

Simulación numérica de los apoyos de puente metálico giratorio

César A. Chagoyen-Méndez, Yumar Acosta-García, Yandry Rodríguez-Toledo,
Carlos Recarey-Morfa, Gregorio B. Aragón-López, José Leiva-Pérez

Recibido el 29 de noviembre de 2010; aceptado el 19 de julio de 2011

Resumen

En el presente trabajo se muestran algunos de los resultados del análisis realizado a los mecanismos de apoyo, de cierre y de giro del puente metálico del municipio Playa en ciudad de La Habana (popularmente conocido como "Puente de Hierro"), como parte inicial de un proyecto más amplio que abarcará la reparación de todo el puente. El mismo tiene más de 100 años de explotación (desde 1906) y con un mantenimiento casi nulo, lo que ha traído como consecuencia un considerable deterioro del puente. En éste artículo se describen las principales características y patologías detectadas al inspeccionar los mecanismos mencionados anteriormente y se presentan además, los resultados de la simulación numérica de uno de los ensambles de piezas del mecanismo de apoyo. Esta simulación arrojó que el apoyo puede trabajar con una seguridad adecuada.

Palabras claves: puente, modelación, análisis estructural y modelación, resistencia de materiales.

Numeric simulation of gyratory metallic bridge supports

Abstract

Presently work some of the results of the analysis carried out to the mechanisms of support, of closing and of turn of the metallic bridge of the Beach district in Havana city (popularly known as "Iron Bridge") are shown, like initial part of a wider project that will include the repair of the whole bridge. This has more than 100 years of exploitation (from 1906) and with an almost null maintenance, that has resulted in a considerable deterioration of the bridge. In this article the main ones characteristic and pathologies detected when inspecting the mechanisms mentioned previously are described and also are presented, the results of the numeric simulation of one of assembles of pieces of the support mechanism. This simulation profited that the support can work with an appropriate security.

Key words: bridge, structural analysis and modeling, strength of materials.

Introducción

La valoración de los puentes metálicos existentes en la actualidad es un problema crucial tanto en Europa como en EE.UU., bien por el aumento de las cargas como por los efectos de degradación del material. La seguridad de los mismos ha de ser investigada cuidadosamente de forma urgente, sobre todo para puentes que tuvieron un mantenimiento limitado. [1-5]

En Cuba existen varios puentes metálicos con diferentes formas y usos, pero el que se trata en éste trabajo es el único de su tipo en el país debido a que posee un mecanismo de giro, que lo convierte en una joya de la Ingeniería Mecánica. Es un puente centenario que ha trascendido hasta hoy a lo largo de más de un siglo con cercanía al mar, lo cual conspira en contra de su durabilidad debido a la oxidación y dentro de otras causas, el cambio de funcionalidad a que ha estado expuesto. Inicialmente fue diseñado para el paso de tranvías y posteriormente fue rediseñado y adaptado para la circulación de vehículos. Una imagen del puente se muestra en la Foto 1.

Inicialmente fue necesario realizar un levantamiento a pie de obra de los mecanismos de fijación y de giro, determinando el grado de deterioro de las piezas y decidiendo cuáles de ellas construir y cuáles reparar. Se elaboraron los modelos 3D de las piezas, se simuló los tres mecanismos más importantes y a partir de los resultados de la simulación se reelaboraron los planos para la construcción de dichas piezas.

Características generales del puente:

Tipo de Puente:	Mixto (Acero - Hormigón)
Estribos y Pilas:	Muros, Cabezales y Pilotes de hormigón.
Longitud total:	84,10 m.
Longitud parte metálica:	50,47 m.
Distancia entre ejes (Vigas Principales):	6,39 m.



Foto 1. "Puente de Hierro"

Este puente está diseñado para las siguientes condiciones de trabajo:

- - Cuando da servicio a cargas rodantes sobre él.
- - Cuando gira para dar paso al transporte fluvial por el río Almendares.

Para cumplir estas condiciones de trabajo, el puente posee los siguientes mecanismos:

A. Mecanismo de fijación, que a su vez está compuesto por los siguientes mecanismos:

A1. Mecanismo de apoyo.

A2. Mecanismo de cierre.

B. Mecanismo de giro del puente.

A continuación se describen los elementos que componen cada uno de ellos, se muestran imágenes y se explica el estado técnico actual de los principales elementos.

