

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

F. Jr. R. Mascarenhas^{1*}  R. Chust Carvalho¹ 

* Autor de Contacto: fer.jr.resende@hotmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.375>

Recepción: 18/12/2018 | Aceptación: 15/07/2019 | Publicación: 30/08/2018

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.

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 tráfico 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.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2020.

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

RESUMEN

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.

Palabras clave: pontes; concreto armado; fadiga; vida útil; vigas.

1. INTRODUCCIÓN

Según Nowak y Fischer (2016, p. 297), la infraestructura de tráfico “no solo garantiza el rendimiento económico y la eficiencia, sino que también proporciona movilidad y calidad de vida a la población, contribuyendo así decisivamente a la riqueza de un país. ”

Según la Confederación Nacional de Transporte (CNT, 2018), el transporte de mercancías por carretera en Brasil corresponde al 61,1% y el transporte de pasajeros al 82,8% del total.

Los puentes y viaductos se ven directamente afectados por el predominio de la matriz de carreteras. Además de ser elementos muy importantes en los sistemas de transporte, garantizar el buen funcionamiento y la seguridad de estas estructuras tiene un impacto en el desarrollo socioeconómico de las ciudades vecinas e incluso de un país (Zhou; Chen, 2018; Bastidas-Arteaga, 2018).

Las diversas acciones bajo las cuales se someten los puentes y viaductos son cargas permanentes, como el peso propio y las cargas en movimiento representadas por los vehículos que viajan allí (Schneider; Marx, 2018). El volumen anual y el peso de los vehículos de carga ha crecido en las carreteras brasileñas y en todo el mundo (Pircher et al., 2011; Han et al., 2015; Deng et al., 2016; Han et al., 2017).

Este crecimiento ha generado varios problemas en los elementos constitutivos de puentes y viaductos. Entre los problemas estructurales a los que los puentes y los viaductos son susceptibles,

la fatiga merece atención (Pimentel et al., 2008; Baroni et al., 2009), ya que la variabilidad y el régimen de cargas móviles hacen que estas estructuras sean más propensas al estrés. sufrir de este fenómeno

Liu y Zhou (2018) refuerzan lo anterior al afirmar que "la investigación sobre el problema de la fatiga en las vigas de hormigón armado es de gran importancia para el diseño, mantenimiento y refuerzo de puentes" (Liu; Zhou, 2018, p. 3512).

En base a esto, utilizando datos de tráfico reales de una carretera de circunvalación, se estimará la vida de fatiga del refuerzo longitudinal de las vigas de tres puentes teóricos de hormigón armado de diferentes tamaños. Estos puentes se dimensionarán con el tren estándar brasileño TB 450 NBR 7188, que es un vehículo de peso total de 450 kN (Asociación Brasileña de Normas Técnicas, ABNT, 2013).

1.1 Metodología

Como referencia teórica se utilizarán artículos científicos digitales de revistas y congresos en idiomas portugués e inglés. Además, se utilizarán libros de referencia en el área, así como las normas pertinentes, por ejemplo, NBR 7188: 2013 y la norma brasileña NBR 6118: 2014 - Diseño de estructuras de hormigón - Procedimiento, NBR 6118: 2014.

Las evaluaciones numéricas realizadas aquí se realizarán mediante métodos analíticos utilizando las ecuaciones matemáticas descritas en el ítem 2 de este artículo. La vida de fatiga se determinará utilizando la metodología de Daño acumulado, y los momentos de flexión se determinarán en los medios de luz de hormigón armado utilizando el software de análisis de elementos finitos de Ftool (FTOOL, 2008). La elección de usar Ftool se debe al hecho de que es una herramienta gratuita y se usa ampliamente en el trabajo técnico y académico, ya sea como herramienta pedagógica o en el entorno científico.

2. FATIGA

Según NBR 6118, "la fatiga es un fenómeno asociado con acciones dinámicas repetidas, que puede entenderse como un proceso de cambios progresivos y permanentes en la estructura interna de un material sometido a la oscilación de tensiones derivadas de estas acciones" (ABNT, 2014, p. 193). Dado que la fatiga "es el deterioro progresivo de una estructura debido al crecimiento de grietas debido a variaciones de tensión (ciclos) resultantes de la aplicación de cargas repetidas, como las inducidas en los componentes del puente bajo cargas reales de vehículos pesados", estos ciclos pueden ser bajos. o alto (Habeeba et al., 2015, p. 2561).

La variación de voltaje viene dada por la diferencia entre los voltajes máximo y mínimo, expresándose esta variación por la ecuación (1):

$$\Delta\sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (1)$$

Donde: $\Delta\sigma$ es la variación de voltaje; $\sigma_{m\acute{a}x}$ es el voltaje máximo y $\sigma_{m\acute{i}n}$ es el voltaje mínimo.

