

Modeling the maximum service load of mobile supports used in the General Rafael Urdaneta bridge

**Andrés E. Queipo¹, José L. Romero², David G. Olivares³,
Antonio R. Sarcos³, Néstor V. Queipo²**

¹Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nueva Esparta. Código postal 1061.

Tlf: (0212) 9852536 Fax (0212) 9871412. andresqueipo@gmail.com

²Instituto de Cálculo Aplicado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.
Apartado 4011-A-526. Telex LUZ-R-VE-64287. Tlf.: (0261) 4128701 Fax (0261)7512214.
{jlromero, nqueipo} @ica.luz.ve

³Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería,
Universidad del Zulia. Apartado 4002-A. Tlf.: (0261) 4128701.
davidguillermo83@gmail.com, asarcosp@yahoo.com

Abstract

Key elements for preserving the structural integrity of General Rafael Urdaneta bridge (PGRU) are its mobile supports. These supports were designed in the 50's with simplified analytical models and other limitations, so it is unknown their maximum service loads. For addressing this issue, in this work: i) a numerical model is presented for the structural analysis of PGRU-type mobile support, which it is validated with analytical results from indirect tensile tests, and ii) a linear regression model is used to estimate the maximum service load as a function of design variables (e.g., properties and geometry). The linear regression model was obtained from one- hundred computational simulations. This model achieved an excellent fit (R^2 greater than 94%). The maximum service load values of the original design, the simulated ones ($P_{\max} = 1,135$ kN), and those estimated with the regression model ($\hat{P}_{\max} = 1,044.5$ kN) are consistent with the fact that the PGRU mobile supports currently experience loads greater than 981 kN without significant evidence of damage on the steel pipe or in the concrete cylinder.

Keywords: mobile supports, Gerber beam, indirect tensile test, General Rafael Urdaneta bridge, structural analysis, finite elements, linear regression.

Modelado de la carga máxima de servicio de apoyos móviles del tipo utilizado en el puente General Rafael Urdaneta

Resumen

Un elemento fundamental para preservar la integridad estructural del puente General Rafael Urdaneta (PGRU) lo constituyen sus apoyos móviles. El diseño de estos apoyos fue realizado en la década de los 50's con modelos analíticos simplificados y otras limitaciones y, como resultado, no se conoce a ciencia cierta las cargas máximas de servicio que estos apoyos pueden soportar. En este trabajo, para determinar las citadas cargas se construyó: i) un modelo numérico para el análisis estructural de apoyos móviles del tipo PGRU validado con resultados analíticos de ensayo de tracción indirecta, y ii) un modelo de regresión lineal para estimar la carga máxima de servicio en función de variables de diseño (e.g., propiedades y con-

figuración geométrica). El modelo de regresión lineal fue construido a partir de un conjunto de 100 (cien) ensayos computacionales lográndose un excelente ajuste (R^2 mayor al 94%). Los valores de carga máxima de servicio para el diseño original del apoyo móvil, simulado ($P_{\max} = 1.135$ kN) y estimado con el modelo de regresión ($\hat{P}_{\max} = 1.044,5$ kN) son consistentes con el hecho de que los apoyos en el PGRU soportan actualmente cargas mayores a 981 kN sin evidencias significativas de daños en el tubo de acero o el cilindro de concreto.

Palabras clave: apoyo móvil, viga Gerber, ensayo de tracción indirecta, puente General Rafael Urdaneta, análisis estructural, elementos finitos, regresión lineal.

