

ELABORACIÓN DE MODELO TEÓRICO COMPUTACIONAL DE PUENTE DE SECCIÓN CAJÓN DE HORMIGÓN POSTESADO

Ing. Robert Tomás Castro Tandón¹, Ing. Reynaldo Giráldez Toledo²
M.Sc. Ing. Alejandro Hernández Hernández²

1. Constructora Militar Número 4, Carretera Cidra Km 1 y medio,
Matanzas, Cuba. roberttomas@gmail.com

2. Universidad de Matanzas

Resumen

El puente de carretera de la Circunvalación de la Ciudad de Matanzas sobre el Río San Juan, desempeña un papel fundamental en la economía y transportación de la región. Actualmente es la vía de comunicación y comercio más utilizada entre las provincias de La Habana y Matanzas, que permite mayor velocidad y comodidad de conducción, pues como esta bordea en lugar de atravesar la ciudad, evita los tráficós de la misma. Con el paso de los años este puente ha sufrido intervenciones de mayor y menor grado y actualmente no se cuenta con ninguna herramienta informática mediante la cual se pueda analizar la estructura. Para este estudio se realiza el modelo teórico computacional del puente de hormigón postesado, utilizando el software *CSiBridge*, teniendo en cuenta los efectos de las cargas móviles y una correcta calibración de la malla de elementos finitos.

Palabras claves: modelo computacional; puente; hormigón postesado.

Introducción

La ciudad de Matanzas, conocida como la “Atenas de Cuba”, se encuentra enmarcada entre los ríos Yumurí, San Juan y Canímar de ahí que cuente con alrededor de 30 puentes (Arestuche y Pérez, 2009) por lo que es llamada también “Ciudad de los Puentes”. Existe gran variedad entre ellos, con respecto a su uso, materiales y estructura; puentes vehiculares, de ferrocarril, de armaduras, de arcos y mixtos que forman parte icónica de la ciudad.

El puente situado en la Carretera Circunvalación Matanzas, sobre el Río San Juan fue construido a principios de la década del 60. Ejecutado totalmente *in situ*, su longitud es de 90.80 m con una luz central de 61.0 m y voladizos a ambos lados de 13.0 m, con losas de transición de 1.90 m (Toro et al., 1997). Con el paso de los años el mismo ha sido sometido a modificaciones y reparaciones.

En el año 1965 el puente es sometido a una modificación donde se cambia el sistema de postesado por el Dr. Ing. M Isoba. En la fecha del 3 de julio de 1976 se realiza una inspección a cargo de los Ing. E Marín, J.M Iglesias, Sandalio Martínez y Alfredo Vidal. El 13 de abril de 1984 se realiza una reparación de dicho puente producto de una visita de inspección realizada por los Ing. M Isoba y Carlos Lincheta.

En visita de inspección realizada con fecha octubre de 1997 por los Ing. Augusto Clement A. del Toro, Nicolás Fernández y Laura R Domínguez se detectaron afectaciones tales como: cables partidos y corroídos del sistema de postesado, grietas en los diafragmas y otras en casi todas las monturas metálicas que permiten el paso de los cables, fisuras en las paredes externas e intermedias del cajón, parte de las losas de transición afectadas, pérdida total en ambos estribos de la losa fondo de voladizo y muros laterales de la cámara de estiramiento.

El 7 de diciembre de 2018 se realiza nuevamente una inspección, donde se detectan incrementos en las mismas afectaciones que en la anterior, además de un aumento de los cables partidos que en conjunto con los anteriormente detectados hacen una pérdida total de 89 cables que representan el 5.15% de los 1728 cables con los que contaba el puente inicialmente. (Delgado Pérez, 2018)

El paso del tiempo y la falta de mantenimientos periódicos, así como ciertas indisciplinas sociales, han propiciado que la estructura del Puente de la Circunvalación sobre el Río San Juan sufriera ciertos deterioros que han sido tratados en mayor o en menor medida. Es por esto necesaria la obtención de un modelo teórico computacional del puente capaz de servir como una herramienta ante cualquier análisis que se le desee realizar al puente, siempre y cuando este sea correctamente validado.

Desarrollo

El modelado computacional es el uso de computadoras para simular y estudiar el comportamiento de sistemas complejos mediante las matemáticas, la física y la informática. Un modelo computacional contiene numerosas variables que caracterizan el sistema bajo estudio. La simulación se realiza ajustando cada una de estas variables, solas o combinadas, y observando cómo los cambios afectan los resultados. Los resultados de las simulaciones de modelos ayudan a los investigadores a hacer predicciones acerca de qué pasará en el sistema real que se está estudiando en respuesta a condiciones cambiantes. (Bioengineering, 2016)

La modelación computacional, suscita gran interés por su aplicación en distintas temáticas de la ingeniería civil, por ejemplo, el estudio de los efectos de los sismos sobre edificios altos, el comportamiento de las torres de alta tensión ante la acción del viento, etc.