La relación R entre tensiones se expresa por:

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (2)$$

Entre las diferentes metodologías adoptadas en el análisis de fatiga, se utilizará el principio de daño acumulado o la regla de Palmgren-Miner. Este enfoque se adoptará debido al hecho de que en la fatiga del puente se producen variaciones de tensión no uniformes (Santos, Pfeil, 2014). De acuerdo

con Pimentel et al. (2008) y Wang et al. (2013), el daño acumulado D relaciona linealmente el número de ciclos experimentados n con el número de ciclos necesarios para conducir a la estructura en la ruptura N :

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

Donde: D es el daño acumulado; n_i es la cantidad de ciclos experimentados; N_i es el número N de ciclos necesarios para que la estructura se descomponga por fatiga. Wang y col. (2013, p. 3) explican que D es "linealmente proporcional a cada variación de voltaje $\Delta\sigma_i$ ".

Freitas (2014, p. 24-25) comenta que "la aplicación del Método de Daño Acumulado tiene como principal ventaja su rigor, dada la ausencia de fórmulas de conversión y simplificación". El autor también agrega que "cuando el estudio se centra en un pequeño número de elementos, la aplicación de este método puede ser factible", como es el caso de este trabajo que analiza las vigas de hormigón armado (Freitas, 2014, p. 24- 25)

Branco y col. (1999) señalan las siguientes conclusiones sobre los resultados obtenidos para el daño acumulado D :

- $D > 1$: la vida de fatiga real de la parte estructural analizada es inferior a la prevista, por lo que la falla de fatiga estructural se producirá durante la vida útil estimada, lo que requiere medidas para retrasar y / o controlar dicho proceso;
- $D = 1$: la vida real de fatiga de la parte estructural analizada es la prevista;
- $D < 1$: la vida de fatiga real es más larga de lo esperado, por lo que la parte estructural tiene una vida útil o vida residual (VR).

A partir de la determinación del daño acumulado se puede determinar la vida de fatiga:

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

En este contexto, es relevante aclarar los conceptos de Vida funcional del trabajo y Vida del proyecto (VUP). Branco y Paulo (2012, p. 2) explican que "la caracterización de la vida de un puente debe comenzar definiendo su vida funcional, es decir, caracterizando la capacidad máxima de tráfico prevista" durante la vida funcional de las empresas estatales.

Los autores señalan además que "la vida funcional es a menudo menor que la vida estructural del puente" y, una vez que los problemas comienzan a ocurrir, estas estructuras deben someterse a un proceso de rehabilitación, "por ejemplo, aumentando su ancho o construyendo un nuevo puente cercano. "El que tiene problemas", para garantizar el mantenimiento de la calidad funcional del cruce (Branco, Paulo, 2012, p. 2).

De acuerdo con Branco et al. (2013, p. 5), el VUP "está asociado con las condiciones de seguridad y uso de la estructura, es decir, garantizar que no se produzca colapso, deformación excesiva, etc.". Branco y Paulo (2012) aclaran que los puentes y viaductos solían estar diseñados para un VUP de 50 años y que esta vez ahora tiene 75 años y en algunos países y depende de la importancia del trabajo de 100 a 120 años. Por lo tanto, la vida de fatiga está relacionada con la vida estructural del puente bajo el aspecto de fatiga.

Las llamadas curvas SN o curvas de Wöhler, también utilizadas en los cálculos de fatiga, son representaciones gráficas que relacionan el módulo de tensión (S) con el número de ciclos (N) necesarios para romper un material y se trazan a partir de él. datos experimentales (Pereira, 2006; Baroni, 2010).

2.1 Fadiga no concreto

NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 192) establece que la verificación de la fatiga del puente se realiza determinando la combinación frecuente de acciones, incluso si el fenómeno "está controlado por la acumulación del efecto nocivo de las solicitudes repetidas", es decir, por el proceso de daño acumulado. Para esto, la combinación frecuente de acciones viene dada por la ecuación 5.

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

Donde: $F_{d,ser}$ es el valor de cálculo de las acciones para las combinaciones del Estado límite de servicio (ELS); F_{gik} son las acciones permanentes; F_{q1k} es la acción variable principal; F_{qjk} son las acciones variables secundarias; ψ_1 es el factor de reducción de combinación frecuente; ψ_{2j} es el factor de reducción de combinación casi permanente, donde ψ_1 es 0.5 para la verificación del haz NBR 6118 (ABNT, 2014) no aborda las acciones de fatiga de alta intensidad, es decir, capaces de causar daños con menos de 20,000 ciclos, siendo solo las acciones de intensidad media y baja y el número de repeticiones de hasta 2,000,000. ciclos tratados por la norma. También de acuerdo con NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 193), "para la consideración del espectro de acciones, se admite que los vehículos con carga completa de hasta 30 kN pueden ser excluidos, en el caso de puentes de carretera".

Schlaflí y Bruhwiler (1998), Ray y Kishen (2014) y Ruiz et al. (2015) argumentan que el comportamiento mecánico de los elementos de hormigón armado está estrechamente relacionado con el comportamiento del marco. Por lo tanto, la ruptura del elemento está asociada con la ruptura del marco, que ocurre con mayor frecuencia con la flexión (Schlaflí; Bruhwiler, 1998, Ray; Kishen; 2014, Ruiz et al., 2015).

Maggi (2004, p. 8) explica que la fatiga en el concreto "comienza a escala microscópica y se asocia con una mayor apertura de grietas y una menor rigidez". Los factores que influyen en la resistencia del hormigón a la fatiga incluyen: "variación de tensión, historial de acción, propiedades del material, frecuencia de acción, gradiente de tensión y reacción" (Maggi, 2004, p. 8).