A1. Elementos que componen el mecanismo de apoyo:

Cuando el puente trabajaba para dar servicio a cargas rodantes sobre él, las vigas principales se apoyan sobre 6 puntos: 2 en el centro y 2 en cada extremo. Al pulsar cierto accionamiento, es que se logra el apoyo del puente. Este mecanismo está compuesto por los siguientes elementos: un motor eléctrico, un reductor cilíndrico de dos pasos, un árbol con un piñón cónico que por un extremo posee un acoplamiento al reductor y por el otro apoya en una chumacera, un árbol en voladizo con una corona cónica que apoya en una chumacera, un reductor sinfín cuya entrada es el árbol anterior, otros dos árboles con acoplamientos y sus correspondientes 4 chumaceras, un mecanismo de transmisión hasta las cuñas del centro del puente y otro mecanismo de transmisión hasta las cuñas de los extremos del puente, 6 apoyos con sus respectivas cuñas.

En la Foto 2 se muestra una imagen de algunos de estos elementos.



Foto 2. Apoyos y cuña

Como se puede apreciar en la imagen anterior, el sistema apoyos-cuñas hoy se encuentra sumamente deteriorado, sólo se conserva 1 de las seis cuñas y los apoyos están oxidados y deteriorados. Es obligatoria la construcción total de sus componentes.

A2. Elementos que componen el mecanismo de cierre:

Este Mecanismo permite el cierre de seguridad del puente cuando da servicio a las cargas rodantes sobre él y se libera previamente a la puesta en funcionamiento del mecanismo de giro. El mismo está compuesto por un conjunto de barras, acoplamientos y soportes. En la Foto 3 se puede apreciar estos elementos:



Foto 3. Mecanismo de transmisión hasta el cierre central en los extremos del puente

Todos los elementos que componen el mecanismo de cierre se encuentran deteriorados. En estos momentos se encuentran fuera de su posición y no funcionan. A partir de su limpieza y revisión, se deben desechar los que no estén aptos para cumplir su función y fabricarlos nuevamente.

B. Elementos que componen el mecanismo de giro del puente:

Para lograr seguridad en el funcionamiento del mecanismo de giro éste puente se encuentra diseñado de forma tal, que tanto la parte izquierda como la derecha así como sus extremos, mantengan el equilibrio y por consiguiente deben tener el mismo peso. Por estos motivos se está en presencia de un puente compensado

en su funcionamiento ante el proceso de giro. Es por ello que se utilizan en distintos puntos del puente, algunos contrapesos que hoy se encuentran fuera de la posición adecuada para cumplir tal función.

El mecanismo de giro está compuesto por los siguientes elementos: motor eléctrico, reductor cilíndrico de dos pasos, corona cónica superior, árbol, chumaceras, piñón, cremallera inferior, planchas y vigas donde se fijan todos los elementos anteriores, soportes, ruedas y apoyo central. En la Foto 4 se pueden apreciar algunos de estos elementos:



Foto 4. Soportes y ruedas

Al liberar el mecanismo de cierre del puente y extraer las cuñas, las vigas quedan liberadas para realizar el giro. En este instante la estructura del puente descansa en el apoyo central y sobre 10 ruedas, 6 en la pila central que giran sobre una superficie circular de acero y 2 en cada extremo que descansan sobre un patín en cuña. Con estas últimas ruedas se logra, cuando el puente se va a colocar en la posición de servicio a cargas rodantes sobre él, la altura necesaria para accionar las cuñas de apoyo y el mecanismo de cierre.

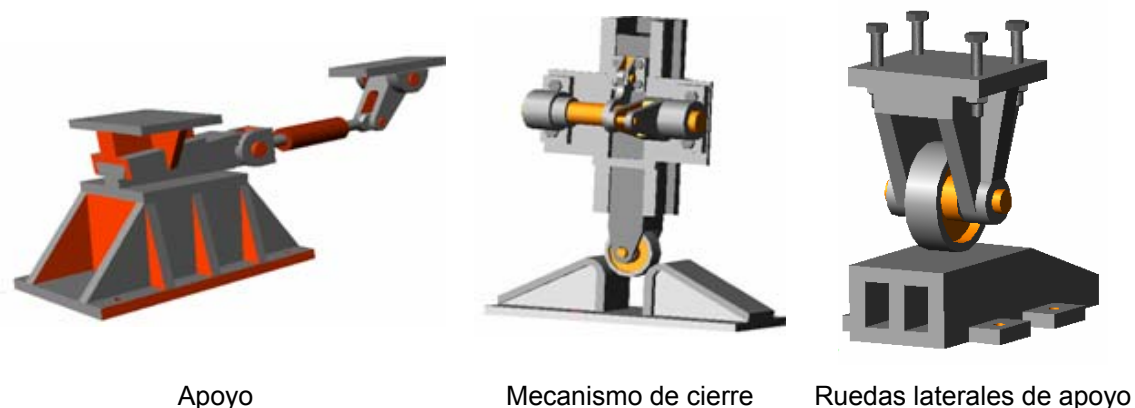
Por error de operación y explotación el puente hoy trabaja como estacionario. Este sistema de apoyo para el giro presenta, entre otros, los siguientes problemas:

- La base de apoyo de las ruedas, compuesta por paquetes de planchas metálicas de 20 mm de espesor, se encuentra muy oxidada y presenta en estos momentos grietas propias de fatiga y de las malas condiciones de explotación. En otros trabajos [6, 7] también se presentan y valoran éstos fenómenos.
- Es necesario limpiar, revisar, medir y quizás rectificar las ruedas. Si no pueden ser vueltas a utilizar éstas mismas ruedas, será necesario fabricarlas.

Desarrollo

Modelación

A partir de mediciones directas realizadas en el puente, se elaboraron los modelos del mecanismo de apoyo, del de cierre y parte del mecanismo de giro del puente. Por cuestiones de espacio en este artículo sólo se ejemplificará con la modelación y simulación numérica del apoyo, al ser éste el más deteriorado de los tres, aunque se modelaron y simularon los tres mecanismos. En la Figura 1 aparecen los tres modelos.



Apoyo

Mecanismo de cierre

Ruedas laterales de apoyo

Figura 1. Modelos geométricos 3D confeccionados.

El apoyo posee tres componentes principales: la base, la cuña (a la que acopla el mecanismo tensor) y la viga superior. En la Figura 2 se pueden apreciar éstos componentes.

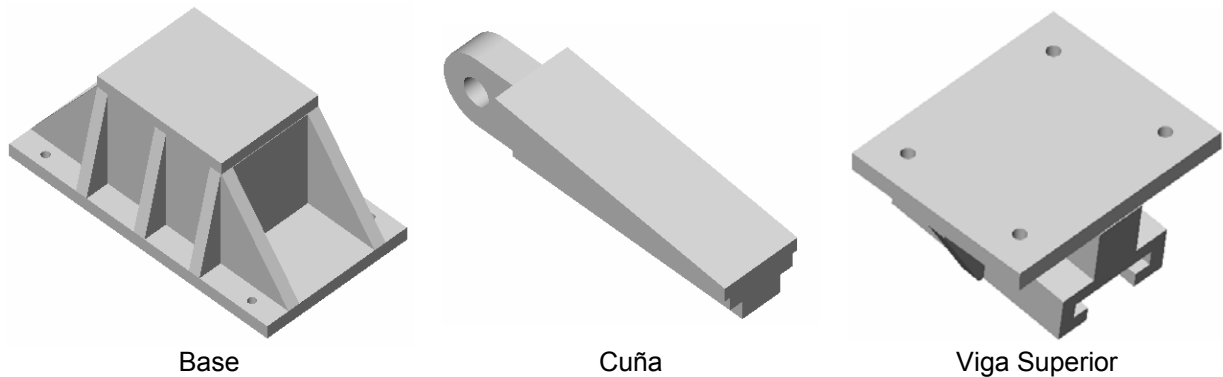


Figura 2. Componentes del Apoyo.

La viga superior del apoyo tiene como función lograr el acople inclinado con la cuña sobre la base y mantenerse fija mediante tornillos a la viga del puente, con lo que lograría transmitir la carga hasta la base que se encuentra empotrada a los pilotes de hormigón.

Resultados del análisis del material del mecanismo

Los mecanismos analizados fueron construidos hace más de 100 años (a lo largo de 1906) y reconstruidos posteriormente. Los documentos que avalan sus materiales hoy no existen, por lo que fue necesario determinar experimentalmente cada una de las características y propiedades mecánicas de los materiales de las piezas, también se determinó su composición química y se realizó un análisis metalográfico para determinar su estructura y tamaño de grano. Luego se buscó a qué marcas de acero de los que entraban al país en la época en que se reconstruyó, se parecen. Este procedimiento también es utilizado en otros trabajos. [4, 5, 8, 9]

Después de lo anterior, fue necesario determinar a qué acero actual es parecido ya que con dicho acero será que se simulará numéricamente el modelo construido y finalmente se reconstruirán las partes deterioradas del puente.