Centrándose el tema en el comportamiento de los puentes ante la acción de cargas móviles, existen diversas investigaciones como: Simulación de cargas móviles sobre estructuras mediante un mallado móvil de elementos finitos, de M. Such 2014, donde el autor presenta una metodología para analizar la respuesta dinámica de estructuras sometidas a cargas móviles. (Such et al. 2014)

En el libro del año 2019 Desarrollo e Innovación en Ingeniería, Cuarta Edición, de la editorial Instituto Antioqueño de Investigación, se hace un análisis, en el software MIDAS CIVIL, del comportamiento a largo plazo de un puente viga cajón construido por voladizos sucesivos en Colombia a partir de deflexiones medidas en campo, arrojando como resultado la importancia del estudio de los materiales, el cambio en las condiciones climáticas y el uso de una contra flecha en el diseño, pues las deflexiones generadas a largo plazo son generalmente superiores a las concebidas inicialmente, impidiendo que este alcance el plazo de vida útil esperado. (Serna Montoya, 2018)

En el artículo del año 2018 *Modal identification of a box girder bridge using optimally selected measured data from ambient vibration testing*, de la revista UIS Ingenierías, se presenta un estudio donde se implementan un algoritmo de óptima localización de sensores y un método de identificación modal con base en mediciones en condiciones de excitación ambiental del puente tipo cajón Gómez Ortiz ubicado en Colombia, utilizando el software MIDAS CIVIL. Los resultados presentados en este artículo, con un número limitado de sensores, muestran buena correlación con los resultados utilizados en la calibración del modelo numérico del puente previamente desarrollado y que corresponde a la línea base del puente, con lo que se evidencia la importancia de complementar los estudios numéricos preliminares a las campañas de mediciones, con resultados de configuraciones resultantes de la implementación de algoritmos de óptima localización de sensores. El tipo de excitación dominante en un puente debe ser estudiado de igual forma antes de las campañas de medición; se debe determinar de igual forma la dirección de excitación dominante. (Viviescas et al., 2018)

En Cuba se han llevado a cabo varios estudios sobre esta temática pudiendo mencionar, Análisis Estructural de un Puente en la Autopista Matanzas – Varadero. Modelación y Análisis de su Capacidad de Alfonso Pérez 2006 donde se analiza la respuesta del puente ante la acción de las nuevas cargas del tráfico, utilizando el software SAP 2000. Rodríguez Cruz presentando Métodos para el análisis dinámico de puentes frente a cargas móviles realiza una comparación entre los métodos clásicos de análisis dinámico en puentes de ferrocarril y método de integración directa con cargas móviles.(Alfonso Pérez 2006)

Con lo expuesto anteriormente queda demostrado la gran variedad de usos que sostiene la implementación de un modelo numérico computacional de cualquier estructura, por lo cual en este trabajo se propone crear un modelo teórico de un puente de hormigón pretensado, específicamente el que se encuentra en la Carretera Circunvalación Matanzas, sobre el Río San Juan. El principal aporte de este trabajo es la aplicación del software *CSiBridge* para crear un modelo numérico computacional de puente en cuestión.

Geometría

Ejecutado totalmente *in situ*, el puente tiene una longitud de 90.80 m con una luz central de 61.0 m entre las pilas y voladizos a ambos lados de 13.0 m, con losas de transición de 1.90 m. Este puente con forma encajonada es uno de los pocos construidos con esta tipología en Cuba.

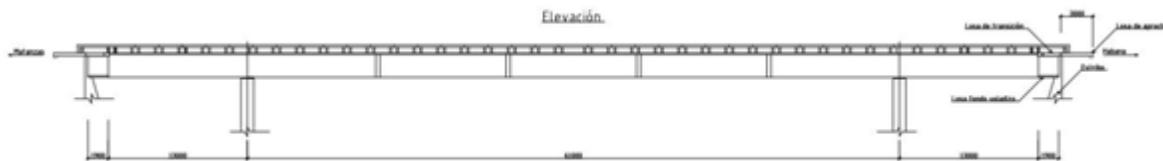


Figura 1. Vista longitudinal del puente. (Elaboración propia)

La sección transversal consta de una calzada de rodadura, con dos sendas de circulación de 3.50 m de ancho con pendiente de 1% y paseos a ambos lados de 3.0 m con barandas de hormigón *in situ* formados por pasamanos de 0.28 m de espesor y pretilos de 0.20 x 0.25 m de sección.

Tanto en el interior de los cajones como en el exterior del puente, existe sistema de iluminación para dar servicio tanto a las luminarias, como para mantenimiento en el interior. En ambos lados del puente a 15.00 m de su extremo existen registros para permitir al acceso hacia la parte de adentro de los cajones. (Toro et al., 1997).

Materiales

Se sabe por la información obtenida de los planos consultados que el hormigón utilizado en la fabricación del puente tiene una resistencia a compresión $f'c=5000\text{psi}$ o 35MPa , mientras

que las losas de transición o de aporche fueron fundidas con un hormigón de resistencia a compresión de $f'c=3000\text{psi}$ o 21MPa . Sin embargo, no hay ninguna documentación que refleje la existencia de información del material además del plano consultado o de ensayos del mismo.

