Estruturais de Concreto Armado de Pontes Rodoviária"* in: Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Curitiba (Brasil), pp. 1-16.

Baroni, H. J. M. (2010), *"Simulação da Vida Útil do Concreto em Vigas de Tabuleiro de Pontes em Função do Fluxo de Veículos Pesados"*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 284;

Bastidas-Arteaga, E. (2018), *Reliability of Reinforced Concrete Structures Subjected to Corrosion-Fatigue and Climate Change*. International Journal of Concrete Structures and Materials. 12(1):1-13. https://doi.org/10.1186/s40069-018-0235-x

Branco, C. M. et al. (1999), "*Fadiga de Estruturas Soldadas*", Editora Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.

Branco, F., Paulo, P. (2012), *O projecto de pontes para vidas superiores a 100 anos*. Revista ALCONPAT, 2(1), 1 - 9. doi: http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i1.20.

Branco, F. A. et al. *Boletín Técnico: Vida útil em la construiccíon civil. ALCONPAT International*. 2013. Disponível em: <http://alconpat.org.br/wp-content/uploads/2012/09/B4-Vida-%C3%9Atil-na-Constru%C3%A7%C3%A3o-Civil.pdf>. Access in 03 Apr. 2019.

Braz, D. et al. (2018). *"Otimização da proporção entre balanço e vão de pontes de concreto armado de duas longarinas com base na fadiga das armaduras"* in: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, ABECE, Rio de Janeiro (Brasil), pp. 1-10.

Camargo, M. V. et al. (2018), *"Análise comparativa entre comboios e o carregamento normativo da NBR 7188/2013 em tabuleiros de pontes rodoviárias de concreto"* in: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, ABECE, Rio de Janeiro (Brasil), pp. 1-10.

Carvalho, R. C. (2017), Introdução ao estudo de pontes. Universidade Federal de São Carlos.

CCR RODOANEL. "Sobre a CCR RodoAnel". Disponível em: <http://www.rodoaneloeste.com.br/institucional/>. Access in 18 Ago. 2018.

Confederação Nacional do Transporte (2018), "Boletim Estatístico - CNT - Maio 2018". Brasília: CNT. Disponível em: < http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>. Access in 18 Jul. 2018.

Deng, L. et al. (2016), *State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse*. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 30(2):1-13. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000731

Deng, L., Yan, W. (2018), *Vehicle Weight Limits and Overload Permit Checking Considering the Cumulative Fatigue Damage of Bridges*. Journal of Bridge Engineering, 23(7):1-8. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001267

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) (1996), *Manual de Projeto de Obras-de-Arte Especias. Ministério dos Transportes*. Rio de Janeiro. Disponível em: <

