

Linking numerical simulations with test experiences and its application to a railroad bridge

**César A. Chagoyén Méndez¹, David González Martínez¹,
Gregorio B. Aragón López², José Leiva Pérez²**

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería Mecánica,
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní km 5.5,
Santa Clara 54830, Villa Clara, Cuba. Telf: 053 42 281630.

cachagoyen@uclv.edu.cu, davidgm@uclv.edu.cu

²Estación Comprobadora de Puentes, Distancia de Vías y Puentes.
Placetas, Villa Clara, MITRANS, Cuba. Telf: 053 42 883173.

vpplacetas@vcl.transnet.cu, dvptec@sicen.ferronet.cu

Abstract

This paper introduces the benefits of linking Finite Elements Analysis and laboratory testing experiences in structural analysis. One particular case is studied: the static analysis of a railroad bridge metallic structure. A procedure for calibrating the analysis model is introduced, using mesh sensibility analysis and strain gage measurements, achieving considerable improvements in the application of both approaches.

Keywords: bridge, simulation, modeling, structural analysis, strength of materials.

La vinculación de la simulación numérica y los ensayos, su aplicación a un puente de ferrocarril

Resumen

Este trabajo introduce la motivación por los beneficios del enlace del Análisis por Elementos Finitos con los Ensayos en estructuras. En él aparece una aplicación típica en el campo del análisis estático de estructuras, específicamente a un puente de ferrocarril metálico. Se presenta un procedimiento para la calibración del modelo tanto a través del análisis de sensibilidad de la malla como a partir de mediciones extensométricas. De forma tal que mejore la correspondencia entre ambos procedimientos.

Palabras clave: puente, simulación, modelado, análisis estructural, resistencia de materiales.

Introducción

En el mundo competitivo de hoy, los ingenieros asumen el diseño de productos complejos que necesitan satisfacer mayores criterios de aceptación. Los productos deben ser fuertes, ligeros, seguros, menos difíciles de construir y de mantener. Para dar esta respuesta en tiempo y a un costo competitivo, la industria cuenta con herramientas de simulación. El Análisis por Elementos Finitos (de sus siglas en inglés: FEA) es una técnica potente para simular y mejorar el

comportamiento de un producto bajo diferentes condiciones de cargas.

Durante muchos años ha existido un amplio contacto entre el FEA y los Ensayos en la Ingeniería. A pesar del ello, la implementación de esta combinación en muchos casos, fue prohibitiva debido a razones prácticas y culturales: los analistas y los experimentadores utilizan su propio vocabulario, trabajan en lugares diferentes y frecuentemente usan equipos distintos así como software y formatos de archivos incompatibles.

Los resultados de los Ensayos frecuentemente son utilizados como referencia para validar, calibrar o refinar el modelo de Elementos Finitos. Una mejor explotación de los resultados de la experimentación y del análisis les traerá a los ingenieros mayor confianza en la simulación así como el incremento de su necesidad para la optimización del diseño. También ganarán en experiencia para futuras simulaciones.

El enfoque predictivo del FEA lleva implícito la calidad del modelo a simular, del software para analizarlo y del criterio de los ingenieros al interpretar los resultados del análisis. Para mantener los requerimientos de calidad, los modelos a simular deben ser validados. Entre las diferentes vías que existen para hacerlo, los ensayos aún continúan siendo el método preferido [1].

El FEA actual es basado en valores nominales de los parámetros de entrada, por lo que el nuevo modelo será probabilístico por naturaleza. La incertidumbre está presente en ambas técnicas. En el FEA puede aparecer en la concepción del modelo, en la modelación matemática, en la discretización, en las soluciones numéricas, etc. Durante la realización de los Ensayos también puede estar presente en la propia definición del ensayo, en la instrumentación, en la adquisición de datos, etc. [2].

El reconocimiento de la existencia de la incertidumbre es una buena razón para pensar más aún en la validación de los modelos. La validación del modelo lleva dos estudios: el análisis de sensibilidad de la malla y la comparación de

los resultados de la experimentación con los resultados del FEA.

Otro aspecto interesante de este trabajo es que la estructura del puente de ferrocarril que se analiza posee más de 100 años de construida, con el consiguiente deterioro. El análisis de estas estructuras longevas, con el objetivo de su mantenimiento y/o reparación, debe constituir una línea de trabajo para los directivos de esta actividad en el país [3-7].

Descripción del modelo

El estudio de calibración fue realizado a uno de los 42 puentes de ferrocarril que existen en la línea central, denominado **Km 9.578** (Figura 1). El mismo está ubicado en la línea de ferrocarril que une a las ciudades de Santa Clara y Placetas (a 7 km de la primera). Este puente es metálico y considerado como pequeño pues sólo tiene 18.27 metros de longitud. Además los especialistas lo estiman en un estado de deterioro avanzado, presentando alto grado de corrosión en gran parte de sus elementos así como arriostamientos verticales sueltos, lo que compromete la seguridad del mismo (Figura 2).