A continuación se muestra solamente los resultados de los análisis realizados al ala de la viga principal y a uno de los apoyos.

Tabla 1. Resultados del análisis químico.

Material	Composición Química %					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
Ala de la viga	0.25	0.32	0.53	0.1	0.05	0.15
Apoyo	0.26	0.059	0.38	0.08	0.04	-

A continuación se muestran las imágenes de las pruebas realizadas a las probetas del material del puente:

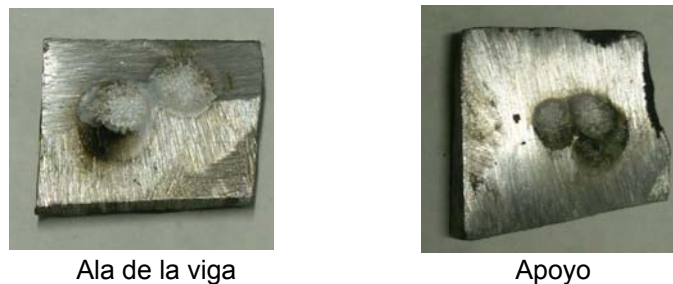


Foto 5. Probetas del puente con las huellas del análisis químico.

Los aceros soviéticos similares con que pudo haberse reconstruido el puente en algún momento: según el manual *Metallurgist's Handbook* [10], son:

Tabla 2. Aceros soviéticos con composición química similar.

Material	Acero Soviético similar	Composición Química, %					
		C	Si	Mn	P	S	Cr
Ala de la viga	Ст. 4с	0.18-0.27	0.12-0.35	0.40-0.70	0.05	0.05	-
Apoyo	Ст. 4с кп	0.18-0.27	Trazas	0.40-0.70	0.05	0.05	-

Ст. 4с - Ст. 4с кп - clasificados como “Aceros para la Construcción de Barcos”, elaborados en un horno Siemen Martin (*open hearth*), кп – en la literatura soviética [11] significa que es un acero calmado.

Lo que quiere decir que los aceros que hoy conforman el puente pueden ser, desde el punto de vista de la composición química, los aceros Ст. 4с y Ст. 4с кп.

Debido a las condiciones actuales de deterioro del puente, fue imposible extraer y confeccionar probetas que cumplieran las exigencias de las normas para determinar experimentalmente las propiedades mecánicas. Por lo que fueron obtenidas de los manuales [10] y [11].

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los aceros Ст. 4с y Ст. 4с кп

Material	Acero soviético similar	Propiedades Mecánicas						
		Límite de Resistencia a la Tracción, σ_{MAX} (MPa)	Límite de Fluencia, σ_Y (MPa)	Dureza	Resiliencia (kgf.m/cm ²)	Elongación mínima, %, en planchas de espesores		
						δ_b	δ_{10}	δ_5
Ala de la viga	Ст. 4с	420-520	240-260	HB=143	6-8	14	15	16
Apoyo	Ст. 4с кп	420-520	240-260	-	6-8	14	15	16

De los aceros actuales, el más parecido, que de hecho será el acero con el cual se reconstruirán las partes componentes del puente, es el acero ASTM A36 y por tanto fue el acero con el cual se llevó a cabo la simulación del apoyo. La composición química y las propiedades mecánicas se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 4. Composición química - ASTM A36 [12]

Elementos	%
Carbono (C)	0,25-0.29
Cobre (Cu)	0.20
Hierro (Fe)	98,0
Manganeso (Mn)	1.03
Fósforo (P)	≤= 0,04
Silicio (Si)	0.28
Azufre (S)	≤= 0,05

Tabla 5. Algunas propiedades mecánicas - ASTM A36 [12]

Propiedad	Valor
Densidad, g/cm ³	7.85
Resistencia a la tracción, MPa	400 – 552
Límite de Fluencia, MPa	250
Módulo de Young, MPa	200 000
Modulo de Cortante, MPa	79 300
Coefficiente de Poisson	0.26
Elongación, %	18
Dureza Rockwell B	67 - 83
Dureza Brinell	119 - 159