Tabla 1 Cubicación del cajón. (Planos EMPAI)

CUBICACIÓN PARA EL CAJÓN							
LUGAR	UNID	DIMENSIONES			VOLUMEN		
		LARGO	ANCHO	ALTO	PARCIAL	TOTAL	
LOSA SUPERIOR	1	5.35	13.00	0.20	13.91	13.91	
PAREDES	INTERIORES	2	3.10	0.25	1.95	3.02	5.44
	EXTERIORES			0.20		2.42	
DIAFRAGMAS	2	9.35	0.20	0.05	0.19	0.75	
	2			0.15	0.56		
$f'c=5000\text{ psi}$ (35 MPa)					TOTAL	20.10	

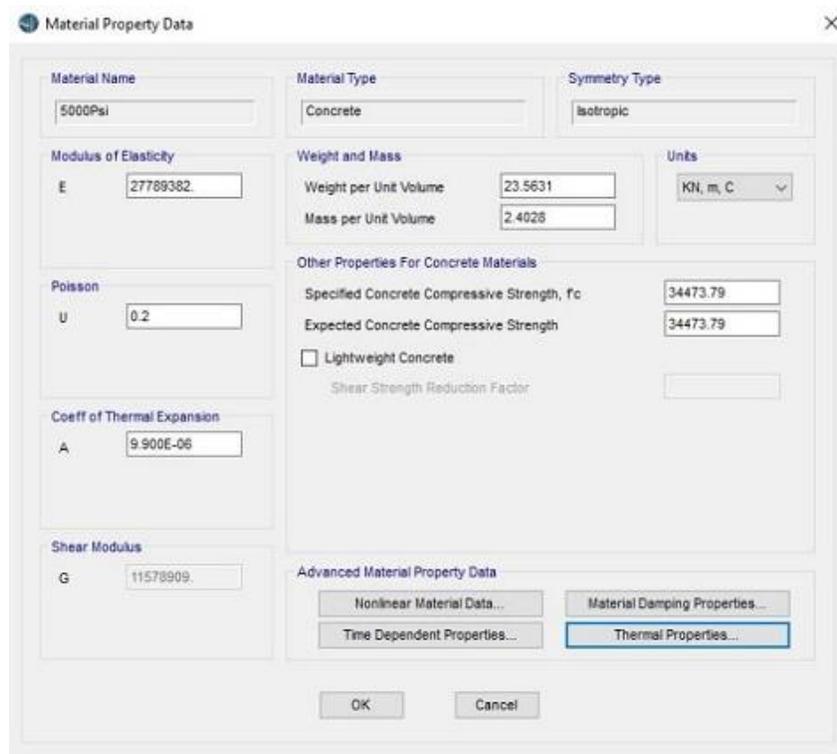


Figura 2. Propiedades del hormigón $f'c=5000\text{ psi}$. (CSiBridge)

Secciones

La sección transversal del tablero en la luz central está constituida por una estructura conformada por un gran cajón seccionado en tres partes de un ancho total de 11.60 m y un peralte de 2.25 m. A partir de los cajones se construyeron voladizos de 0.70 m a ambos lados para un ancho total de 13.0 m.

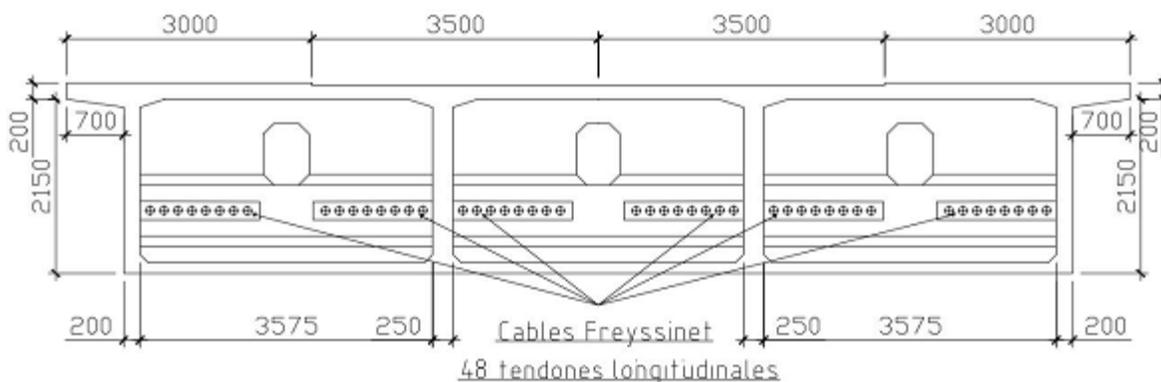


Figura 3. Vista transversal del cajón con los diafragmas. (Elaboración propia)

Las paredes interiores del cajón tienen un espesor de 0.25 m y las exteriores de 0.20 m y en la sección longitudinal se ubican tres diafragmas de 0.20 m de espesor espaciados a 12.20 m entre ellos. En estos están localizadas las monturas metálicas que permiten y dirigen el paso de los cables de pretensados. (Toro et al., 1997)

La sección transversal de las luces extremas (voladizos) está constituida por una estructura de hormigón macizo con un peralte que varía de 2.25 m en el apoyo, a 1.98 m en el extremo del voladizo. Mientras que las losas superior e inferior de aproche conforman un cajón de 1.98 m con sus paredes laterales de 0.10 m.