Geometría

Las vigas principales del puente poseen 14 rigidizadores cada una, dispuestos como se muestra en el esquema de la Figura 3. En esa misma figura se pueden apreciar las 6 platabandas (3 superiores y 3 inferiores) así como la dis-



Figura 1. Puente Km. 9,578 de la Línea Placetas-Santa Clara.

tancia a la que se ubican las mismas con respecto al lateral izquierdo.

Las secciones transversales de las vigas en las posiciones señaladas (a 1,83 m, a 2,58 m, a 4,55 y en el apoyo) también con respecto al lateral izquierdo aparecen representadas en el esquema de la Figura 4. En esa misma figura aparecen re-

presentados los arriostramientos verticales que coinciden con los rigidizadores 2 y 13 y 6 y 9, respectivamente.

Entre ambas vigas se encuentran los arriostramientos horizontales. En el esquema de la Figura 5 aparece una vista superior en la que se pueden apreciar estos elementos.



Figura 2. Algunos deterioros presentes en el puente.

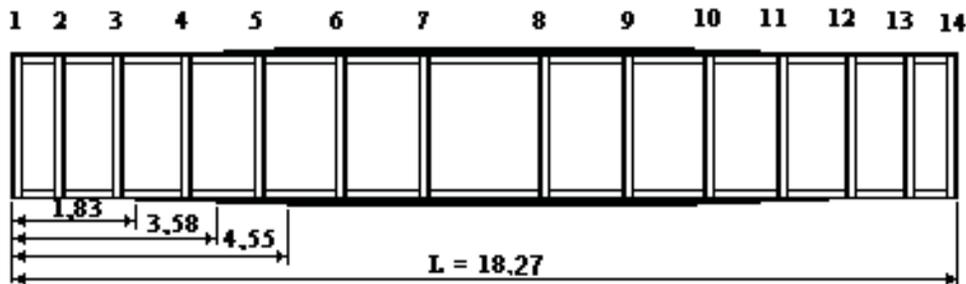


Figura 3. Esquema de la viga con la ubicación de los rigidizadores y comienzo de las platabandas.

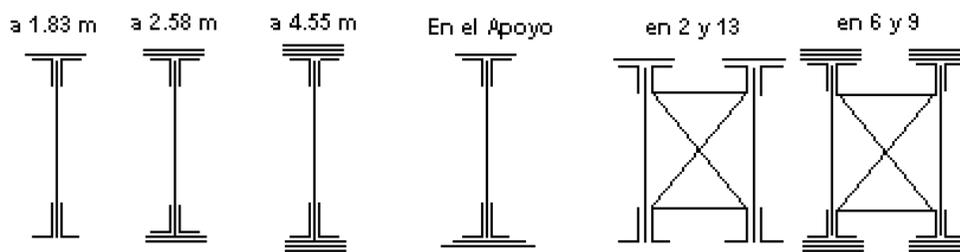


Figura 4. Esquema de las secciones transversales del puente y arriostramientos verticales.

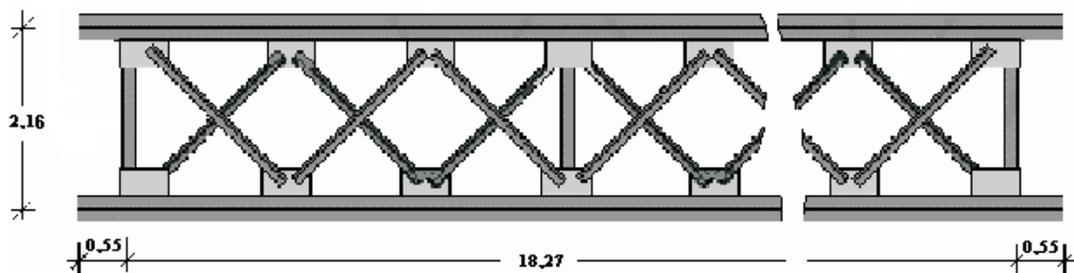


Figura 5. Esquema de la forma y ubicación de los arriostramientos horizontales.

Material

El puente analizado, como se dijo, fue construido alrededor 1906. No existe en la actualidad información de las características mecánicas de los materiales que lo componen, por lo que fue necesario determinar experimentalmente las características de los materiales del mismo [8].

Se realizó un diseño de experimentos y a partir de él se confeccionaron las probetas para la realización de los ensayos mecánicos (tracción, dureza e impacto) tanto a la plancha como a los angulares que componen las vigas del puente. También se elaboraron probetas para la realización de los ensayos metalográfico y químico. Todos estos ensayos aportaron las características que aparecen en la Tabla 1. Al comparar estos resultados con los materiales actuales se puede afirmar que el material de la plancha es similar al acero **AISI 1008** y el angular es similar al acero **AISI 1015**. Este aspecto es importante sobre todo si se decide acometer la reparación del puente. Este procedimiento también es utilizado en otros trabajos [6, 7, 9-11].