Zanuy y col. (2011) señalan que, en términos generales, los ciclos repetidos que actúan sobre un miembro estructural hacen que pierda rigidez debido a grietas y deformaciones excesivas. Esta pérdida de rigidez se debe a la degradación del hormigón en su región comprimida y a la reducción del llamado endurecimiento por tensión. Junges (2017, p. 91) explica que "el término rigidez a la tensión se refiere a la capacidad del concreto para resistir tensiones de tensión entre grietas debido a la transferencia de fuerzas de las barras al concreto a través de la adhesión".

La Figura 1 muestra la reducción en el endurecimiento de la tensión a medida que aumenta el número de ciclos, según las pruebas realizadas por Zanuy et al. (2011) Se destacan dos hechos relevantes sobre la figura: primero, a medida que aumenta el número de ciclos, más cerca de la Etapa II pura; y la reducción gradual en el endurecimiento de la tensión se debe a la pérdida de adhesión entre barras de acero y concreto. En la Figura 1, el término en inglés "Estado I" significa "Estadio I" y el término "Estado II" significa "Estadio II".

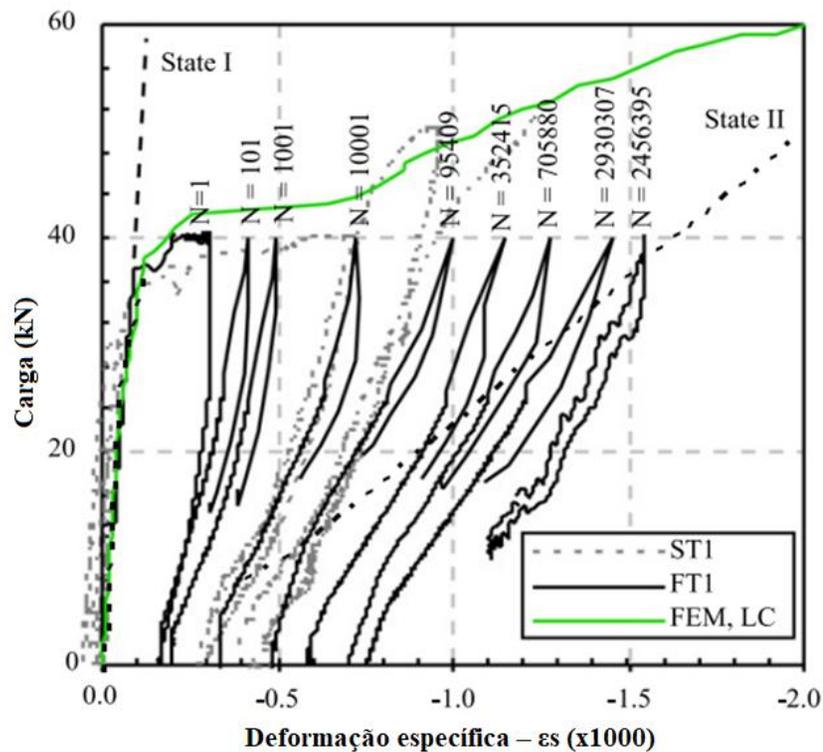


Figura 1. Falha de fadiga em um elemento de hormigão armado (Zanuy et al., 2011)

2.1 Fadiga na armadura

Schlaflí y Bruhwiler (1998) aclaran que la propagación de la fatiga de refuerzo se puede dividir en dos fases. En la primera fase, la propagación de grietas es estable, mientras que en la segunda fase hay una fractura frágil en la sección restante (Schlaflí; Bruhwiler, 1998). El manual ACI 215R-74 agrega además que la fatiga del cuadro es una preocupación importante para los diseñadores (ACI 1997).

Baroni (2010, p. 42) aclara que "los factores que influyen en la resistencia de las barras de acero a la fatiga son: tensión mínima", diámetro, curvatura y costura de las barras, tipo de viga. Por lo tanto, la vida de fatiga en el acero se puede estimar a través de la ecuación (Santos, Pfeil, 2014, p. 41):

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

N_{fad} vale 10^6 ; $\Delta\sigma_{fad}$ es igual a $\Delta f_{sd,fad}$; m es la pendiente del tramo, según la figura 2 (Junges, 2017), dada por NBR 6118: 2014. Los valores de $\Delta f_{sd,fad}$ se dan de acuerdo con la Tabla 23.2 de NBR 6118: 2014. Las tensiones máximas y mínimas en el acero pueden determinarse mediante las ecuaciones:

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

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

Donde: $\sigma_{s,m\acute{a}x}$ es la tensi3n de compresi3n m\acute{a}xima en acero; $\sigma_{s,m\acute{i}n}$ es la tensi3n de compresi3n m\acute{i}nima en el acero; x_i es la distancia desde la l\acute{i}nea neutral hasta la parte inferior; α_E es la relaci3n entre el m3dulo de elasticidad del acero y el hormig3n.