Introducción

El puente General Rafael Urdaneta (PGRU) o puente sobre el Lago, como es llamado localmente, cruza la parte más angosta del Lago de Maracaibo, en el Estado Zulia, al noroeste de Venezuela, y conecta la ciudad de Maracaibo con el resto del país. Se estima que diariamente circulan por el puente más de 40.000 vehículos, por lo que su servicio confiable es importante para el occidente del país, la región andina, el Sur del Lago y, en general, para toda Venezuela. Geopolíticamente es neurálgico: a través de su estructura se moviliza el transporte pesado que permite el intercambio comercial entre la Costa Occidental y la Oriental del Lago de Maracaibo y se trasladan cientos de trabajadores de la industria petrolera (la principal fuente de ingreso del país). Un elemento fundamental en la estructura del PGRU lo constituyen los apoyos móviles, los cuales permiten el movimiento de las vigas Gerber debido a la expansión o contracción térmica de éstas, manteniendo su integridad estructural. Estos apoyos están conformados por un tubo de acero, un cilindro interno de concreto reforzado por cabillas dispuestas transversalmente a lo largo de la longitud del apoyo (Figura 1).

El diseño de estos apoyos fue realizado en la década de los 50's con modelos analíticos simplificados usando factores de seguridad conservadores, además, existe incertidumbre en relación a las propiedades del concreto y, en la mayoría de los casos, la geometría de los apoyos actualmente difiere de la de diseño debido a la acción de la corrosión. Como resultado, no se conocen a ciencia cierta las cargas máximas de servicio que estos apoyos pueden soportar (problema de interés). En el contexto de este estudio, se entiende por carga máxima de servicio el valor mínimo de la carga que ocasiona que los esfuerzos en el apoyo móvil excedan el límite elástico del concreto o del acero [1].

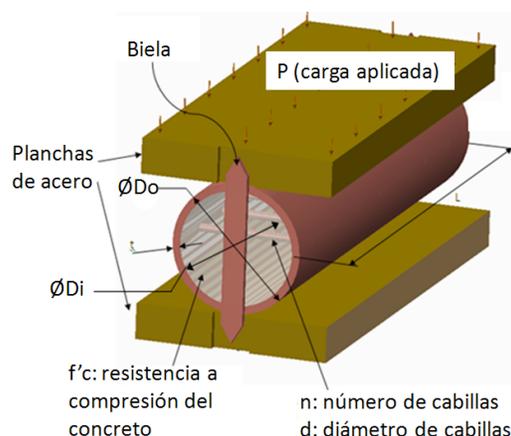


Figura 1. Configuración geométrica del sistema apoyo móvil – planchas del PGRU.

Existen contribuciones importantes en el área estructural en el PGRU; así, por ejemplo, en el análisis y evaluación de pilas [2-9] y tensores de ménsulas [6]; y en la reparación, inspección y evaluación de los cables de suspensión [5, 7, 8, 10]. Trabajos recientes se han enfocado en simulaciones numéricas y ensayos experimentales de tracción indirecta en cilindros de concreto [11, 12]. Nótese que no se reportan contribuciones significativas en el análisis estructural de apoyos móviles del tipo PGRU.

En este trabajo, la carga máxima de servicio se estima: i) para apoyos móviles del tipo PGRU-especificación original, a través de un modelo numérico para el análisis estructural utilizando la herramienta PTC Creo 2.0 [13]; y ii) para apoyos móviles del tipo PGRU-variantes, utilizando un modelo estadístico de regresión lineal construido a partir de experimentos computacionales (modelos numéricos). El modelo de regresión lineal está expresado en función de las variables de diseño: resistencia a la compresión del concreto (f'_c), número y diámetro de cabillas de refuerzo (n y d , respectivamente), diámetro externo (D_o) e interno del tubo de acero (D_i).

Metodología

La metodología incluye los siguientes pasos: A. Definición del modelo numérico del sistema apoyo móvil del PGRU; B. Generación de diseños de experimentos computacionales; C. Determinación de la carga máxima de servicio para cada experimento; y D. Análisis estadístico del comportamiento de la carga máxima de servicio.

A continuación se ofrecen detalles de cada uno de los pasos:

A. Definición del modelo numérico del sistema apoyo móvil del PGRU

Parámetros fijos y variables de diseño.

Los límites de las variables de diseño fueron seleccionados considerando dimensiones originales del rodillo PGRU, dimensiones comerciales y a juicio de especialistas en el área (Tabla 1).