Restricciones

Este puente posee los cuatro extremos inferiores apoyados sobre los estribos que son construidos para tal efecto. Por ello en las planchas correspondientes a los apoyos se ubicaron los desplazamientos prescritos, es decir, en los ejes X y Y (ver Figura 4) el desplazamiento es cero, mientras que en el eje Z se permitió que se desplazara

10 mm, que es el desplazamiento que permite la ranura que existe entre la plancha de apoyo y el pin que se encuentra empotrado en el estribo. Hay que tener en cuenta que en estos elementos está presente un alto grado de oxidación por el tiempo que llevan trabajando sin mantenimiento. En otros trabajos [7, 12] también se presentan y valoran éstos fenómenos. Los desplazamientos angulares también fueron limitados a cero al no existir juego alguno entre el pin y la ranura, que permita el giro de la estructura.

Cargas

Para realizar la prueba estática y con ella las mediciones mediante galgas extensométricas y sensores de desplazamiento ubicados convenientemente en el puente (aspecto que se abordará posteriormente), se utilizó una locomotora del tipo TEAM-4 que fue ubicada en el centro del puente. Este tipo de locomotora tiene un peso de 122,4 Tn (1200334 N) que llegan al puente a través de seis ejes hasta las doce ruedas. Esta locomotora posee un longitud de 17,68 m, es decir, casi la misma longitud del puente que es de 18,27 m, por lo que durante la simulación estática esta carga fue considerada como uniformemente distribuida sobre toda la longitud del puente. También es considerado el peso propio de las estructuras que componen el puente. Además está presente la carga de lo que se conoce como “cama”, la cual es generada por el peso de las traviesas, los carriles, los guarda carril, las guarderas, las mordazas, presillas, clavos, tornillos, tuercas y aran-

Tabla 1
Características de los materiales componentes de las vigas del puente y de los aceros actuales que más se parecen a la plancha y a los angulares

Característica Mecánica	Plancha	AISI 1008	Angular	AISI 1015
Tensión Máxima a Tracción (MPa)	352	303-358	372	385
Tensión de Rotura (MPa)	289	-	334	-
Tensión de Fluencia (MPa)	240	180-240	325	325
Módulo de Elasticidad (MPa)	2·10 ⁵	2·10 ⁵	2,05·10 ⁵	2,05·10 ⁵
Elongación (%)	31	42-48	26	23
Coefficiente de Poisson	0,29	0,29	0,29	0,29
Dureza Vickers (HV)	147	108	165	115
Resilencia (kgf-m/cm ²)	3,7	-	7,2	-

delas. El peso de este conjunto alcanza un valor aproximado de 0,7 Tn/m, lo que aporta una carga de 12,789 Tn (125417,2 N) que también es considerada como distribuida uniformemente sobre las vigas del puente.

Con estas consideraciones se construyó el modelo sólido 3D de elementos finitos que aparece representado en la Figura 6.

Validación del modelo

Análisis de sensibilidad de la malla

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. Este análisis podía haberse realizado para una sola de ellas, pero en este trabajo se hizo para las tres variables antes mencionadas.

El modelo se corrió varias veces con diferente densidad de malla en la Platabanda (Plancha) Inferior Izquierda del puente, hasta que el valor de la variable analizada convergiera sin un error específico considerable entre dos análisis consecutivos. Se obtuvieron los valores de las

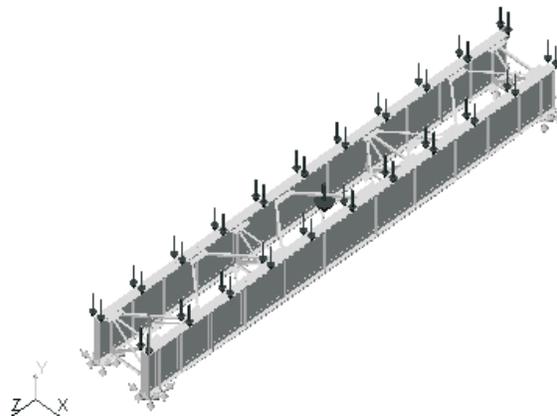


Figura 6. Modelo 3D del puente con las cargas y las restricciones.

tres variables en dos lugares distintos y distantes pertenecientes a dicha plancha, específicamente en $L/2$ (centro del puente) y en $L/4$ (en un cuarto de la longitud total).

A continuación se muestran las Tablas 2, 3 y 4 con los valores obtenidos de las tres variables, en los dos lugares, con diferente densidad de malla.

Tabla 2
Valores de Tensión

Modelo 3D	Tamaño del Elemento (N° de Elementos en la Platabanda)	σ_z (MPa)		Diferencia (%)	
		Lugar 1 ⁽¹⁾	Lugar 2 ⁽²⁾	Lugar 1 ⁽¹⁾	Lugar 2 ⁽²⁾
Malla Fina	63 (2536)	18,385	7,477	0,36	2,04
Malla Media	126 (918)	18,319	7,6334	0,04	1,93
Malla Gruesa	189 (589)	18,311	7,7837	-	-

⁽¹⁾ Lugar 1: Platabanda Inferior Izquierda, en $L/2$.

⁽²⁾ Lugar 2: Platabanda Inferior Izquierda, en $L/4$.