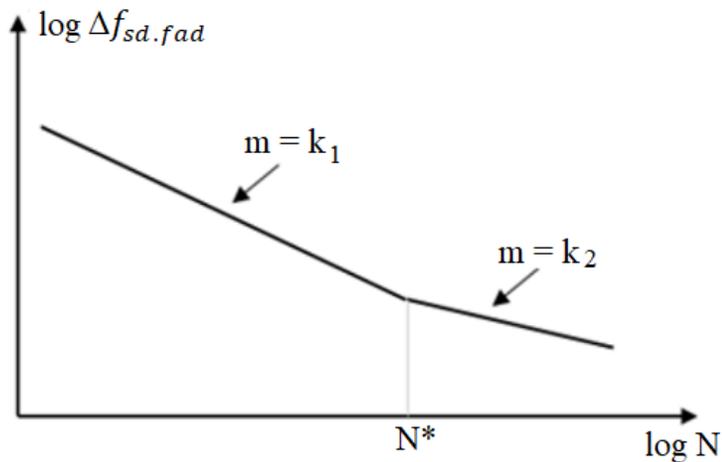


Figura 2. Curvas de resistencia caracteristicas de fatiga (curvas S-N) para acero (Junges, 2017)

Como se utilizar\acuta el refuerzo pasivo en este trabajo, la curva S-N puede asumir dos valores, $k_1 = 9$ y $k_2 = 5$. A partir de esto, las constantes $Const_1$ y $Const_2$ se pueden determinar para ambas curvas a trav\acuta de las siguientes ecuaciones:

$$Const_1 = (\Delta\sigma_{sd,fad})^5 \cdot N \tag{9}$$

$$Const_2 = (\Delta\sigma_{sd,fad})^9 \cdot N \tag{10}$$

Para diferentes valores de $\Delta f_{sd,fad}$, para 10^6 ciclos, tenemos las constantes de acuerdo con la tabla 1.

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

$\Delta f_{sd,fad,min}$ (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

Fuente: Propia del Autor (2019).

Por lo tanto, siempre que $\Delta\sigma_s$ sea mayor que $\Delta f_{sd,fad}$, las \carea de acero deben multiplicarse por el coeficiente de fatiga k.

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

2.3 Fatiga en puentes de concreto armado.

Zhang y col. (2012) señalan que el crecimiento económico que ha experimentado China en los últimos años contribuye directamente al aumento significativo del tráfico de vehículos pesados en las carreteras del país. Este hecho implica la resistencia a la fatiga de puentes y pasos elevados. A través de los estudios realizados, los autores obtuvieron algunas conclusiones. Primero, afirman que el principio de Daño Acumulado, o la regla Palmgren-Miner, es adecuado y un "método práctico para determinar el daño por fatiga" para vigas simplemente soportadas (Zhang et al., 2012, p. 793).

Los autores también concluyeron que "se recomienda que el coeficiente de daño por fatiga se actualice al nuevo" Código de carga móvil del puente de carretera chino para puentes con tramos de menos de 20 m (Zhang et al., 2012, p. 793)

Rossigali y col. (2015, p. 124) informan que existe una creciente preocupación y la búsqueda de modelos de carga más compatibles con la realidad "para el diseño de puentes de carreteras en Brasil" y que estos modelos "se están desarrollando con la creación de una base de datos. tráfico real, simulaciones de tráfico, modelado numérico-analítico de interacción dinámica y extrapolaciones de la estructura del vehículo ". Considerando este hecho, los autores analizan puentes de concreto reforzado de pequeño tramo con carriles individuales y dos carriles bajo diferentes escenarios de tráfico.

Los autores emplearon técnicas de confiabilidad estructural y distribuciones de probabilidad para analizar el flujo del vehículo. Al final, concluyeron que el modelo de carga actual propuesto por NBR 7188: 2013, "no es adecuado para representar reclamos reales y en algunos casos puede estar en contra de la seguridad" (Rossigali et al., 2015, p. 124)

De acuerdo con Alencar et. al (2016, p. 2), la imposición en la estructura de nuevas condiciones de tráfico asociadas con el comportamiento de fatiga del material puede conducir a daños estructurales con diferentes niveles de gravedad, y a medida que aumenta la magnitud de las cargas transportadas, problema se vuelve aún más relevante ".

Wang y col. (2015) y Xin et al. (2017) también señalan que las autoridades y los ingenieros estructurales han prestado más atención al proceso de fatiga resultante del aumento de vehículos pesados en las carreteras y su velocidad.

Almeida y Fortes (2016), Mota et al. (2018) y Camargo et al. (2018) demuestran que las solicitudes del tráfico real de vehículos más reciente en las carreteras brasileñas pueden ser más altas que las calculadas por TB 450.

Trabajos más recientes, como el desarrollado por Deng y Yang (2018), se han ocupado de la formulación de métodos para determinar la asignación y los límites legales de peso de los vehículos pesados teniendo en cuenta el daño por fatiga acumulado en los puentes. Los autores obtuvieron resultados con respecto al daño por fatiga para diferentes variaciones de estrés en sus estudios e informan que dichos resultados "se pueden usar para determinar la carga límite para puentes nuevos y viejos" (Deng; Yan, 2018, p. 7).