El análisis metalográfico de las muestras fue realizado en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Las Villas. A continuación se muestran las imágenes obtenidas (Foto 6):

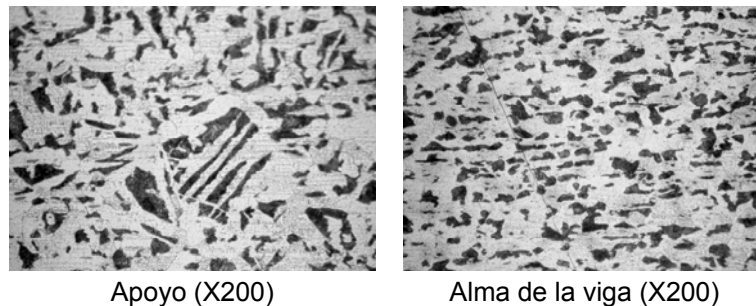


Foto 6. Estructura de las probetas obtenidas en el microscopio electrónico.

Se aprecia una coincidencia en el tipo de estructura Ferrítico-Perlítica y una leve diferencia en el tamaño de grano, 7 para el apoyo y 8 para el ala de la viga, lo que los hace muy similares desde éste punto de vista.

Simulación numérica

Se llevó a cabo la simulación estática del modelo geométrico confeccionado del apoyo del puente mediante el Método de los Elementos Finitos. Algunos puentes y sus componentes han sido valorados por éste método [1, 3-5, 13-16] quedando demostrada la efectividad del mismo. En este trabajo se realizó un mallado del modelo con elementos sólidos tetraédricos de 10 nodos de tamaño 3,8 mm generándose un total de 7223 nodos. El material asignado al modelo, como ya se explicó anteriormente, fue el ASTM A36. Las restricciones impuestas fueron del tipo empotramiento en la parte inferior del apoyo, la cual va fija a los pilotes de hormigón ubicados en el centro y en los extremos del puente.

Cuando el puente da servicio a cargas rodantes sobre él, las cargas se transmiten a la parte superior de los 6 apoyos a través de las vigas que descansan sobre éstos.

Para conocer el valor de la carga, se parte de los resultados obtenidos por la Estación Comprobadora de Puentes, la cuál realizó un estudio considerando 5 camiones alineados uno detrás de otro, cargados con una determinada cantidad de sacos de arena de acuerdo a la norma y que servirían para calcular las cargas máximas a que podía estar sometida la parte metálica del puente. Los resultados de este estudio son los siguientes: 300 kN en los apoyos de los extremos y 600 kN en los del centro. El valor de carga utilizado para realizar la simulación fue 600 kN.

En la Figura 3 aparece el modelo de elementos finitos confeccionado.

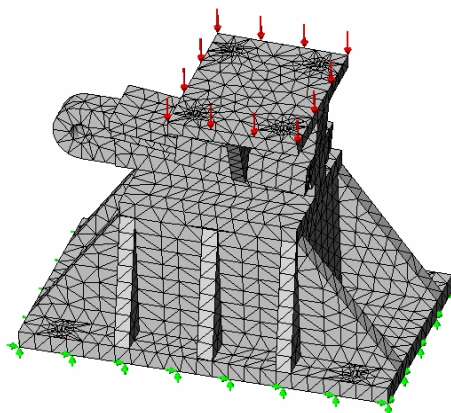


Figura 3. Modelo de elementos finitos del apoyo

Análisis de sensibilidad del modelo de Elementos Finitos

El Análisis de Sensibilidad se realiza para asegurar la precisión del modelo frente a alguna variable tal como la tensión, la deformación o el desplazamiento. En este trabajo se realizó para las dos primeras variables mencionadas, pero haciéndolo para una sola de ellas, era suficiente.

Se realizaron tres muestreos de las tensiones y de los desplazamientos con diferentes densidades de malla en las mismas coordenadas (173.91, 205.05, 8.36) de la plancha superior del modelo del apoyo. Se fue variando la densidad de malla hasta que el valor de las variables analizadas convergiera sin un error específico superior al 10 % entre tres análisis consecutivos.

En la Figura 4 aparecen imágenes del mallado realizado y en la Tabla 6 los resultados del análisis.