Tabla 3
Valores de Desplazamiento

Modelo 3D	Tamaño del Elemento (N° de Elementos en la Platabanda)	δ_y (mm)		Diferencia (%)	
		Lugar 1 ⁽¹⁾	Lugar 2 ⁽²⁾	Lugar 1 ⁽¹⁾	Lugar 2 ⁽²⁾
Malla Fina	63 (2536)	4,9515	3,3732	0,06	0,02
Malla Media	126 (918)	4,9482	3,3725	0,19	1,47
Malla Gruesa	189 (589)	4,9386	3,423	-	-

⁽¹⁾ Lugar 1: Platabanda Inferior Izquierda, en $L/2$.

⁽²⁾ Lugar 2: Platabanda Inferior Izquierda, en $L/4$.

Tabla 4
Valores de Deformación

Modelo 3D	Tamaño del Elemento (N° de Elementos en la Platabanda)	ϵ_z (micro deformación)		Diferencia (%)	
		Lugar 1 ⁽¹⁾	Lugar 2 ⁽²⁾	Lugar 1 ⁽¹⁾	Lugar 2 ⁽²⁾
Malla Fina	63 (2536)	0,00007211	0,0000721	0,12	0,12
Malla Media	126 (918)	0,00007202	0,0000720	0,76	0,76
Malla Gruesa	189 (589)	0,00007147	0,0000714	-	-

⁽¹⁾ Lugar 1: Platabanda Inferior Izquierda, en L/2.
⁽²⁾ Lugar 2: Platabanda Inferior Izquierda, en L/4.

En las tablas anteriores se observa que las tres mallas realizadas ofrecen buenos resultados pues la diferencia entre los valores de las variables analizadas entre dos análisis consecutivos fue menor de 2,1%, indicando esto que la precisión es adecuada. Por lo tanto, en este caso particular de análisis, se empleará la Malla Gruesa que consume un menor tiempo para su realización y por consecuente en los cálculos [3, 5-7, 13-17]. A modo de ejemplo, estos resultados se encuentran ploteados en las curvas de la Figura 7 para la Tensión. A continuación se muestran imágenes de las tres densidades de malla utilizadas (Figura 8) en la platabanda inferior izquierda, realizados con el software COSMOSDesignSTAR 4.0 [18].

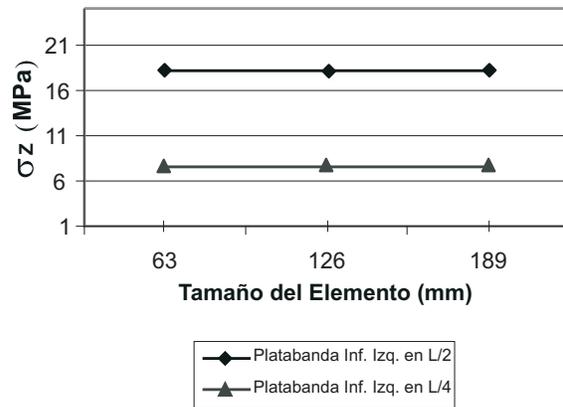


Figura 7. Curvas del Análisis de Sensibilidad de la variable Tensión.

Comparación de los resultados de los ensayos con los resultados del FEA

Para la medición de desplazamientos, tensiones y deformaciones fueron colocados convenientemente en el puente sensores y galgas extensométricas en determinados lugares del

puente, los cuales aparecen descritos en la Tabla 5. Para ello fue concebido un proyecto como el que se muestra en la Figura 9.

Las galgas extensométricas se colocaron en parejas en un mismo sentido, conectadas a medio puente de inducción. La medición fue realiza-

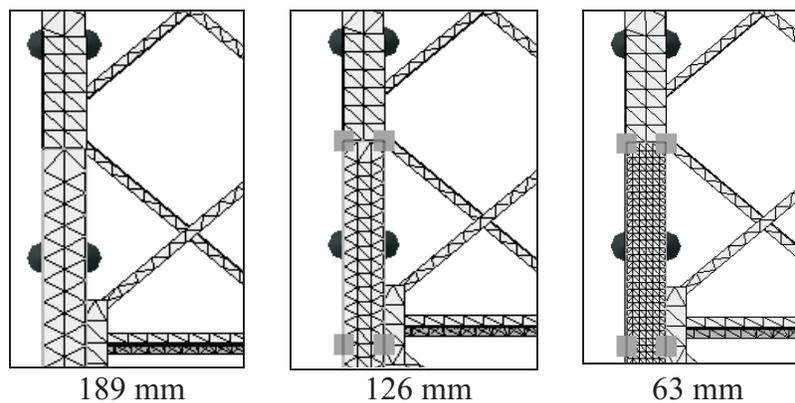


Figura 8. Tamaños de malla realizados para el análisis de sensibilidad.

da utilizando un equipo de adquisición de datos del tipo HBM MGC PLUS, de fabricación alemana.

En la Tabla 6 aparece una comparación entre los **desplazamientos** obtenidos de forma experimental y mediante la simulación.

En las Figuras 10, 11 y 12 aparecen imágenes de los resultados gráficos y numéricos de la corrida del modelo para obtener los desplazamientos en los mismos puntos y direcciones donde se colocaron los sensores en el puente.

En la Tabla 7 aparece una comparación entre las deformaciones obtenidas de forma experi-

mental y mediante la simulación. En la Tabla 8 aparece una comparación entre las tensiones obtenidas de forma experimental y mediante la simulación.