Braz y col. (2018, p.1; 4) analizaron "cuatro modelos de puente de hormigón armado de dos vigas a la luz de los estándares brasileños y europeos" y los cuatro puentes son "hiperestáticos, con 50 MPa fck, acero CA-50 y luces principales de 20 m ". Al analizar y comparar los resultados, los autores encontraron que:

El tratamiento normativo europeo demostró ser más conservador que el brasileño con respecto a la fatiga y el dimensionamiento del refuerzo. Este comportamiento es un reflejo del rigor regulatorio europeo que adopta vehículos de diseño y coeficientes de aumento de carga específicos a la fatiga,

así como un solo valor de resistencia a la fatiga para diferentes medidores de refuerzo (Braz et al., 2018, p. 10).

3. BASE DE DATOS DE TRÁFEGO

Para llevar a cabo las verificaciones y los cálculos relevantes para el proceso de fatiga, se utilizarán los datos de volumen de tráfico anual de 2009 a 2017, proporcionados por CCR RodoAnel, que gestionará 29.30 kilómetros del tramo occidental de la carretera de circunvalación de Mario. Covas, que forma parte de las carreteras Raposo Tavares, Castello Branco, Anhanguera, Bandeirantes y Régis Bittencourt "(CCR RODOANEL, 2018). Los datos proporcionados se refieren al número anual de vehículos de carga de 2 a 6 ejes, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Tráfico anual de vehículos comerciales

Ano	Comercial de 2 ejes	Comercial de 3 ejes	Comercial de 4 ejes	Comercial de 5 ejes	Comercial de 6 ejes
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

Fuente: CCR RODOANEL (2018).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Para los cálculos y la verificación de la fatiga, se utilizó un modelo teórico con un sistema estructural, un puente con dos vigas soportadas por tramos L de 10 m, 15 m y 20 m, respectivamente llamados V10, V15, V20. La elección de puentes compuestos por solo 2 vigas se debe al hecho de que Brasil todavía tiene una gran cantidad de OAE antiguas construidas con 2 vigas. Según datos del Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte (DNIT, 2017), el 12.95% tiene hasta 10 m y el 16.40% de 10.01 a 20 m. Además, el 86,28% de los puentes y viaductos brasileños tienen un ancho de hasta 13 m (DNIT, 2017). El "Manual de inspección de puentes de carretera" (DNIT, 2004) aclara que los puentes y viaductos diseñados después de 1985 deben tener una sección transversal con un ancho total de 12,80 m y un ancho de 12,00 m. En base a esto, se adoptará la sección transversal de 12,80 m para los tres tramos analizados.

Se suponen 2 carriles de tráfico para todos los puentes analizados. Además, siguiendo las pautas del "Manual de Diseño de Obras Especiales" (DNER, 1996), cada tira tendrá una dimensión adoptada de 3.60 m, totalizando 7.20 m de ancho de vía y 2.40 m cada uno de los hombros. La Figura 3 muestra la sección transversal de los tres puentes.

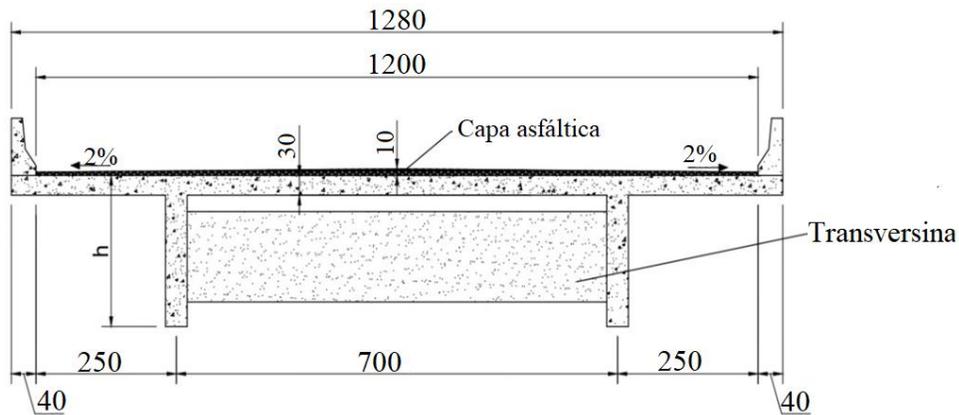


Figura 3. Sección transversal del puente (dimensiones en centímetros) (Autor propio, 2019).

Hay vigas transversales intermedias colocadas cada 5 m con un ancho constante de 0,30 m y una altura de 0,80 m. Los transversales no están conectados a las losas, por lo que solo tienen la función de bloqueo. Debido a la simplificación de los cálculos, se adoptaron las siguientes hipótesis: la losa del puente no suele ser de espesor constante, pero en este trabajo el espesor de la losa se adoptará como constante; Se adoptará un espesor constante para la cubierta de asfalto de 10 cm. La sección "T" de las vigas utilizadas se muestra en la figura 4.

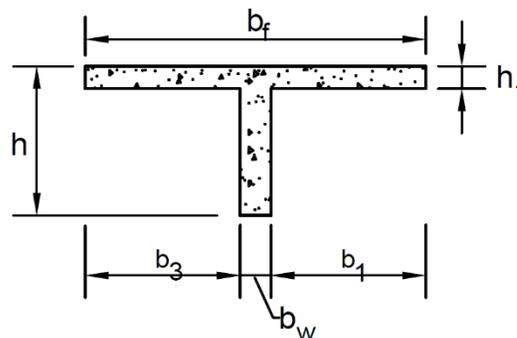


Figura 4. Sección transversal de vigas (Autor propio, 2019).