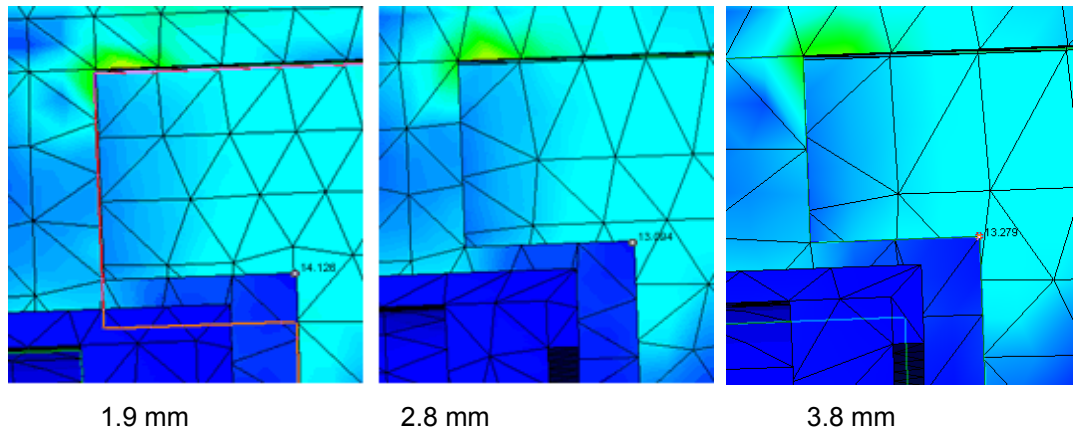


Figura 4. Mallados de distintos tamaños para el análisis de sensibilidad del modelo

Tabla 6. Tensiones y desplazamientos obtenidos con diferentes tamaños de malla.

Tipo de Malla	Tamaño del lemento (No. de Elementos)	Desplazamientos Resultantes, mm	Tensión von Misses, MPa	Diferencia, % Tensión von Mises
Malla Fina	1,9 (56 942)	0.0023	1.38	7.24
Malla Media	2.8 (31 283)	0.0023	1.28	1.56
Malla Gruesa	3.8 (9 912)	0.0023	1.30	-

En la tabla anterior se observa que todas las mallas realizadas ofrecen buenos resultados pues la diferencia entre los valores de las variables analizadas entre tres análisis consecutivos fue menor de 7.24 %, indicando esto que la precisión es adecuada.

La validación experimental del modelo no pudo efectuarse debido a las condiciones de deterioro que posee el puente actualmente, el cual está prácticamente inhabilitado para su uso.

Luego de realizado el análisis de sensibilidad se ejecuta el procesamiento del modelo para determinar los desplazamientos, las tensiones y el factor de seguridad.

En las Figuras 5, 6 y 7 aparecen los resultados gráficos y en la Tabla 7 los resultados numéricos.

Particularmente en la Figura 5 aparecen los desplazamientos resultantes (URES) de cada uno de los nodos, los cuales tienen su valor máximo en los extremos de la viga superior, con un valor muy pequeño (0.014 mm).

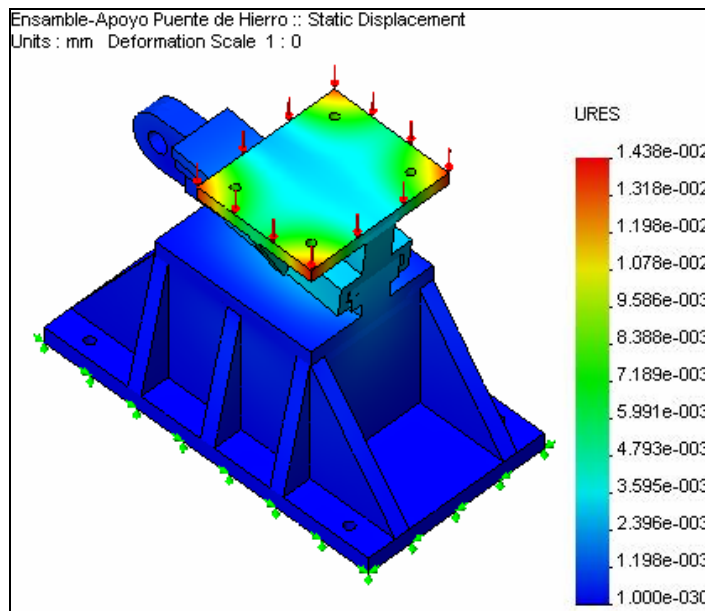


Figura 5. Desplazamientos resultantes, mm

Como se puede apreciar en la Figura 6, las tensiones von Mises máximas aparecen en la viga superior que va atornillada al puente, específicamente en las uniones (cartabones) con la plancha superior.