En las Figuras 13, 14, 15 y 16 aparecen imágenes de los resultados gráficos y numéricos de la corrida del modelo para obtener las deformaciones y tensiones en los mismos puntos y direcciones donde se colocaron las galgas extensométricas en el puente.

Otro resultado obtenido del post procesamiento de los resultados del AEF fue el Factor de Seguridad (FOS). Este Factor resultó ser, según el criterio de falla de la máxima tensión von Mi-

Tabla 5
Sensores y galgas colocados en el puente

Nº	Tipo	Modelo	Ubicación en el puente
1	Sensor de desplazamiento horizontal	WA-10 mm	En la mitad de la altura de la viga
2	Sensor de desplazamiento vertical	PA-5	A $\frac{1}{4}$ de la longitud de la viga
3	Sensor de desplazamiento vertical	PA-5	En la mitad de la longitud de la viga
4	Galga en dirección longitudinal	Hbm, 120 Ω , K = 2,07	En la mitad de la longitud de la viga
5	Galga en dirección transversal	Hbm, 120 Ω , K = 2,07	En la mitad de la longitud de la viga

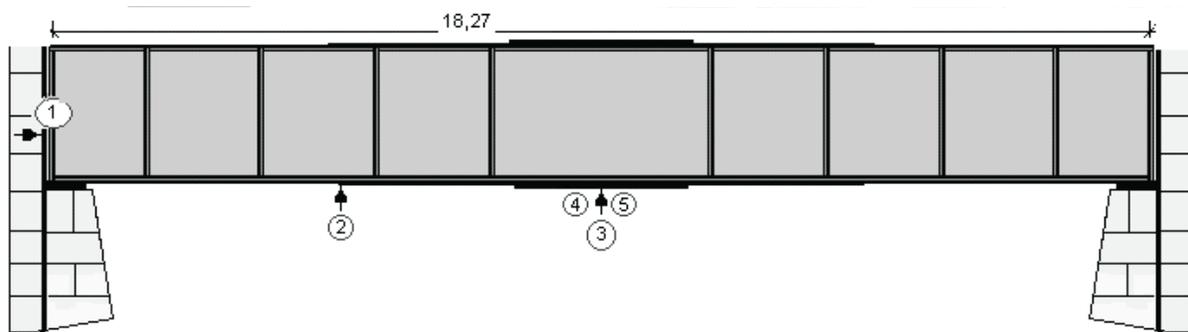


Figura 9. Proyecto de colocación de sensores y galgas extensométricas.

Tabla 6
Desplazamientos obtenidos mediante sensores y mediante el FEA

Lugar	Desplazamientos (mm)		Diferencia %
	Experimental	FEA	
1. Sensor WA-10 mm	0,687	0,68709	0,01
2. Sensor PA-5 (L/2) Viga Izquierda	6,618	6,3241	4,64
3. Sensor PA-5 (L/4) Viga Izquierda	4,28	4,1918	2,10

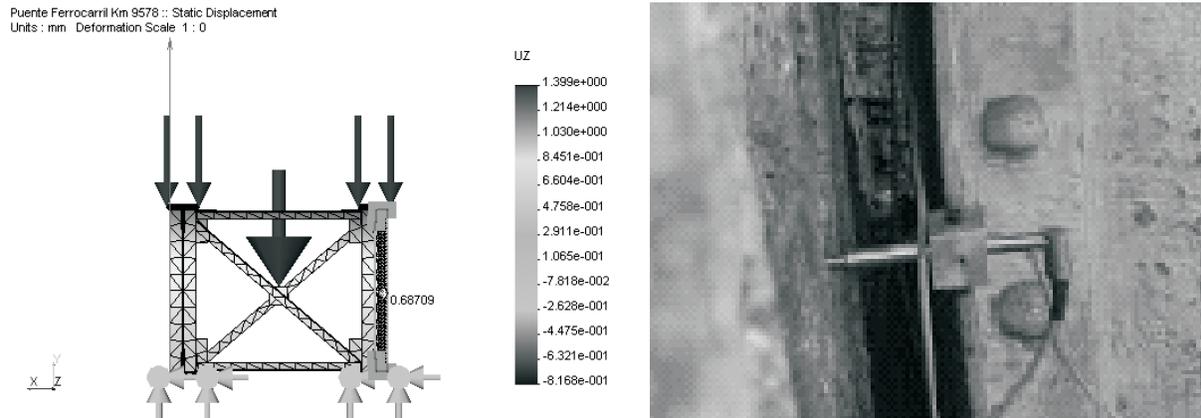


Figura 10. Imagen del modelo de EF del que se obtuvo el desplazamiento horizontal (U_z) en el punto donde se colocó el Sensor WA-10 mm (1). Observe el refinamiento de la malla en esa zona y también una imagen real del sensor colocado en el puente.