La Tabla 3 muestra los valores adoptados para las secciones transversales de los puentes bajo análisis y la Tabla 4 las propiedades de los materiales empleados.

Tabla 3. Valores de dimensión de la sección transversal de la viga del puente

Puente	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

Tabla 4. Propiedad de los materiales.

Concreto		Acero	
f_{ck} (MPa)	f_{yk} (MPa)	f_{yk} (MPa)	E_s (MPa)
35,0	500,0	500,0	210.000

4.1 Trem-tipo normativo

Con respecto al posicionamiento del TB 450, NBR 7188: 2013 aclara que la carga móvil puede asumir cualquier posición a lo largo de toda la sección transversal del puente donde hay un carril de carretera, siempre que las ruedas estén en la posición más desfavorable ", incluyendo Hombro y bandas de seguridad ". La carga distribuida también debe aplicarse en la posición más desfavorable, "independientemente de los carriles de carretera" (ABNT, 2013, p. 4). La Figura 5 muestra el vehículo TB 450 colocado en la sección más desfavorable de la sección transversal.

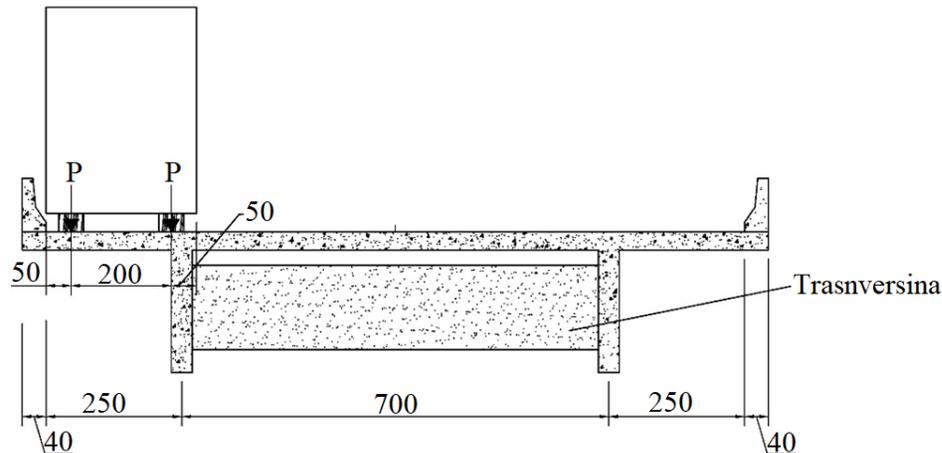


Figura 5. Vehículo de sección transversal tipo TB 450, para la situación de máxima tensión en la viga izquierda de la figura (dimensiones en centímetros) (Autor propio, 2019).

Esta posición crítica se determina utilizando la técnica de líneas de influencia y un modelo simplificado ya establecido que se puede ver en numerosas publicaciones como Carvalho (2017). En este caso, se utiliza la línea de influencia de la reacción de soporte, por lo tanto, considerando el tren tipo en la posición que conduce a la reacción más grande de la viga estudiada, se alcanza el conjunto de cargas llamado tren tipo longitudinal (TTL). , con lo que se determinarán los esfuerzos de momento flector de las vigas.

Con respecto a la determinación de los esfuerzos, en este caso el momento flector, proveniente de TB 450, se hacen las siguientes consideraciones:

- a. Siguiendo las pautas de NBR 6118: 2014, ítem 23.5.3, la combinación de acciones a ser consideradas será frecuente. Por lo tanto, los momentos máximos y mínimos que surgen de las combinaciones de cargas permanentes y móviles en el medio del tramo de la viga estarán dados por la combinación frecuente de acciones;
- b. (b) Se considerará el diámetro de las barras de acero de 25 mm.

4.2 Vehículos reales

Los vehículos que viajan durante la vida útil del puente pueden asumir varias posiciones en su sección transversal, lo que en última instancia genera diferentes esfuerzos en las vigas laterales de acuerdo con la posición en la que se encuentra la carga en movimiento.

Toledo (2011) evaluó el posicionamiento de vehículos reales en autopistas en relación con los carriles de tráfico. El autor concluye que "el análisis con el vehículo centrado en el carril es una buena aproximación para el cálculo de la vida de fatiga de la estructura, ya que los resultados obtenidos para este caso fueron más desfavorables que para el vehículo excéntrico" (Toledo, pp. 63, 2011).

"Eurocódigo 1: Acciones en estructuras - Parte 2: Cargas de tráfico en puentes" (2002) destaca que para la evaluación transversal de las cargas verticales de vehículos reales que viajan en las carreteras, la mitad de ellos viaja centrada en el carril de tránsito y el resto son distribuir

simétricamente a lo largo del carril, como lo muestra la distribución de frecuencia de posicionamiento transversal de vehículos en un puente que se muestra en la figura 6 (EUROCODE 1, 2002).