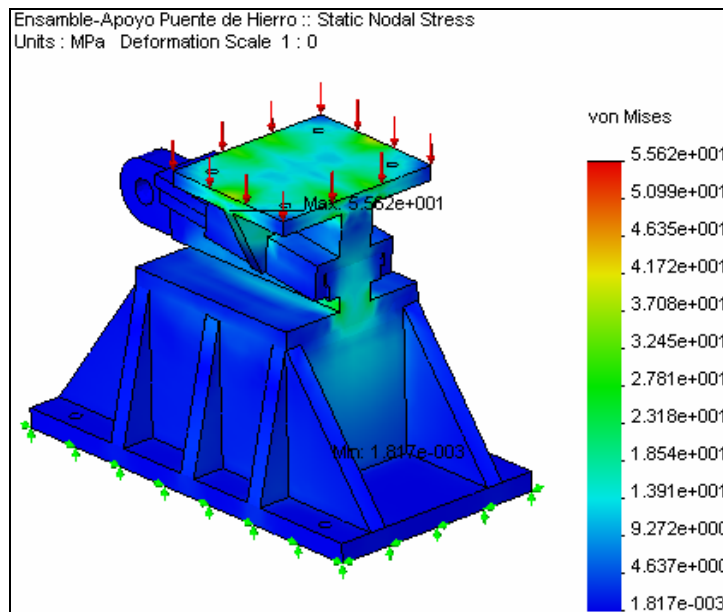


Figura 6. Tensiones von Mises, MPa. Para determinar el Factor de Seguridad (FOS), se realizó el análisis de acuerdo a la tensión de fluencia del material, el valor mínimo es de 4.5, lo que asegura que el apoyo no fallará para las cargas estáticas que fueron aplicadas. En la Figura 7 se aprecia la distribución de dicho factor.

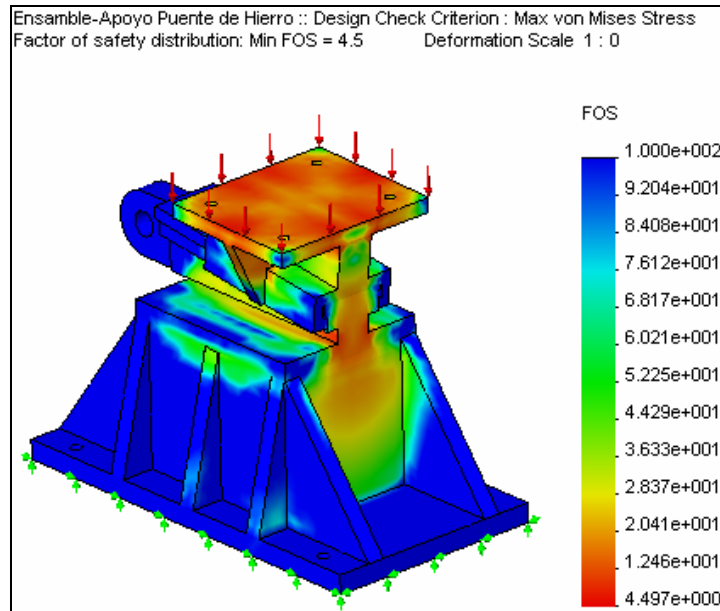


Figura 7. Distribución del factor de seguridad

Tabla 7. Principales resultados numéricos de la simulación del apoyo.

Variable	Resultado
Desplazamiento resultante máximo, mm	0,014
Tensión von Mises máxima, MPa	55.62
Factor de Seguridad según la tensión de fluencia del material	4.5

Conclusiones

1. Después de determinar la composición química y las propiedades mecánicas de las dos muestras de los materiales del puente, se concluye que son aceros que poseen similares propiedades y estructura y que es posible la reconstrucción de los mecanismos del puente con el acero ASTM A36.
2. El análisis de sensibilidad o convergencia ofreció una precisión adecuada ya que la diferencia entre los valores de las variables analizadas fue inferior al 10%.
3. Los resultados de la simulación de los apoyos del puente arrojan que las tensiones están en niveles muy seguros, demostrado mediante el factor de seguridad de 4,5. Los desplazamientos resultantes alcanzan valores muy pequeños, del orden de 0.014 mm. Todo esto significa que desde el punto de vista de la resistencia el apoyo no fallará para las condiciones de carga valoradas.