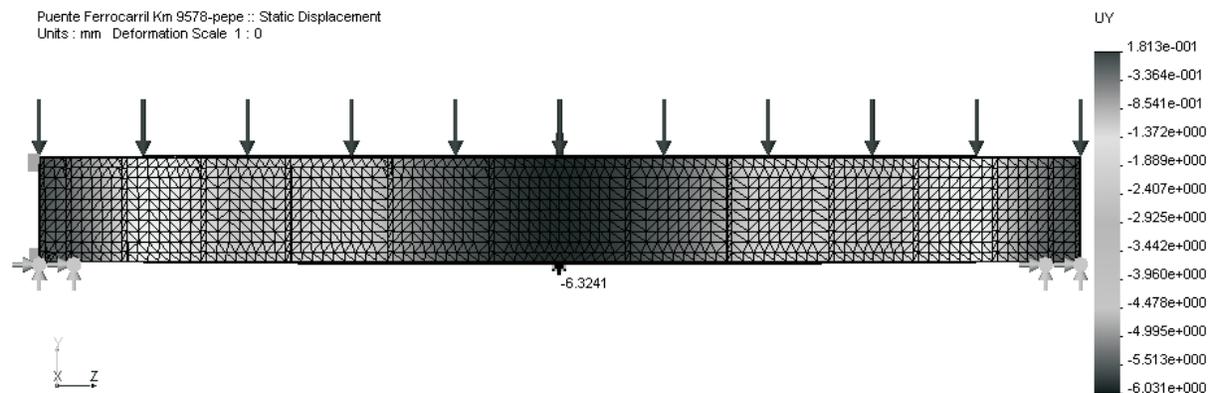


Figura 11. Imagen del modelo de EF del que se obtuvo el desplazamiento vertical (U_y) en el punto donde se colocó el Sensor PA-5 (L/2) (2), Viga Izquierda.

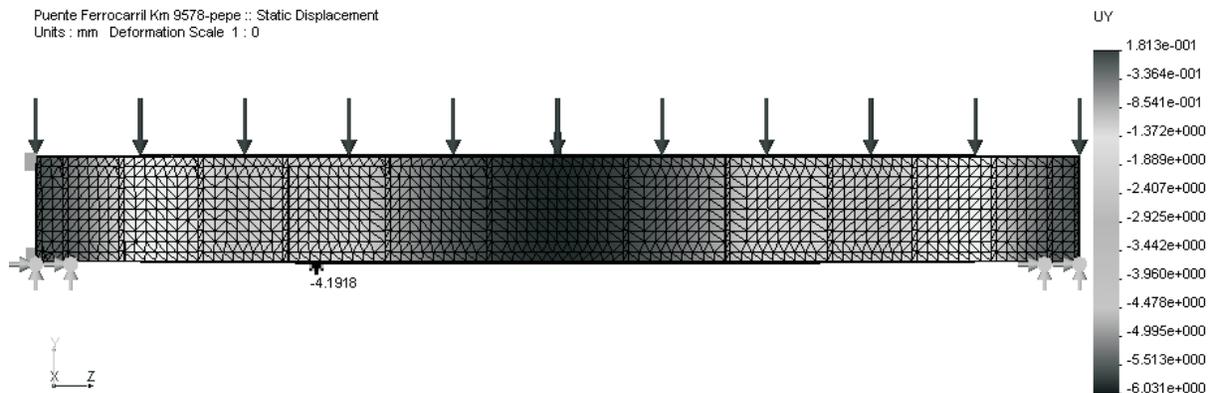


Figura 12. Imagen del modelo de EF del que se obtuvo el desplazamiento vertical (U_y) en el punto donde se colocó el Sensor PA-5 (L/4) (3), Viga Izquierda.

Tabla 7
Deformaciones obtenidas a partir de las mediciones con galgas extensométricas y mediante el FEA

Lugar	Deformaciones (micro deformación)		Diferencia %
	Experimental	FEA	
4. Galga Extensométrica	$7,7 \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_z = 7,9326 \cdot 10^{-5}$	2,93
5. Galga Extensométrica	$24 \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_x = 23,335 \cdot 10^{-5}$	2,77

Nota: Las deformaciones experimentales fueron obtenidas como promedio de 20 mediciones.

Tabla 8
Tensiones obtenidas a partir de las mediciones con galgas extensométricas y mediante el FEA

Lugar	Tensiones (MPa)		Diferencia %
	Experimental	FEA	
4. Galga Extensométrica	22,801	$\sigma_z = 21,913$	4,05
5. Galga Extensométrica	0,37·51	$\sigma_x = 0,3594$	4,36

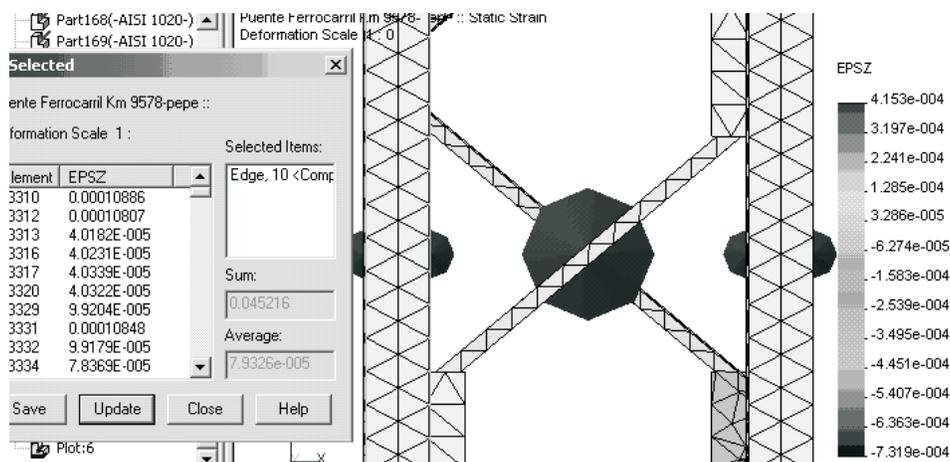


Figura 13. Imagen del modelo de EF del que se obtuvo la deformación ε_z en el punto y dirección en que se colocaron las galgas extensométricas (L/2), Viga Izquierda (4).