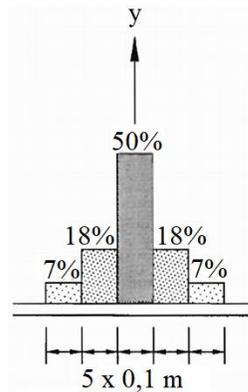


Figura 6. Distribución de frecuencia del posicionamiento transversal del vehículo en el puente

Este documento adoptará las siguientes consideraciones en el modelo de carga móvil de vehículos reales:

- El procedimiento para determinar el TTL máximo es el mismo que para el vehículo TB 450; sin embargo, los vehículos de carga reales se colocan como se muestra en la figura 7;
- En sentido transversal, los vehículos tendrán las mismas dimensiones que se muestran en la figura 7;
- el 100% de los vehículos se colocarán en el centro del carril de tránsito;
- (d) se considerará solo un vehículo de carga que viaja por el puente;
- El momento flector y otros cálculos tendrán en cuenta las cargas debidas a los vehículos de carga reales y las cargas distribuidas de acuerdo con NBR 7188 (ABNT, 2013), que representan los vehículos pequeños que pueden seguir el paso del vehículo de pasajeros.
- Los momentos que surgen de los vehículos de carga reales no están ponderados por el Factor de reducción de combinación frecuente para el estado límite de servicio (ELS) ψ_1 , ya que NBR 6118 (ABNT, 2014) no prevé dicho procedimiento para cargas reales.
- Cada vehículo genera un ciclo de estrés, que se utilizará para determinar la vida de fatiga mediante el Método de daño acumulado.

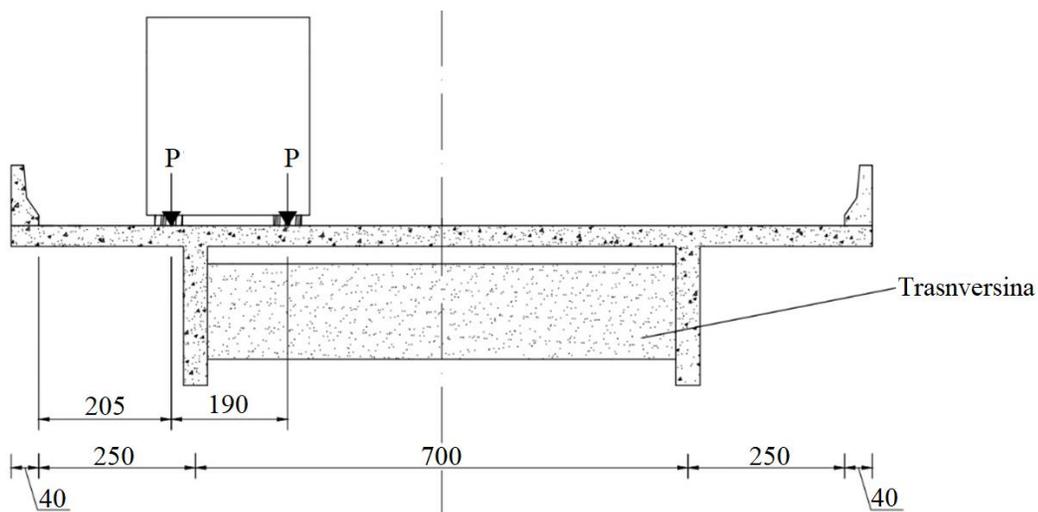


Figura 7. Posição transversal adotada para os veículos de carga (cotas em centímetros) (Próprio Autor, 2019).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Utilizando el vehículo normativo TB 450 y vehículos de 2 a 6 ejes, se calcularon los momentos máximos de flexión en el medio de la viga para los tres tipos de puentes. Es de destacar que los valores calculados para las cargas en movimiento se multiplican por el coeficiente de impacto (CI) que varía según el tamaño del tramo. La Tabla 5 presenta los momentos de flexión calculados debido a su propio peso y las cargas móviles para las estructuras de dos vías.

Tabla 5. Momentos de flexión calculados para vigas bidireccionales

Momentos de flexión en el medio de la brecha (kN.m)								
Viga	CI	Peso Propio	TB 450	Comercial de 2 ejes	Comercial de 3 ejes	Comercial de 4 ejes	Comercial de 5 ejes	Comercial de 6 ejes
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

Al determinar el número de ciclos de N a fatiga en el acero, es necesario determinar el valor de "m" de la curva S-N. Como las variaciones de tensión calculadas en el acero son menores que la variación de tensión límite para el diámetro de 25 mm, que es 17.5 kN / cm², se utiliza el valor de m = 9.

La Figura 8 muestra la vida consumida de cada año respectivo analizado para cada puente. Además, se presentan las estimaciones de la tabla 6 de vidas útiles para la fatiga en el refuerzo longitudinal, que muestran el consumo de resistencia a la fatiga durante los nueve años considerados y el tiempo requerido para alcanzar el consumo del 100%. Es de destacar que los resultados presentados no consideran el daño por fatiga o cualquier otro daño anterior, solo durante los 9 años de datos considerados; es decir, hay consideración como si los puentes fueran nuevos.