Vínculos

Las pilas están formadas por muros semi-masivos de 1.05 m de ancho en la parte superior y tienen forma rectangular distribuidas a todo lo largo de la sección transversal del puente. Estas pilas descansan sobre pilotes de hormigón prefabricado de 0.40 x 0.40 m de sección y de longitud variable, hincados hasta el estrato de roca. Los aparatos de apoyo en una de las pilas son articulaciones (3 articulaciones) móviles sobre acero (material plástico) y en la otra son apoyos de hormigón armado (fijo).

Los estribos también son construidos semi-masivos sobre pilotes de hormigón prefabricados, hincados hasta la roca. En el estribo descansa sobre el muro la losa de fondo del voladizo y en el respaldo la losa de transición. También aquí, y en el ancho correspondiente a las sendas de circulación, descansa la losa de aproche que tiene una longitud de 3.0 m y 0.20 m de espesor. (Toro et al., 1997)



Figura 4. Vista de los apoyos articulados. (Tomada por el autor)

Postesado

Actualmente el sistema de postesado exterior cuenta con 89 cables partidos de los 1728 totales que conforman 48 tendones. En el interior de los cajones están contenidos de forma aérea los tendones, en grupos de 16 para cada cajón. Cada uno de ellos está formado por 36 cables de Freyssinet 7 mm de diámetro, al llegar al voladizo estos se dividen en dos grupos de 8 tendones, que salen a 0.64 m del borde superior y a 0.40 m del borde inferior del mismo. Los tendones en la zona del voladizo se colocan en el interior de unos tubos de fibrocemento de diámetro de 150 mm sin relleno de mortero de adherencia. (Toro et al., 1997)

Cada tendón presenta una reserva de aproximadamente de 132.12 toneladas de fuerza en estado óptimo, la cual en estos momentos varía de uno a otro teniendo en cuenta sus pérdidas particulares.

Modelo del puente

Para que un modelo se considere correctamente elaborado es necesario que posea las mismas características que la estructura real, de tal manera que su comportamiento llegue a ser prácticamente el mismo. Para lograrlo, en este caso, se comparan las medidas reflejadas en planos y las reales de la estructura, así como los materiales reales en su estado actual con los de diseño considerados inicialmente, para así construir un modelo lo más exacto posible que refleje las condiciones actuales de la estructura y sus deformaciones utilizando el software *CSiBridge*.

En la geometría de la estructura, se utilizaron las medidas obtenidas de los planos e informes de la EMPAI, para cada uno de los 2 tipos de secciones presentes: voladizos macizos y luz central; los cuales abarcan una longitud total de 87 m. Estos se configuraron independientemente en el software y luego fueron integrados como una estructura continua.

Los voladizos tienen su extremo exterior libre. Elementos del tipo *frame* se utilizaron para conformar las pilas de acuerdo a las características reflejadas en informe “Reparación Puentes sobre Río San Juan, Circunvalación Matanzas”, y en su base uniones fijas por su condición de empotramiento con los pilotes prefabricados hincados hasta el estrato resistente, descritos en los planos consultados.

No se tuvieron en cuenta las losas de apoye que están simplemente apoyadas sobre los voladizos, pues al ser discontinuas con el resto de la estructura del puente no provocan variación alguna en su comportamiento.

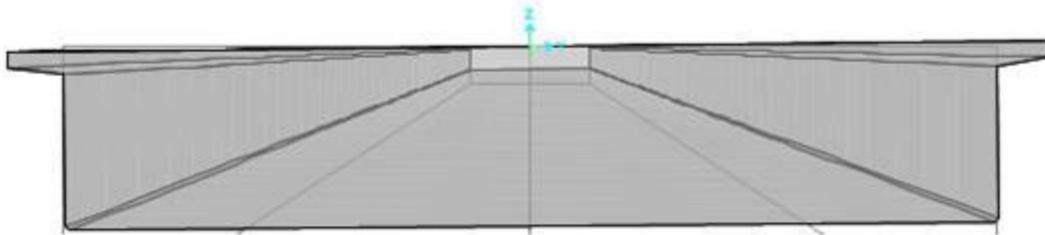


Figura 5. Sección transversal de los voladizos. (CSiBridge)

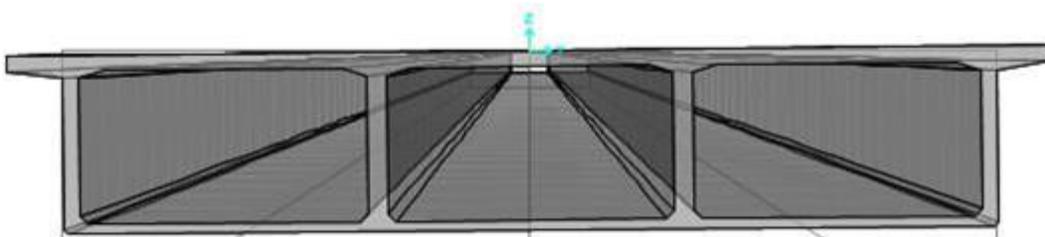


Figura 6. Sección transversal de la luz central. (CSiBridge)

En la vista longitudinal existe un cambio en la profundidad de las secciones en voladizo donde varía desde 2.25 m en su extremo interior posicionado sobre la pila donde conecta con la luz central, hasta 1.98 m en el extremo exterior.