ses, de 1,3, el cual es un resultado apropiado. En la Figura 17 se puede apreciar la distribución de este Factor en el puente.

Conclusiones

1. El análisis de sensibilidad ofreció una precisión adecuada ya que la diferencia entre los valores de las variables analizadas entre dos análisis consecutivos fue menor de 2,1%.

2. Como resultado de la comparación de los resultados de los ensayos y del FEA se observa que en ningún caso la diferencia entre ellos supera el 5%, lo que valida tanto el modelo realizado como los ensayos efectuados.

3. La calibración del modelo por ambas vías posibilita establecer las condiciones de utilización del puente con niveles de seguridad apropiados.

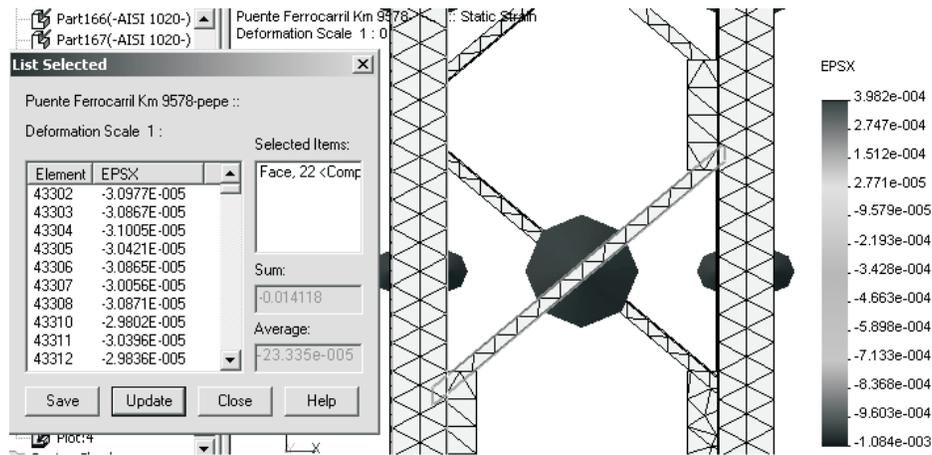


Figura 14. Imagen del modelo de EF del que se obtuvo la deformación ϵ_x en el punto y dirección en que se colocaron las galgas extensométricas (L/2), Viga Izquierda (5).

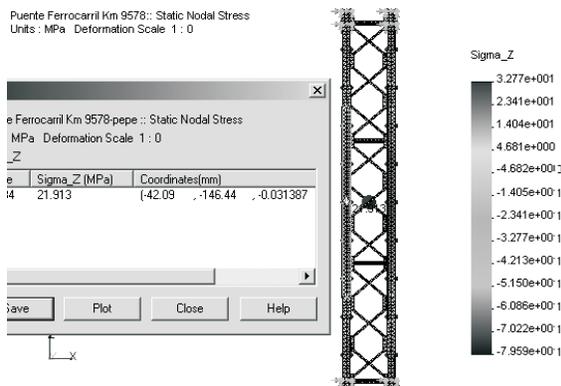


Figura 15. Imagen del modelo de EF del que se obtuvo la tensión σ_z en el punto donde se colocó la galga extensométrica (L/2) Viga Izquierda (4).

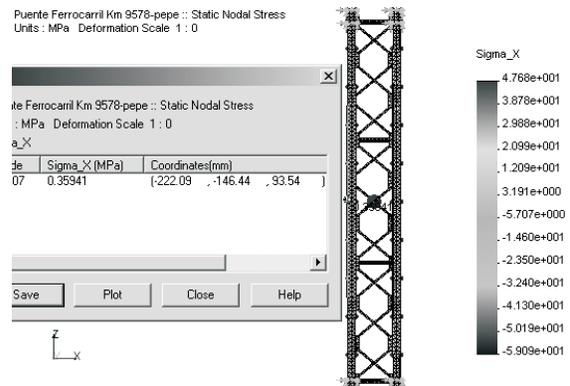


Figura 16. Imagen del modelo de EF del que se obtuvo la tensión σ_x en el punto donde se colocó la galga extensométrica (L/2) Viga Izquierda (4).