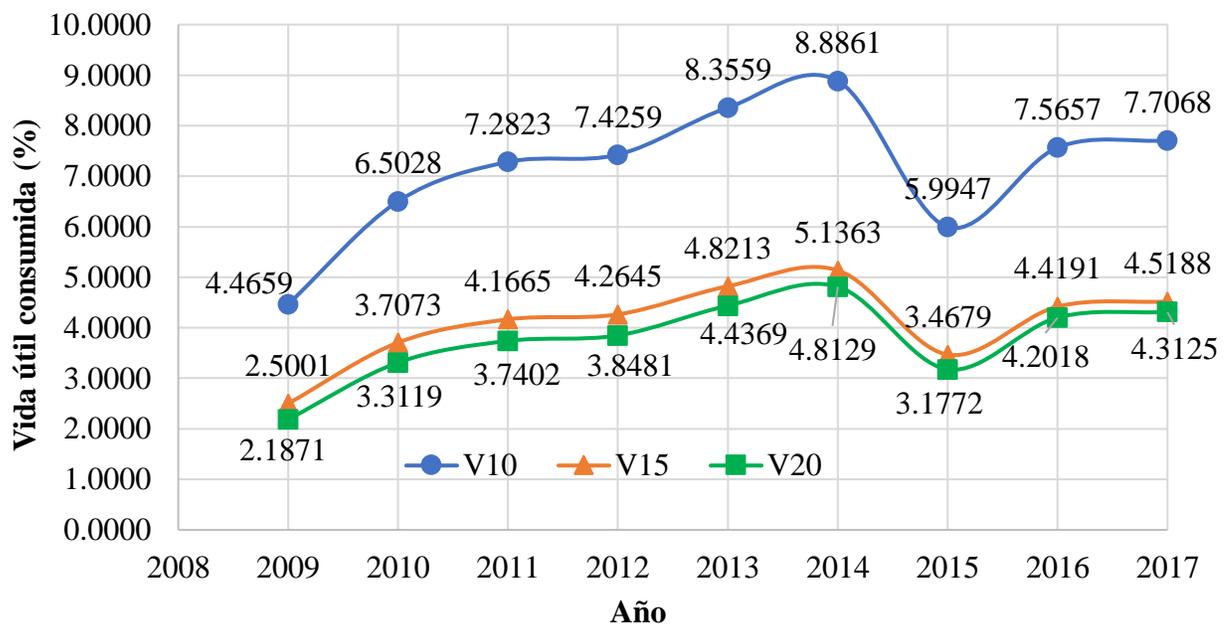


Figura 8. Consumo de la vida útil del refuerzo longitudinal (Autor, 2019).

Tabla 6. Vida útil del acero

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

Como se trata de un alto flujo de vehículos por año, con un tráfico promedio anual de 16,200,000, los tres puentes analizados presentaron una vida útil a la fatiga de refuerzo longitudinal de menos de 30 años. Además, se verifica que el consumo del 100% de la resistencia a la fatiga en el refuerzo longitudinal varía según el espacio, y cuanto menor es el espacio, más corta es la vida útil de la fatiga.

Para aumentar la vida útil del acero, se sugiere una o algunas de las siguientes posibilidades: 1) Aumentar el número de vigas; 2) Cambiar la sección transversal de los puentes analizados; 3) Modificar las dimensiones de la sección transversal de las vigas; 4) Aumentar la resistencia a la compresión característica del hormigón; 5) Revisar los procedimientos para la verificación y / o diseño de fatiga de vigas de puentes de carreteras presentes en las normas brasileñas.

6. CONCLUSIONES

Con base en los análisis realizados en este artículo, es posible concluir que aunque el vehículo normativo TB 450 presenta momentos de flexión en el tramo medio mayores que los presentados para los vehículos reales considerados aquí, en los puentes analizados aquí, la gran cantidad de vehículos en la sección analizada requiere atención al Consumo rápido de resistencia a la fatiga.

El tiempo requerido para alcanzar el 100% del consumo de vida de fatiga en el refuerzo longitudinal en los tres puentes analizados tiene valores diferentes, pero todos tendrían una vida de fatiga menor a 30 años. Tal resultado es crítico y preocupante, especialmente si se tiene en cuenta un VUP de 50 a 80 años.

Por lo tanto, es necesario adoptar algunas medidas para aumentar la vida de fatiga de estos puentes de hormigón armado de dos vigas, como emplear un mayor número de vigas por cubierta y / o modificar la sección. sección transversal de las vigas.

Además, se debe considerar la alta edad de los puentes y viaductos brasileños, ya que los análisis y cálculos realizados aquí tienen en cuenta que los puentes son nuevos, cuyos daños son solo los presentados durante los nueve años analizados. Por lo tanto, se debe prestar especial atención a estas estructuras envejecidas.

7. AGRADECIMENTOS

Un agradecimiento especial a la Coordinación de Mejoramiento del Personal de Educación Superior (CAPES), vinculada al Ministerio de Educación de Brasil, por su apoyo a través de la beca otorgada al autor correspondiente, lo que permite el desarrollo más beneficioso de este trabajo. También estamos agradecidos con CCR RodoAnel por su amabilidad al proporcionar datos sobre la cantidad de vehículos pesados, que fueron fundamentales para la realización de este artículo, y el Programa de Posgrado en Ingeniería Civil (PPGECiv) de la UFSCar Apoyo otorgado.

8. REFERENCIAS

- 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 en la construcción 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.revistaeeep.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](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/download/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>