http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/698_manual_de_projeto_de_obras_de_arte_especiais.pdf>. Access in 13 Apr. 2019.
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2017), *Base de Dados das OAE – BDOAE*. 2017. Disponível em: < http://servicos.dnit.gov.br/dnitcloud/index.php/s/gkQB3SNPH7cwF5F>. Access in 29 Oct. 2018.
European Standard. (2002), *EN1991-2, Eurocode 1 - Actions on structures - Part 2: Traffic Loads on Bridges*. European Committee for Standardization, Brussels.
Freitas, M. J. S. (2014), "*Verificação de Segurança à Fadiga de Pontes Rodoviárias*". Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, p. 161.
FTOOL (2018), "*A Graphical-Interactive Program for Teaching Structural Behavior*". Disponível em: < https://www.ftool.com.br/Ftool/>. Access in 13 Sep. 2018.
Habeeba, A et al. (2015), *Fatigue Evaluation of Reinforced Concrete Highway Bridge*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 4(4):2561-2569. http://www.rroij.com/open-access/fatigue-evaluation-of-reinforced-concretehighway-bridge.pdf
Han, W. et al. (2015), *Characteristics and Dynamic Impact of Overloaded Extra Heavy Trucks on Typical Highway Bridges*. Journal of Bridge Engineering, 20(2):1-11. http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000666
Han, W. et al. (2017), *Dynamic Impact of Heavy Traffic Load on Typical T-Beam Bridges Based on WIM Data*. Journal of Performance of Constructed Facilities, 31(3):1-14. http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000991
Liu, F., Zhou, J. (2018), *Experimental Research on Fatigue Damage of Reinforced Concrete Rectangular Beam*. KSCE Journal of Civil Engineering, 22(9):3512–3523. https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-018-1767-y
Maggi, P. L. O. (2004), "*Comportamento de Pavimentos de Concreto Estruturalmente Armados sob Carregamentos Estáticos e Repetidos*". Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, p. 219.
Mota, H. C. et al. (2018), *"Estimativa de Esforços Extremos em Pontes Para Modelo Dinâmico de Cargas Móveis No Brasil"* in: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, ABECE, Rio de Janeiro (Brasil), pp. 1-10.
Nowak, M., Fischer, O. (2016), *Traffic Parameter Sensitivity in the Development of Site-specific Load Models*. Procedia Engineering, 156:296–303. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.300
Pereira, H. F. S. G. (2006), "*Comportamento à Fadiga de Componentes Estruturais Sob a Acção de Solicitações de Amplitude Variável*". Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, p. 292.
Pimentel, M. et al. (2008), *Fatigue life of short-span reinforced concrete railway bridges*. Structural Concrete, 9(4): 215-222. https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/stco.2008.9.4.215
Pircher, M. et al. (2011), *Damage due to heavy traffic on three RC road bridges*. Engineering Structures, 33(12): 3755–3761. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.012
Ray, S., Kishen, J. M. (2014). *Analysis of fatigue crack growth in reinforced concrete beams.* Materials and Structures. 47(1):183-198. https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-013-0054-0
Rossigali, C. E. et al. (2015), *Towards actual Brazilian traffic load models for short span highway bridges*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 8(2):124-139. http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952015000200005
Ruiz, M. F. et al. (2015), *Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: A mechanical approach to consistently account for size and strain effects*. Engineering Structures, 99, 360-372. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.05.007

Santos, L. F., Pfeil, M. S. (2014), *Desenvolvimento de Modelo de Cargas Móveis para Verificação de Fadiga em Pontes Rodoviárias*. Engenharia Estudo e Pesquisa, 14(1):40-47. http://www.revistaeep.com/imagens/volume14_01/cap05.pdf

Schläfli, M., Brühwiler, EugEen. (1998), *Fatigue of existing reinforced concrete bridge deck slabs*. Engineering Structures. 20. 991-998. https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00194-6.

Schneider, S., Marx, S. (2018), *Design of railway bridges for dynamic loads due to high-speed traffic*. Engineering Structures, 174(1):396–406. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.030

Toledo, R. L. S. de. (2011), "*Avaliação da vida útil à fadiga em ponte mista aço-concreto considerando o espectro de veículos reais*". Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 101.

Wang, C-S. et al. (2013), "*Fatigue Safety Monitoring and Fatigue Life Evaluation for Existing Concrete Bridges*" in: International Conference on Fracture, ICF, Beijing (China), pp. 1-9

Wang, C-S. et al. (2015), *Fatigue Service Life Evaluation of Existing Steel and Concrete Bridges*. Advanced Steel Construction, 11(3):305-321. http://ascjournal.com/down/vol11no3/vol11no3_5.pdf

Xin, Q. et al. (2017), *Fatigue Behavior of Prestressed Concrete Beams under Overload*. Journal of Engineering Science and Technology Review, 10(4):124-131. http://www.jestr.org/downloads/Volume10Issue4/fulltext171042017.pdf

Zanuy, C. et al. (2011), *Transverse fatigue behaviour of lightly reinforced concrete bridge decks*. Engineering Structures, 33(10): 2839–2849. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.06.008

Zhang, Y., Xin, X., Cui, X. (2012), *Updating Fatigue Damage Coefficient in Railway Bridge Design Code in China*. Journal of Bridge Engineering, 17 (5): 788-793. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000310

Zhou, Y., Chen, S. (2018), *Investigation of the Live-Load Effects on Long-Span Bridges under Traffic Flows*. Journal of Bridge Engineering, 23(5):1–18. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001214