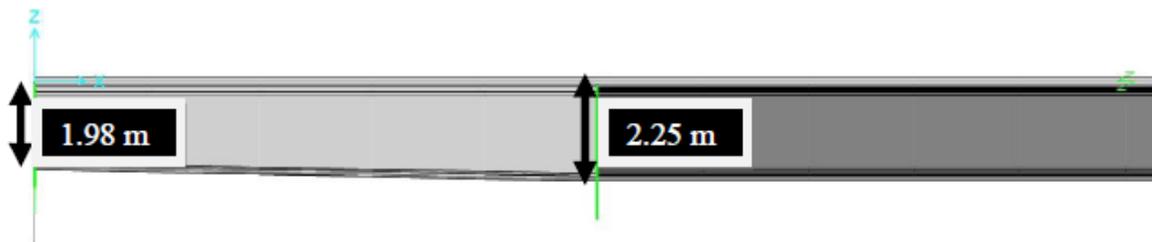


Figura 7. Variación paramétrica en los voladizos del puente. (Elaboración propia)

Para los aparatos de apoyo en lugar de ser establecidos por sus propiedades, fueron dispuestos según su forma de trabajo, en una de las pilas son articulaciones (3 articulaciones) móviles sobre acero (material plástico) y en la otra son apoyos (3 apoyos) de hormigón armado (fijo).

Los tendones correspondientes al sistema postesado del puente se reflejaron con su área total tal y como debiera ser con los 36 cables de Freyssinet que lo forman, el cambio ocurre en la designación de la fuerza por tendón. Para cada cable la reserva de fuerza es de 3.67 toneladas, por ello se especificó cada tendón por separado y con la información recogida se le restó a cada uno sus pérdidas particulares. Se modelaron como elementos de la estructura y carga de tipo fuerza.



Figura 8. Vista longitudinal en planta de los tendones. (CSiBridge)

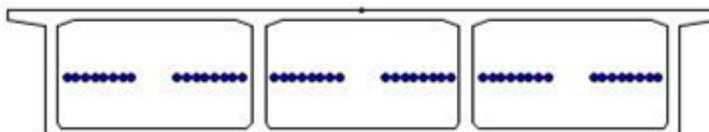


Figura 9. Vista transversal de los tendones en la sección del cajón. (CSiBridge)

Calibración de la malla

Para la calibración de los elementos *Shell* se realiza un mallado donde se realizan una serie de medidas de las tensiones producidas en el puente por las cargas permanentes, para lo cual se definieron tres puntos aleatorios en la estructura. Las medidas se hicieron para diferentes tamaños de mallados que son: 2 m, 1.5 m, 1 m, 0.5m, 0.4 m, 0.3 m y 0.25 m.

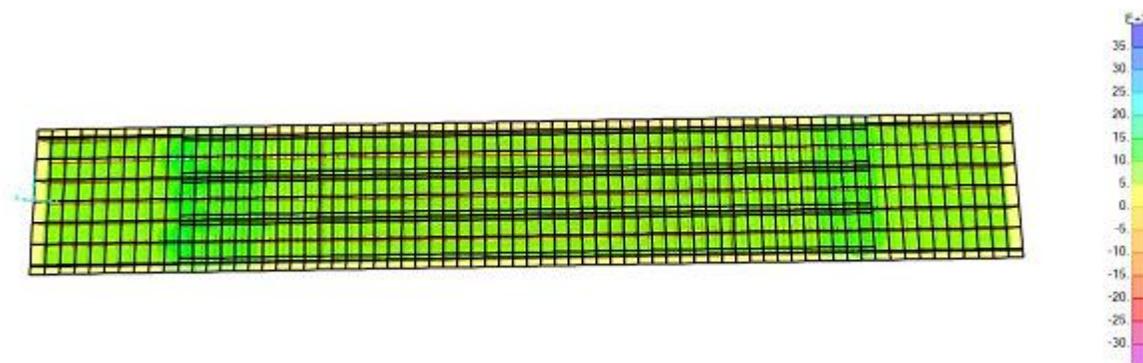


Figura 10. Mallado de 2 m de tamaño para tensiones. (CSiBridge)

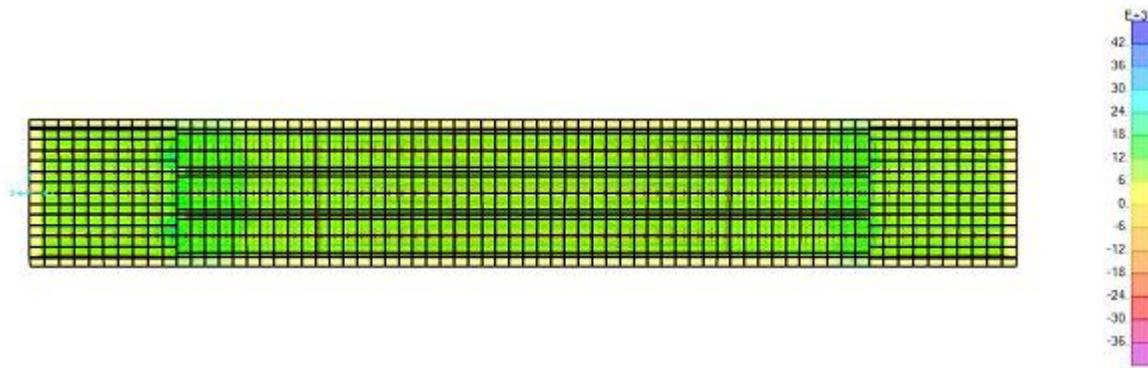


Figura 11. Mallado de 1.5 m de tamaño para tensiones. (CSiBridge)