Referencias

1. Aktan, A. E., Farhey, D. N., Brown, D. L., *et al.* "Condition assessment for bridge management". *Journal Infrastructure Engineering*. 1996, vol. 2, n° 3, p. 108-117. ISSN 1076-0342.
2. Ermopoulos, J. y Spyrakos, C.C. "Validated analysis and strengthening of a 19th century railway bridge". *Engineering Structures*. 2006, vol. 28, p. 783-792. ISSN 0141-0296.
3. Farhey, D., Naghavi, R., Levi, A., *et al.* "Deterioration assessment and rehabilitation design of existing steel bridges". *Journal of Bridge Engineering*. 2000, vol. 5, n° 1, p. 39-48. ISSN 1084-0702.
4. Kwon, K. y Frangopol, D. M. "Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on monitoring data". *International Journal of Fatigue*. 2010, vol. 32, n° 8, p. 1221-1232. ISSN 0142-1123.
5. Liu, M., Frangopol, D. M. y Kwon, K. "Fatigue reliability assessment of retrofitted steel bridges integrating monitored data". *Structural Safety*. 2010, vol. 32, p. 77-89. ISSN 0167-4730

6. Majka, M. y Hartnett, M. "Dynamic response of bridges to moving trains: A study on effects of random track irregularities and bridge skewness". *Computers and Structures*. 2009, vol. 87, p. 1233-1252. ISSN 0045-7949
7. Ming, L., Frangopol, D. M. y Kihyon, K. "Fatigue reliability assessment of retrofitted steel bridges integrating monitored data". *Structural Safety*. 2010, vol. 32, p. 77-89. ISSN 0167-4730
8. Pisarenko, G. S. *Manual de Resistencia de Materiales*. Moscú: Editorial MIR, 1985. 694 p.
9. Spyrakos, C. C., Raftoyiannis, I. G. y Ermopoulos, J. C. "Condition assessment and retrofit of a historic steel-truss railway bridge". *Journal of Constructional Steel Research*. 2004, vol. 60, n° 8, p. 1213-1225.
10. S/A. *Metallurgist's Handbook*. Moscow: MIR Publishers, 1968. 520 p.
11. Pipinato, A., Pellegrino, C., Bursi, O. S., et al. "High-cycle fatigue behavior of riveted connections for railway metal bridges". *Journal of Constructional Steel Research*. 2009, vol. 65, p. 2167-2175. ISSN 0143-974X.
12. Brencich, A., Gambarotta, L. "Assessment procedure and rehabilitation of riveted railway girders: The Campasso Bridge". *Engineering Structures*. 2009, vol. 31, p. 224-239. ISSN 0141-0296.
13. Aktan, A. E., Catbas, N., Turer, A., et al. "Structural identification: Analytical aspects". *Journal of Structural Engineering*. 1998, vol. 124, n° 7, p. 817-829. ISSN 0970-0137.
14. Atkan, A. E., Naghavi, R., Farhey, D. N., et al. *HeNondestructive/destructive tests and associated studies on two decommissioned steel truss bridges*. Dept. of Transp, University of Cincinnati. 1994. Rep. N°: FHWA/OH-95/013
15. Automation Creations, Inc. *MatWeb*, [Consultado el: 19 de marzo de 2009]
Disponible en: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6> .
16. Lee, Sang-Ho. y Jeong, Yeon-Suk. "A system integration framework through development of ISO 10303-based product model for steel bridges". *Automation in Construction*. 2006, vol. 15, p. 212-228. ISSN 0926-5805

**César A. Chagoyen-Méndez¹, Yumar Acosta-García¹, Yandry Rodríguez-Toledo²,
Carlos Recarey-Morfa², Gregorio B. Aragón-López³, José Leiva-Pérez³**

I. Universidad Central de Las Villas Marta Abreu. Facultad de Ingeniería Mecánica. Cuba

E-mail: cachagoyen@uclv.edu.cu, yacosta@gmail.com, yrodriguez@uclv.edu.cu

II. Universidad Central de Las Villas Marta Abreu. Facultad de Construcciones. Cuba

E-mail: recarey@uclv.edu.cu

III. Ministerio del Transporte. Estación Comprobadora de Puentes. Cuba

E-mail: vpplacet@vcl.transnet.cu, dvptec@sicen.ferronet.cu