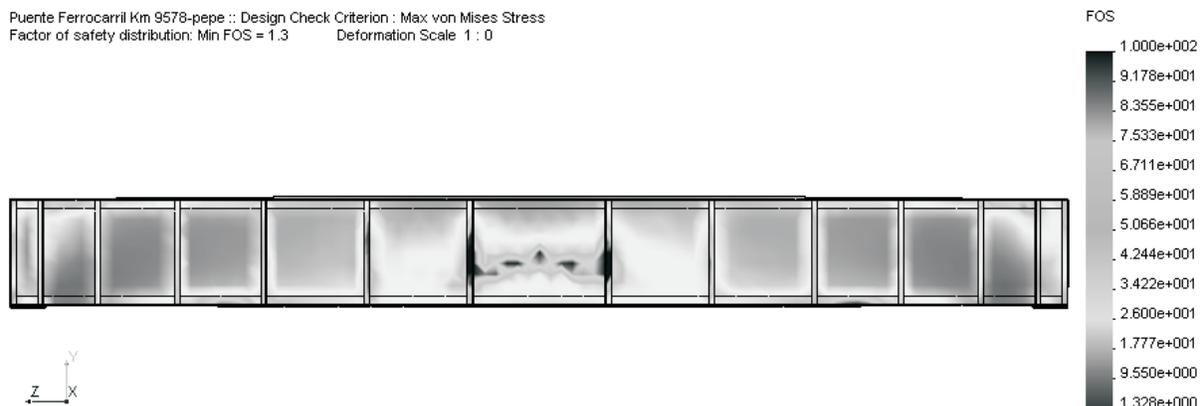


Figura 17. Imagen del modelo de EF del que se obtuvo el Factor de Seguridad (FOS), según el criterio de falla de la máxima tensión von Mises.

Referencias bibliográficas

1. E. Dascotte, A. Schoenrock, Validation and Updating of an Aeroengine Finite Element Model based on Static Stiffness Testing, 2nd MSC Aerospace Conference, June 7-11, (1999), Long Beach, CA, USA. Disponible en Web: <http://www.femtools.com/download/docs/mscac99.pdf>
2. Dascotte, E. Linking FEA with Test. Rev. Journal of Sound and Vibration, Vol. 38, No. 4, (2004) 12-17.
3. Aktan A.E., Farhey D.N., Brown D.L., Dalal V., Helmicki A.J., Hunt V.J., et al. Condition assessment for bridge management. Journal Infrastructure Engineering ASCE, Vol. 2, No. 3 (1996) 108-117.
4. Ermopoulos J., Spyrakos C.C. Validated analysis and strengthening of a 19th century railway bridge. Engineering Structures Vol. 28 (2006) 783-92.
5. Farhey D., Naghavi R., Levi A., Thakur A.M., Pickett M.A., Nims D., et al. Deterioration assessment and rehabilitation design of existing steel bridges. Journal of Bridge Engineering Vol. 5, No. 1 (2000) 39-48.
6. Kwon, K., Frangopol, Dan M. Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data. International Journal of Fatigue. Vol. 32, No. 8, (2010) 1221-1232.
7. Liu, M., Frangopol, Dan M., Kwon, K. Fatigue reliability assessment of retrofitted steel bridges integrating monitored data. Structural Safety. Vol. 32 (2010) 77-89.
8. Chagoyén Méndez, C. A. et al. Estudio de ingeniería inversa de materiales de puentes de ferrocarriles para la industria azucarera. Revista Centro Azúcar. Vol. 2008, No. 3 (2008) 12-20.
9. Pisarenko, G. S., Yákovlev, A. P., Matvéev, V. V. "Manual de Resistencia de Materiales", Editorial MIR, Moscú, 1985.
10. Spyrakos C.C., Raftoyiannis I.G., Ermopoulos J.C. Condition assessment and retrofit of a historic steel-truss railway bridge. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 60, No. 8 (2004) 1213-1225.
11. Pipinato, A., Pellegrino, C., Bursi, O.S., Modena, C. High-cycle fatigue behavior of riveted connections for railway metal bridges. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 65 (2009) 2167-2175.
12. Majka, M., Hartnett, M. Dynamic response of bridges to moving trains: A study on effects of random track irregularities and bridge skewness. Computers and Structures. Vol. 87, (2009) 1233-1252.
13. Brencich A., Gambarotta L. Assessment procedure and rehabilitation of riveted railway girders: The Campasso Bridge. Engineering Structures. Vol. 31 (2009) 224-239.
14. Aktan A.E., Catbas N., Turer A., Zhang Z. Structural identification: Analytical aspects. Journal of Infrastructure Engineering ASCE. Vol. 124 No. 7 (1998) 817-29.
15. Automation Creations, Inc. MatWeb. Disponible en Web: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6>
16. Lee, Sang-Ho, Jeong, Yeon-Suk. A system integration framework through development of ISO 10303-based product model for steel bridges. Automation in Construction. Vol. 15 (2006) 212-228.
17. Chagoyén Méndez, César A. et al. Simulación numérica de los apoyos de puente metálico giratorio, Revista Ingeniería Mecánica. Vol. 14, No 3 (2011) 170-180.
18. Software COSMOS/DesignStar 4.0. Structural Reserch & Analysis Corporation. Disponible en Web: <http://www.cosmosm.com/>

Recibido el 8 de Febrero de 2012

En forma revisada el 18 de Marzo de 2013