Propiedades del concreto dependientes de f'_c

Resistencia a la tracción indirecta [15]:

$$f_{ti} = 0,2292(f'_c)^{0,7} \quad (1)$$

Módulo de elasticidad [16]:

$$E_c = 4.729,5\sqrt{f'_c} \quad (2)$$

Suposiciones en el análisis estructural.

- Se asumió al concreto como un material homogéneo e isotrópico.
- Completa adherencia entre las cabillas y el concreto, y entre el concreto y el tubo de acero. Las cabillas fueron distribuidas uniformemente a lo largo del apoyo móvil, y se consideraron soldadas en los extremos con la superficie interna del tubo de acero.
- Contacto no lineal geométrico entre la plancha de acero y el apoyo móvil.
- Se utilizó un cuarto del sistema apoyo móvil-plancha en su sección transversal, debido a la simetría geométrica y de distribución de esfuerzos existentes (Figura 2).
- Restricciones en el modelo fueron del tipo rodillo; ubicadas en el plano frontal y los planos de simetría lateral e inferior (Figura 2).
- Se consideraron dos esfuerzos admisibles en el concreto: i) de compresión, igual a $0,5.f'_c$ [17], considerando que al exceder este punto la respuesta esfuerzo-deformación es no lineal, debido a que se desarrollan grietas entre el agregado y la pasta y ii) de tracción indirecta, igual a la resistencia de tracción indirecta del concreto (f_{ti}). El esfuerzo admisible del acero fue la resistencia a la fluencia f_y .

Tabla 1
Parámetros y las variables de diseño en el apoyo móvil del tipo PGRU [14]

Parámetros y variables	Simbología (unidades)	Valor original sistema de apoyo PGRU	Límite inferior	Límite superior
Resistencia a la fluencia del acero	f_y (MPa)	381,6	-	-
Relación de Poisson del acero	ν_s	0,27	-	-
Módulo de Elasticidad del acero	E_s (MPa)	200.000	-	-
Relación de Poisson del concreto	ν_c	0,18	-	-
Longitud del apoyo móvil	L (mm)	750	-	-
Dimensiones de la plancha de acero	$L_1 \times L \times b$ (mm)	150×750×55	-	-
Diámetro externo del tubo de acero	D_o (mm)	212	209	219
Diámetro interno del tubo de acero	D_i (mm)	184	173	206
Número de cabillas de refuerzo	n	7	0	10
Diámetro de la cabilla de refuerzo	d (mm)	12,7	9,525	19,05
Resistencia a la compresión del concreto	f'_c (MPa)	98,1	78,5	117,7

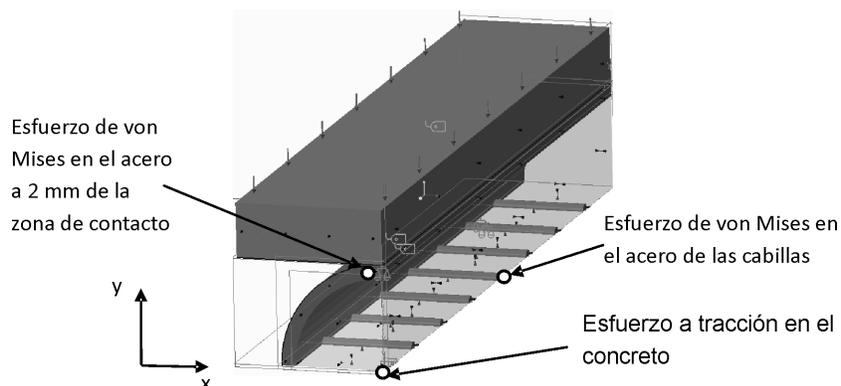


Figura 2. Modelo geométrico del sistema de apoyo móvil implementado en PTC Creo 2.0.