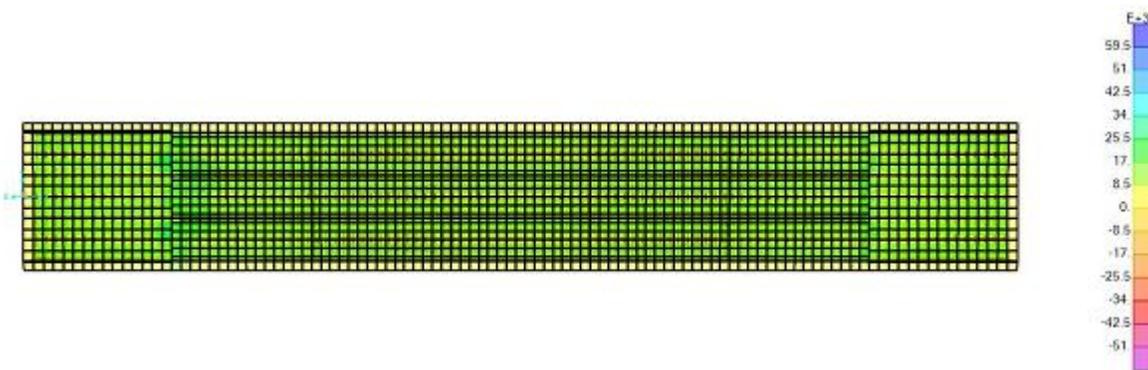


Figura 12. Mallado de 1 m de tamaño para tensiones. (CSiBridge)

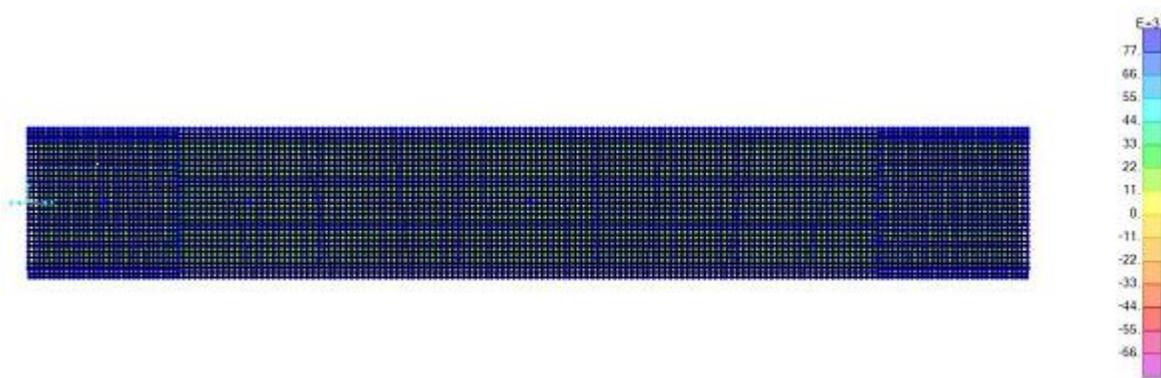


Figura 13. Mallado de 0.5 m de tamaño para tensiones. (CSiBridge)

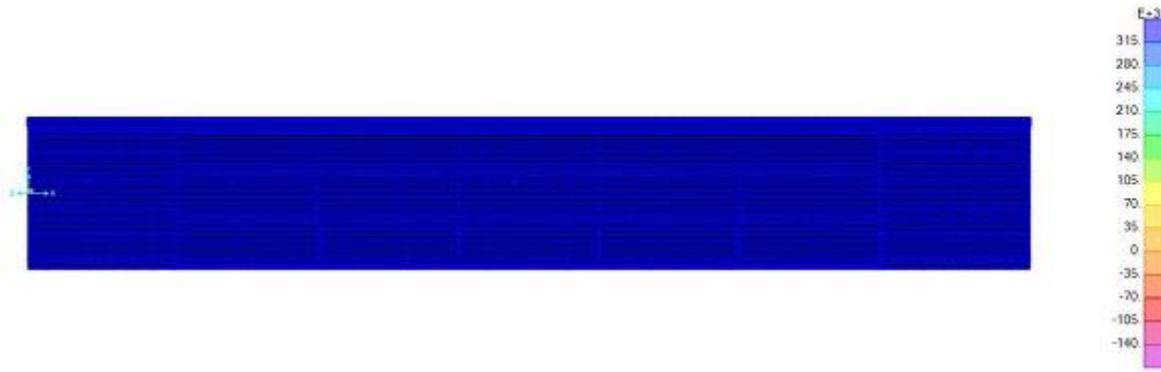


Figura 14. Mallado de 0.25 m de tamaño para tensiones. (CSiBridge)

Se realizaron gráficos con las mediciones tomadas a cada uno de estos puntos en los diferentes tamaños de mallados, con lo que se obtuvo que a medida que el tamaño de este disminuye la precisión de los valores de tensión en los puntos aumenta y por tanto lo hace el modelo, siendo así este último mucho más detallado y preciso.