- No se consideró como criterio de falla el esfuerzo de contacto generado en el tubo de acero del apoyo móvil, ya que en la mayoría de los casos reales este esfuerzo, aunque supera la resistencia a la fluencia del material, no afecta la integridad estructural de la pieza [18], pues este esfuerzo está concentrado en una pequeña área del tubo de acero.
- Las mediciones de los esfuerzos en el modelo numérico del apoyo móvil se realizaron de la siguiente forma: i) el de compresión se tomó como el máximo esfuerzo en Y en el concreto [19], ii) el de tracción se tomó como el esfuerzo en X medido en el centro de la circunferencia del cilindro de concreto en el plano frontal [19] (Figura 2), iii) el esfuerzo de von Mises en el acero se midió en dos puntos: a) en el tubo de acero en la mitad del espesor a 2 mm del plano de simetría vertical y b) en la superficie de la mitad de las cabillas (Figura 2).
- La longitud máxima de los elementos finitos tetraédricos de la malla del modelo numérico del sistema apoyo móvil fue de 50 mm. Este último valor fue seleccionado de un estudio de convergencia de malla considerando elementos con longitud máxima de 20, 30, 40, 50, 60 y 70 mm, siendo el valor de 50 mm el mejor balance entre el pronóstico de los esfuerzos y tiempo computacional; detalles están disponibles en Queipo [20].

Validación del modelo numérico

El modelo numérico fue validado comparando los resultados de esfuerzos a tracción y compresión en un cilindro de material elástico so-

metido a un ensayo de tracción indirecta con los obtenidos por modelos analíticos desarrollados por Kennedy [19, 21]. El cilindro de concreto considerado presenta las siguientes características: diámetro $D_o=212$ mm y Longitud $L=750$ mm, con dimensiones de la plancha y propiedades del concreto especificadas en la Tabla 1 en la columna valor original sistema de apoyo PGRU. Los resultados mostraron una excelente correlación en la distribución de esfuerzos a la compresión y a la tracción en el eje X y eje Y con errores entre 1% y 5%.

Cabe destacar que la carga máxima de servicio de los apoyos móviles existentes en el PGRU simulada con el modelo numérico desarrollado es ~ 1.135 kN, lo que es consistente con el hecho de que estos apoyos soportan cargas mayores a 981 kN [14] sin evidencias significativas de daños en el tubo de acero o el cilindro de concreto.

B. Generación de diseños de experimentos computacionales

Para establecer el tamaño del conjunto de entrenamiento se utilizó el criterio propuesto por Jones [22] que sugiere utilizar diez (10) veces el número de variables. Con este criterio para las cinco variables de diseño definidas anteriormente, se necesitarían 50 experimentos computacionales, pero para disminuir el error se duplicó este número a 100 ensayos (conjunto de entrenamiento) y adicionalmente se generó otro diseño de 30 ensayos (conjunto de prueba) que se utilizó para validar el modelo estadístico de regresión de la carga máxima de servicio.

Los conjuntos de entrenamiento y de prueba se generaron utilizando el método de hipercubola-

tino [23] implementado en el comando `lhsdesign` de la herramienta computacional MATLAB®.

C. Determinación de la carga máxima de servicio para cada experimento

El procedimiento utilizado en este paso se muestra en la Figura 3.

D. Análisis estadístico del comportamiento de la carga máxima de servicio

Utilizando los ensayos computacionales (incluyendo cargas máximas de servicio simuladas) en el conjunto de entrenamiento se calcularon y analizaron estadísticamente los coeficientes del modelo regresión lineal, aplicando el comando regresión de la herramienta análisis de datos del programa EXCEL®. El modelo de regresión fue validado utilizando el conjunto de prueba y las medidas de desempeño fueron el coeficiente de determinación R^2 y el error porcentual relativo entre la carga máxima de servicio estimada y la simulada.

Resultados y discusión

Esta sección discute en relación a las cargas máximas de servicio: las condiciones (tracción o compresión) que gobiernan su estimación, influencia de las características del apoyo móvil y la significación estadística y efectividad del modelo de regresión lineal identificado.

Condiciones que gobiernan la estimación de la carga máxima de servicio

La estimación de la carga máxima de servicio estuvo gobernada en la mayoría (~73%) de los diseños de apoyos móviles (conjuntos de entrenamiento y de prueba) por el esfuerzo admisible a la compresión (Figura 4). Nótese que cuando las cargas son inferiores a 1.100 kN se alcanzan primero los esfuerzos admisibles a la compresión y, a partir de 1.400 kN, los de tracción.

Las características del apoyo móvil (Figura 5) que afectan más significativamente la estimación de la carga máxima de servicio son: el espesor ($D_o - D_i$) del tubo de acero, el volumen y la resistencia a la compresión del concreto. Es importante destacar que la carga máxima de servicio simulada se incrementa al aumentar el espesor (Figura 5a) y al disminuir el volumen de concreto (Figura 5c).

Por otro lado, los diseños exceden el esfuerzo admisible a la compresión a partir de ~20,5 dm³ de volumen de concreto (Figura 5c), o de ~9 dm² de área de acero de refuerzo (Figura 5d).

Modelo de regresión de la carga máxima de servicio: significación estadística y validación

El modelo de regresión \hat{P}_{max} (kN) identificado es:

$$\hat{P}_{max} = 28,911D_o - 31,944D_i - 2,52d + 7,07f'_c + 1,385n + 121,399 \quad (3)$$

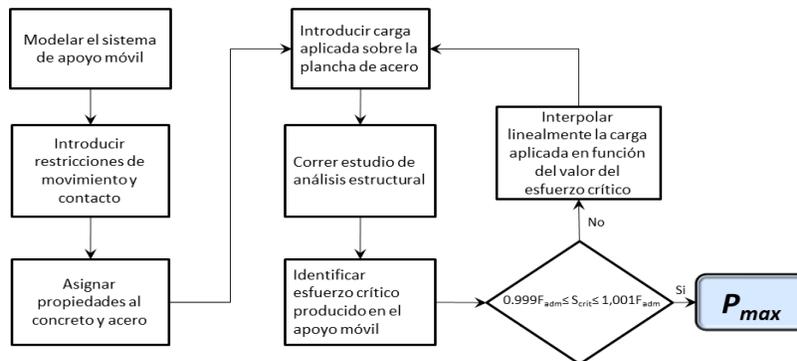


Figura 3. Flujograma para determinar la carga máxima de servicio en los apoyos móviles del tipo PGRU.

S_{crit} es el esfuerzo medido en el apoyo móvil (i.e., en el concreto o acero) más cercano al esfuerzo admisible del material (F_{adm}).

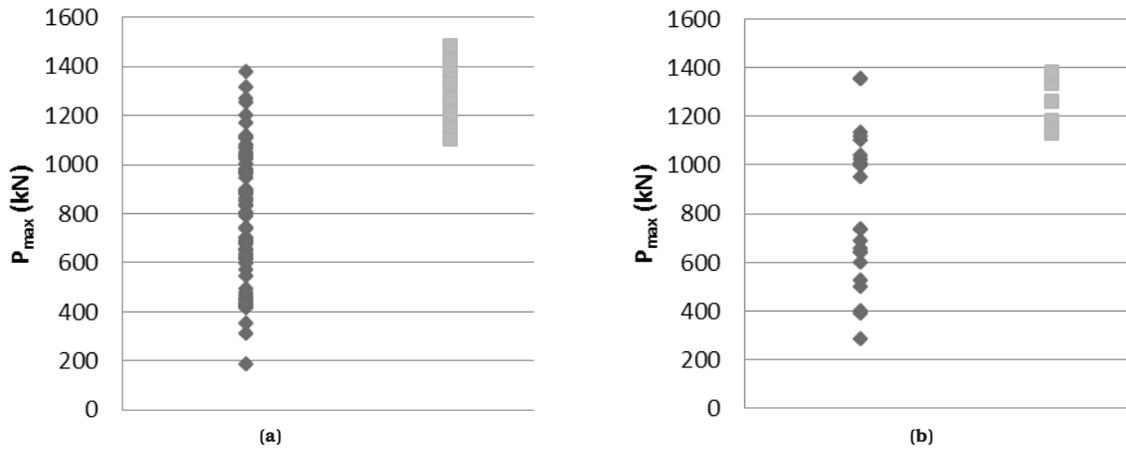


Figura 4. Distribución de tipos de falla para valores de P_{max} simulada en Creo 2.0 a) conjunto de entrenamiento y b) conjunto de prueba. Los símbolos ◆ y ■ representan los diseños que alcanzaron los esfuerzos admisibles a la compresión y a la tracción indirecta, respectivamente.

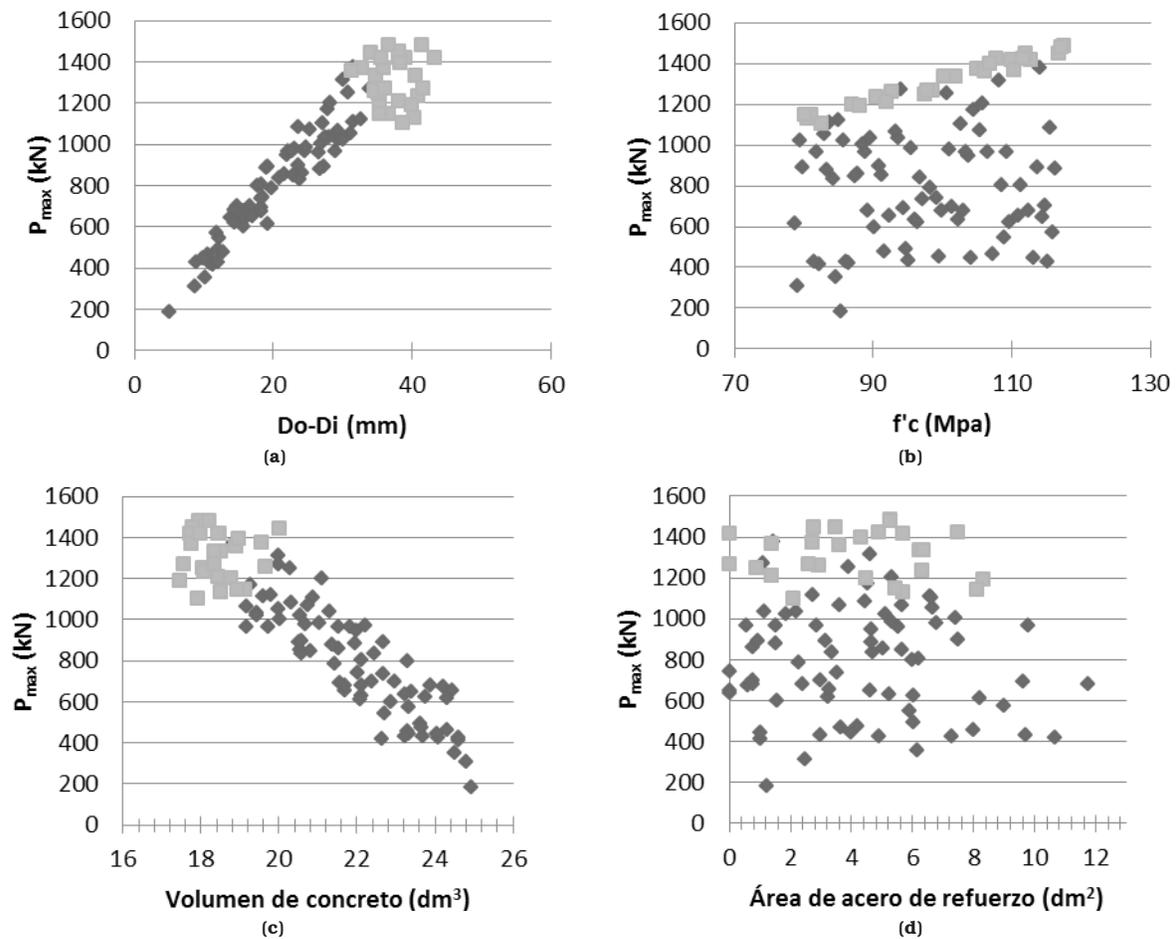


Figura 5. Gráficos de dispersión de P_{max} simulada en Creo 2.0 versus: a) Do-Di, b) área de acero de refuerzo (cabillas), c) volumen de concreto y d) f'_c , para el conjunto de entrenamiento (100 experimentos). Los símbolos ◆ y ■ representan los diseños que alcanzaron los esfuerzos admisibles a la compresión y a la tracción indirecta, respectivamente.

El estadístico t y el valor p (p -value) para cada uno de los coeficientes del modelo indican que, dentro de los rangos de las variables consideradas, D_o , D_i y f'_c son variables estadísticamente significativas (p -value < 0,05), en contraste con n y d que exhiben p -values iguales a 0,601 y 0,319, respectivamente; el coeficiente R^2 del modelo es igual a 0,9474.

Nótese que \hat{P}_{max} aumenta con valores crecientes de D_o y f'_c y decrecientes de D_i .

El modelo de regresión \hat{P}_{max} ofreció excelentes aproximaciones a los valores simulados en el contexto del apoyo móvil tipo PGRU (Tabla 1) y del conjunto de prueba (variantes). Para el apoyo móvil tipo PGRU, la diferencia entre P_{max} simulada y \hat{P}_{max} estimada es de solo 8% aproximadamente (1.135 kN vs. 1.045 kN). Además, el error relativo (%) del modelo de regresión \hat{P}_{max} utilizando el conjunto de prueba presenta una media, mediana y desviación estándar de 0,24%, 1,80% y 8,87%, respectivamente.

Conclusiones

Este trabajo presenta un enfoque para estimar la carga máxima de servicio de los apoyos móviles instalados en el Puente Rafael Urdaneta (PGRU) y sus variantes en términos de propiedades y geometría. En este contexto:

- La estimación de la carga máxima de servicio estuvo gobernada por el esfuerzo admisible a la compresión; excepto cuando las cargas aplicadas al apoyo móvil fueron superiores a 1.400 kN, donde se alcanzaron los esfuerzos admisibles a la tracción.
- La carga máxima de servicio de los apoyos móviles existentes en el PGRU simulada con el modelo numérico implementado en Creo 2.0 es mayor a 1.135 kN, lo que es consistente con el hecho de que estos apoyos soportan cargas mayores a 981 kN sin evidencias significativas de daños en el tubo de acero o el cilindro de concreto.
- Las variables de diseño estadísticamente más significativas en la estimación de la carga máxima de servicio son: los diámetros interno (D_i) y externo (D_o) del tubo de acero y la resistencia a la compresión del concreto (f'_c). Además, incrementos en los valores

de D_o y f'_c , así como una disminución en D_i aumentan las cargas máximas de servicio en los apoyos móviles del tipo PGRU.

- Para variantes de apoyos móviles del tipo PGRU es posible estimar la carga máxima de servicio utilizando un modelo de regresión lineal lo que facilita su interpretación y uso. Específicamente, el modelo de regresión presenta un excelente ajuste con un coeficiente de determinación (R^2) mayor a 94% y un promedio de error relativo de 0,24%.

Aspectos a considerar en futuros trabajos son: a) modelar la carga máxima para prevenir falla por agrietamiento en el concreto (estudio no lineal en propiedades de materiales) de los apoyos móviles del PGRU y sus variantes, y b) validar mediante experimentos reales el modelo de la carga determinada en el ítem a.

Referencias

1. Devadas, S. U. P. M.: "Reinforced concrete design". Tata McGraw-Hill Education, (2003).
2. Sarcos, A. y Garcia, H.: "Theoretical and experimental analysis of the central piers of The General Rafael Urdaneta Bridge". Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia, Vol. 19, (1996) 205-211.
3. Sarcos, A. y García, H.: "Calculation of posttensioning loss on table beams of central piers of General Rafael Urdaneta Bridge". Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia, Vol. 20, (1997) 3-9.
4. Sarcos, A. y García, H.: "Evaluating the current status of Maracaibo Bridges central piers". Structural Engineering International, Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 9, No. 2, (1999) 133-136.
5. Sarcos, A., Bukowitz, D. y García, H.: "Evaluación experimental de la necesidad de tensado de los cables de suspensión del puente General Rafael Urdaneta". Revista de Ingeniería Civil, CEDEX, No. 113, (1999) 91-98.
6. Sarcos, A. y García, H.: "Evaluación de los tensores de las ménsulas de las pilas 30 y 33 del puente General Rafael Urdaneta". Boletín Técnico del IMME. Universidad Central de Venezuela, Caracas, (2000).

7. Sarcos, A. y García, H.: "Tensado de los cables de suspensión del Puente sobre el Lago de Maracaibo en Venezuela". Revista Ingeniería Civil. CEDEX, Madrid. España, (2001).
8. De Rincón, O., Contreras, D., Sánchez, M., Padilla, J., Lasarte, C., Sarcos, A., García, H. y Navarro, A.: "Inspection and repair of Lake Maracaibo Bridge Suspensión Cables. Materials Performance". Corrosion Prevention and Control, Vol. 40, (2001), 34-38.
9. Sarcos, A. y García, H.: "Structural evaluating of pier 24 of Maracaibo Bridge subject to ship collision". Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia, Vol. 26, (2003) 3-9.
10. Sarcos, A., Navarro, A., and Garcia, H.: "Inspection and process of tension of cables of General Rafael Urdaneta Bridge". J. Bridge Eng., Vol. 8, No.4, (2003) 223-228.
11. Ohtsu y Kawasaki.: "AE-SiGMA analysis in Brazilian test and accelerated corrosion test of concrete". J. Acoustic Emission, Vol. 28 (2010).
12. Ruiz, G., Ortiz, M., y Pandolfi, A.: "Three-dimensional finite-element simulation of the dynamic Brazilian tests on concrete cylinders". International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.48, No. 7, (2000) 963-994.
13. Toogood, R.: "Creo Parametric 2.0 Tutorial and Multimedia DVD". SDC Publications. (2013).
14. Bauverlag GmbH: "El puente sobre el Lago de Maracaibo en Venezuela". Wiesbaden, Berlin, Alemania, (1963).
15. Porrero, J., Ramos, C., Grases, J. y Velazco, G.: "Manual del concreto estructural". SIDE-TUR, Venezuela, (2012).
16. Harmsen, T.: "Diseño de estructuras de concreto armado". Pontificia Universidad Católica del Perú Fondo Editorial, 3ra Edición. Perú, (2002).
17. Lamond, J. F.: "Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials". Astm International, Vol. 169, (2006).
18. Faires Virgil, M.: "Diseño de Elementos de Máquinas". Editorial Limusa, México, (1996).
19. Kennedy, T. W. y Hudson, W. R.: "An Indirect Tensile Test for Stabilized Materials". Center for Highway Research, University of Texas at Austin, (1968).
20. Queipo, A.: "Estimación de la carga máxima de servicio de apoyos móviles del tipo utilizado en el puente General Rafael Urdaneta, mediante simulaciones del programa Creo Proengineer". Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Nueva Esparta. Caracas, Venezuela, (2013).
21. Kennedy, T. W., Hadley, W. O. y Hudson, W. R.: "A method of estimating tensile properties of materials tested in indirect tension". University of Texas at Austin, Center for Highway Research, (1970).
22. Jones, D., Schonlau, M. y Welch, W.: "Efficient global optimization of expensive black-box functions". Journal of Global Optimization, Vol.13, (1998) 455-492.
23. Queipo, N. V., Haftka, R. T., Shyy, W., Goel, T., Vaidyanathan, R. y Kevin Tucker, P.: "Surrogate-based analysis and optimization". Progress in Aerospace Sciences, Vol. 41, No. 1, (2005) 1-28.

Recibido el 9 de Septiembre de 2014
En forma revisada el 13 de Abril de 2015