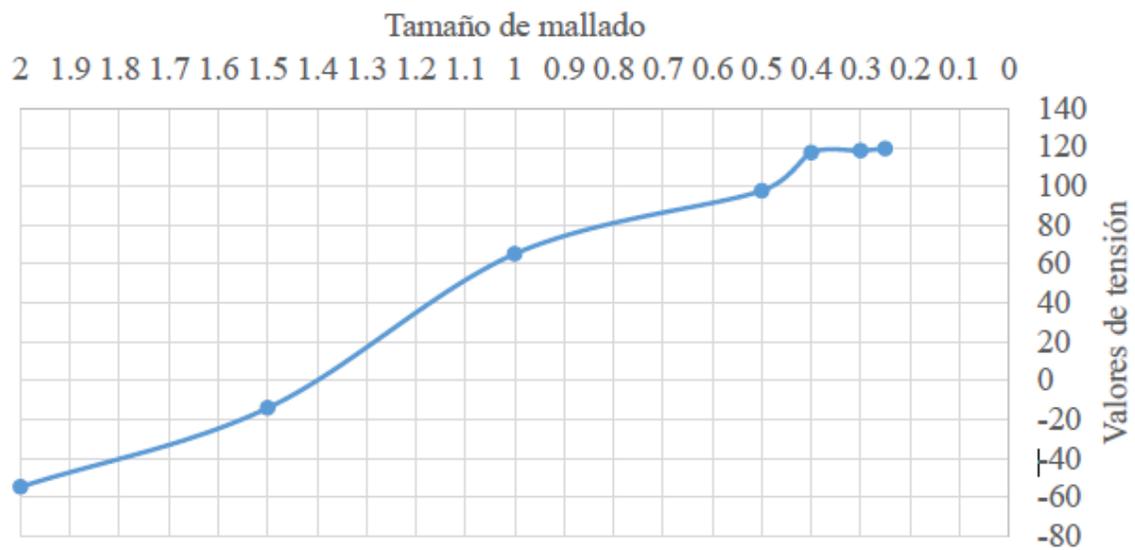


Figura 15. Valores de tensión en el punto 1. (CSiBridge)

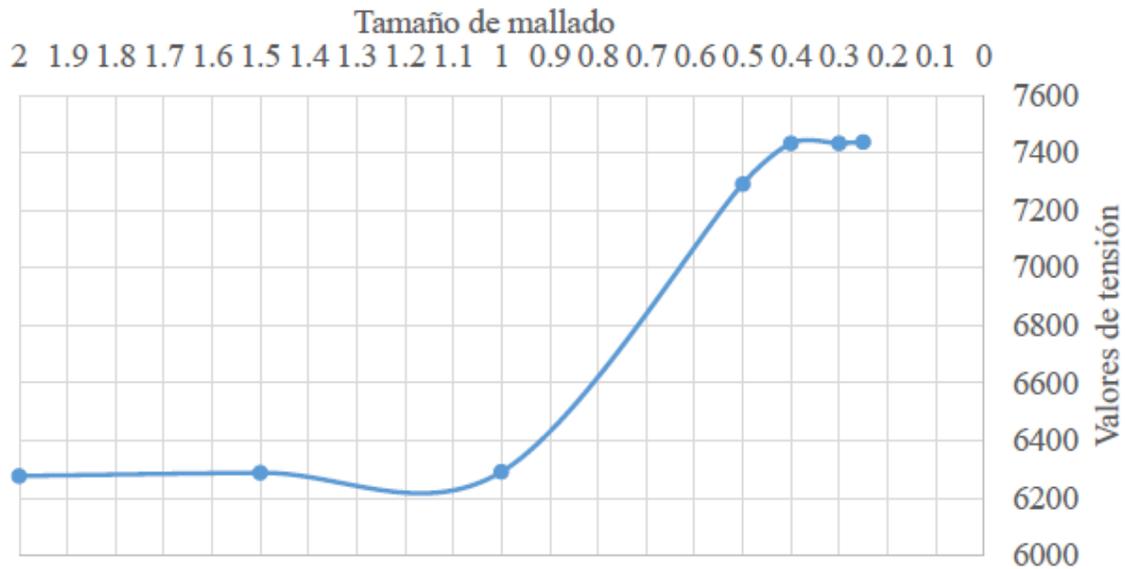


Figura 16. Valores de tensión en el punto 2. (CSiBridge)

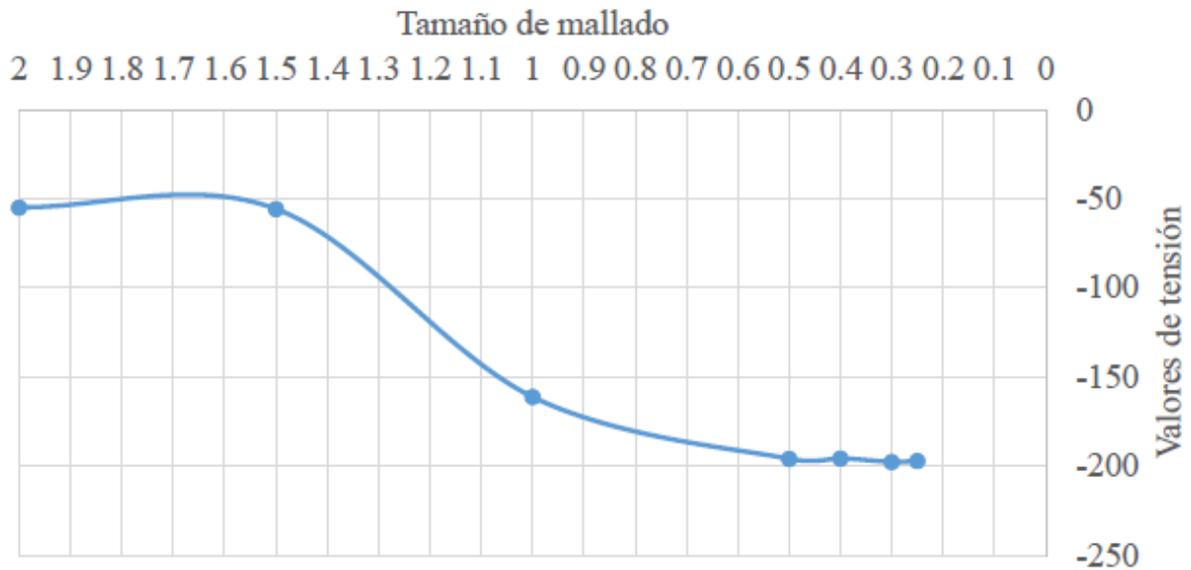


Figura 17. Valores de tensión en el punto 3. (CSiBridge)

Con los resultados obtenidos a partir del tamaño de mallado 0.4 m hasta 0.25 m, que es el más pequeño de los analizados, se puede afirmar que la calibración del mallado es correcta pues en este rango el comportamiento de las tensiones es prácticamente constantes.

Conclusiones

Hoy en día la modelación computacional cobra un gran auge en el análisis de las estructuras bajo cargas dinámicas, con la ayuda de software y herramientas, que a través del Método de Elementos Finitos ofrece la posibilidad de elaborar modelos numéricos de alta precisión que simulan el comportamiento de la estructura a escala real. La modelación estructural resulta, en numerosas ocasiones, una herramienta imprescindible para determinar tensiones y deformaciones de los elementos estructurales, es por esto que todo modelo debe ser correctamente elaborado definiendo secciones, material, geometría, cargas y vínculos, con una correcta calibración del modelo. En este caso una de las complejidades es la configuración del sistema postesado debido a sus características y las particularidades de su configuración. La validación del mallado es un tema de suma importancia en la elaboración del modelo que permite obtener, según su configuración de tamaño, menor o mayor precisión en la obtención de los valores esperados. En este punto en específico el modelo adquiere mayor precisión a partir del tamaño de mallado de 0.4 m hasta 0.25 m que es el último analizado, por lo que permite un mejor entendimiento del comportamiento de la estructura ante las cargas que sobre él actúan.

Referencias bibliográficas

ARESTUCHE, G. L., PÉREZ, R.R. Puentes De Matanzas, 2009.

TORO, A. C. A. D., FERNÁNDEZ, N. & DOMÍNGUEZ, L. R. Reparación Puente sobre Río San Juan. Circunvalación Matanzas. EMPAI, 1997.

DELGADO, P. A. H. Informe de Inspección del Puente de la Circunvalación sobre el Río San. EMPAI, 2018.

BIOENGINEERING, N. I. O. B. I. A.. Modelado Computacional. *US. Department of Health & Human Services*, 2016.

SUCH, M., JIMÉNEZ-OCTAVIO, J., CARNICERO, A. & SÁNCHEZ-REBOLLO, C. Simulación de cargas móviles sobre estructuras mediante un mallado móvil de elementos finitos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 31, 2015, 212-217.

SERNA, E. Desarrollo E Innovación En Ingeniería. Antioquia: Instituto Antioqueño De Investigación, 2018.

VIVIESCAS, A., VARGAS, L., RIVEROS, C. *Modal identification of a box girder bridge using optimally selected measured data from ambient vibration testing*, *Revista UIS Ing.*, vol. 18, no. 2, 2018, pp. 31-40

ALFONSO PÉREZ, H., GÓMEZ PILOTO, E. & DE ARMAS, N. Análisis Estructural De Un Puente En La Autopista Matanzas-Varadero. Modelación Y Análisis De Su Capacidad. Revista De Arquitectura E Ingeniería, 2006.



Monografías 2020
Universidad de Matanzas © 2020
ISBN: