

Título: “Modelación de puente de ferrocarril que brinda servicios a la Industria Azucarera”

Autor: Dr. Ing. César A. Chagoyen Méndez. * (cachagoyen@uclv.edu.cu)

Ing. David Gonzalez Martinez. *

Ing. Gregorio B. Aragón López. **

Ing. José Leiva Pérez. **

* Departamento de Mecánica Aplicada y Dibujo. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

** Estación Comprobadora de Puentes, Distancia de Vías y Puentes, Placetas, Villa Clara, Cuba.

Resumen

Este artículo 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 que transporta caña, mieles, azúcar y otras mercancías necesarias para el desarrollo de la zafra azucarera. Se presenta un procedimiento para la calibración del modelo tanto a través del análisis de sensibilidad o convergencia como a partir de mediciones extensométricas, de forma tal que mejore la correspondencia entre ambos procedimientos.

Railroad bridge modelling that offers services to the Sugar Industry

Abstract:

Paper introduces the motivation for the benefits of linking FEA and testing in structures. Typical application is found in the field of the static analysis of structures, specifically to a metallic railroad bridge that transports cane, molasses, sugar and other necessary merchandize for the sugar harvest development. A procedure for calibrating of the model through the analysis of sensibility or convergence and from measure with strain gages is presented. The correspondence between both procedures and results improves.

Palabras claves: railroad bridge, Finite Element Analysis, strain gages, simulation, Sugar Industry.

INTRODUCCIÓN

En nuestro 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 y menos difíciles de construir y de mantener. Para dar esta respuesta en tiempo y a un costo competitivo, la industria cuenta con herramientas computarizadas de simulación. El Análisis por Elementos Finitos (FEA) es una técnica potente para simular y mejorar el comportamiento de un producto bajo diferentes condiciones de cargas. [5]

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 ficheros 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 modelaciones.

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.

Debido al incremento y desarrollo de la simulación llegará el día en que se elimine la experimentación, llegándose a simular incluso el ciclo de vida completo del producto, pero aún no ha llegado esa fecha [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.

El reconocimiento de la existencia de la incertidumbre es una buena razón para pensar más aún en la validación de los modelos de simulación. La validación o calibración del modelo lleva dos estudios: el análisis de sensibilidad o convergencia y la comparación de los resultados de la experimentación con los resultados del FEA [3], [4].

Otro aspecto interesante de este trabajo es que la estructura del puente de ferrocarril que se analiza posee alrededor de 100 años de construida, con el consiguiente deterioro, pero al igual que otras industrias, la azucarera utiliza el sistema de ferrocarril para el transporte de caña, mieles, azúcar y otras mercancías necesarias para el desarrollo de la zafra azucarera. 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.

DESARROLLO

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**. 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 [6]. Además los especialistas lo estiman en un estado de deterioro avanzado, presentando alto grado de corrosión en gran parte de sus elementos, lo que compromete la seguridad del mismo.

Geometría:

Algunos datos de la geometría del puente analizado aparecen en las Figuras 1 y 2:

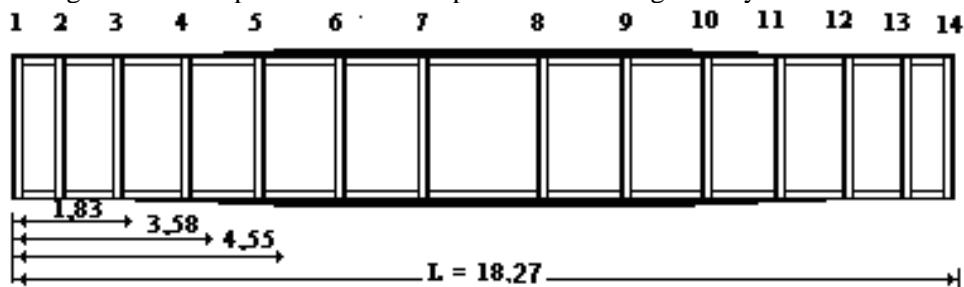


Figura 1 Vista lateral del puente

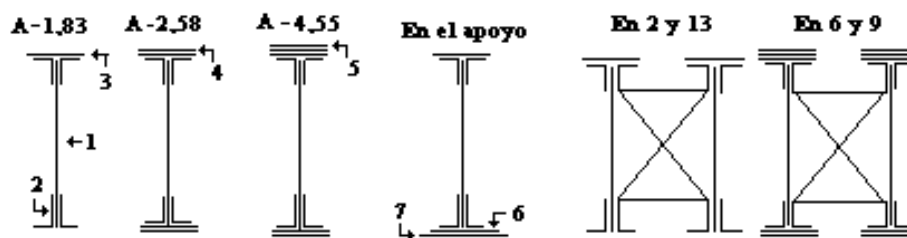


Figura 2 Secciones del puente y arriostramientos verticales

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, mediante un proceso de ingeniería inversa, las características de los materiales del mismo.

Se realizó un diseño de experimentos y a partir de él se confeccionaron las probetas para la realización de los ensayos mecánicos (tracción, dureza, 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 siguientes características:

Característica Mecánica	Plancha	Angular
Tensión Máxima a Tracción (MPa)	352	372
Tensión de Rotura (MPa)	289	334
Tensión de Fluencia (MPa)	240	325
Modulo de Elasticidad (MPa)	$2 \cdot 10^5$	$2,05 \cdot 10^5$
Elongación (%)	31	26
Coficiente de Poisson	0,29	0,29

Dureza Vickers (HV)	147	165
Resiliencia (N-m/cm ²)	36,28	70,81

Lo que significa que el material de la plancha es similar a un acero **AISI 1008** y el angular es similar al acero **AISI 1015**, de los que se fabrican en la actualidad. Este aspecto es importante sobre todo si se decide acometer la reparación del puente.

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 3) el desplazamiento es cero, mientras que en el eje Z se permitió que se desplazara 0,3 mm, que es el desplazamiento que permite la ranura que existe entre la plancha de apoyo y el tornillo que se encuentra empotrado en el estribo, teniendo en cuenta que en estos elementos está presente un alto grado de oxidación por el tiempo que llevan trabajando y prácticamente es inapreciable el desplazamiento que permiten. Los desplazamientos angulares también fueron limitados a cero al no existir juego alguno entre el tornillo y la ranura que permita el giro de la estructura.

Cargas:

Para realizar la prueba estática y con ella las mediciones mediante strain gages 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 1 200 334 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 prueba estática este peso fue considerado como una carga uniformemente distribuida sobre el puente. Es considerado también en los cálculos 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 arandelas. El peso de este conjunto da un valor aproximado de 6.86 N/m, lo que aporta una carga de 125 417,2 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 3.

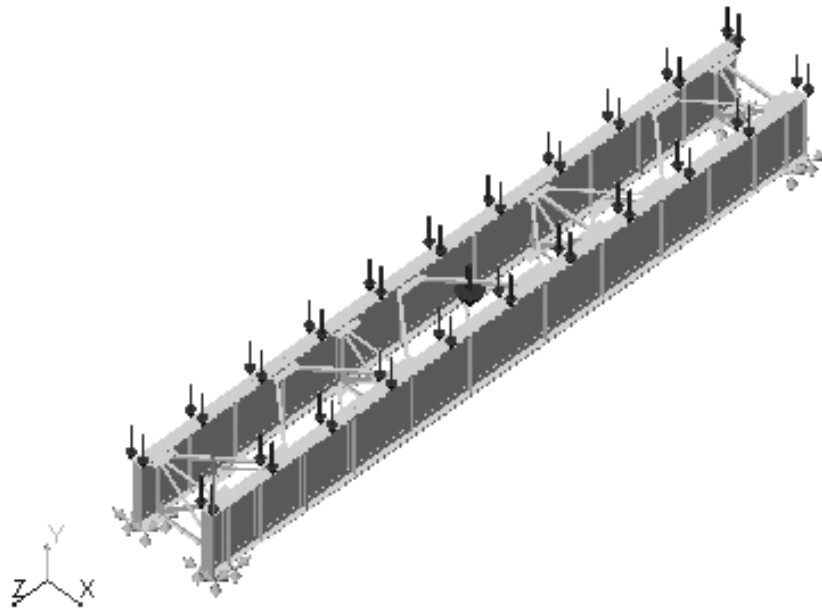


Figura 3 Modelo 3D del puente con las cargas y restricciones

Validación o Calibración del Modelo

Análisis de Sensibilidad o Convergencia:

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 3 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 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 1, 2 y 3 con los valores obtenidos de las tres variables, en los dos lugares, con diferente densidad de malla.

Tabla 1: Valores de Tensión

Modelo 3D	Tamaño del Elemento (No. 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	7,4770	0,36	2,04
Malla Media	126 (918)	18,319	7,6334	0,04	1,93
Malla Gruesa	189 (589)	18,311	7,7837		

Tabla 2: Valores de Desplazamiento

Modelo 3D	Tamaño del Elemento (No. 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	3,4230		

Tabla 3: Valores de Deformación

Modelo 3D	Tamaño del Elemento (No. 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 todas las 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. A modo de ejemplo, estos resultados se encuentran ploteados en las curvas de la Figura 5 para la Tensión. A continuación se muestran imágenes de las tres densidades de malla utilizadas (Figura 4).

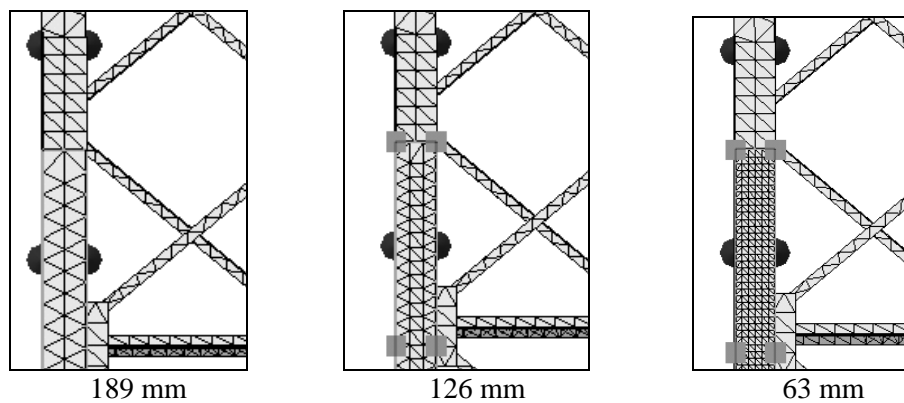


Figura 4 Tamaños de malla realizados para el análisis de sensibilidad

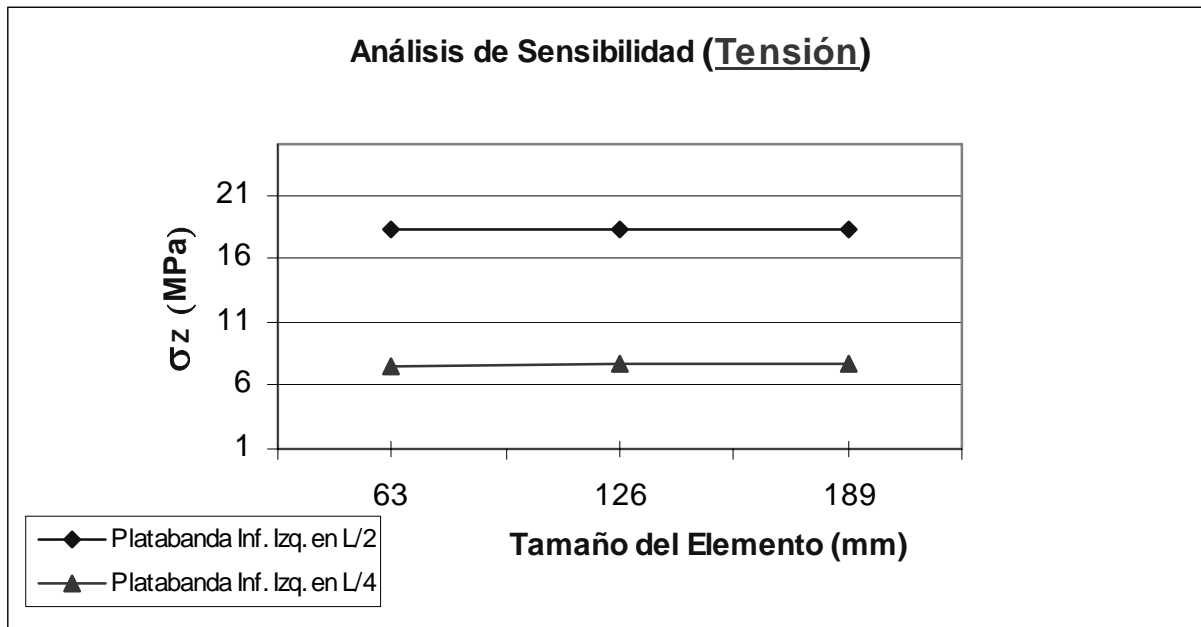


Figura 5 Curvas del Análisis de Sensibilidad de la variable Tensión

Comparación de los resultados de los Ensayos con los resultados del FEA:

Para la medición de desplazamientos, tensiones y deformaciones fueron colocadas convenientemente en el puente galgas extensométricas y sensores en determinados lugares del puente. Para ello fue concebido un proyecto como el que se muestra en la Figura 6.

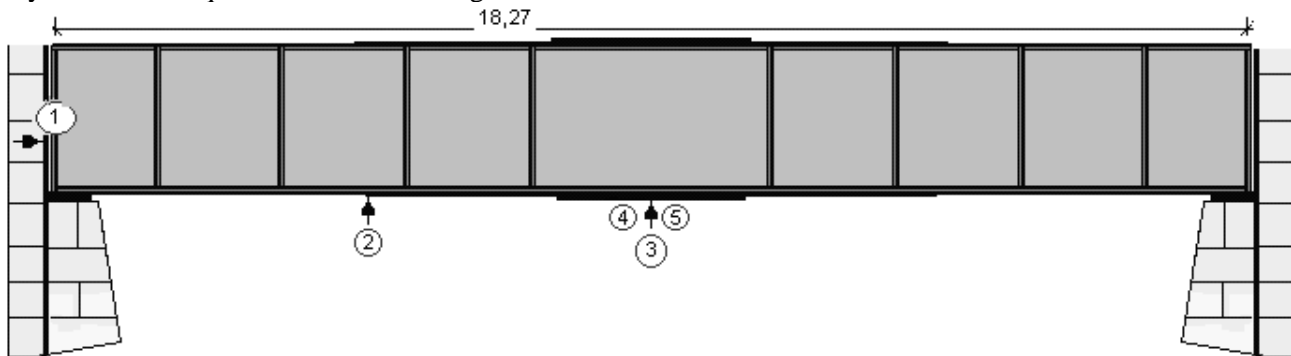


Figura 6 Proyecto de colocación de sensores y galgas extensométricas

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 ¼ de la longitud de la viga
3	Sensor de desplazamiento vertical	PA-5	En la mitad de la longitud de la viga
4	Galga Extensométrica, en dirección longitudinal	Hbm,120 Ω, K = 2.07	En la mitad de la longitud de la viga
5	Galga Extensométrica, en dirección transversal	Hbm,120 Ω, K = 2.07	En la mitad de la longitud de la viga

Las galgas extensométricas se colocaron en parejas en un mismo sentido, conectadas a medio puente de inducción [2]. La medición fue realizada utilizando un equipo de adquisición de datos del tipo HBM MGC PLUS, de fabricación alemana.

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

En las Figuras 7, 8 y 9 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.

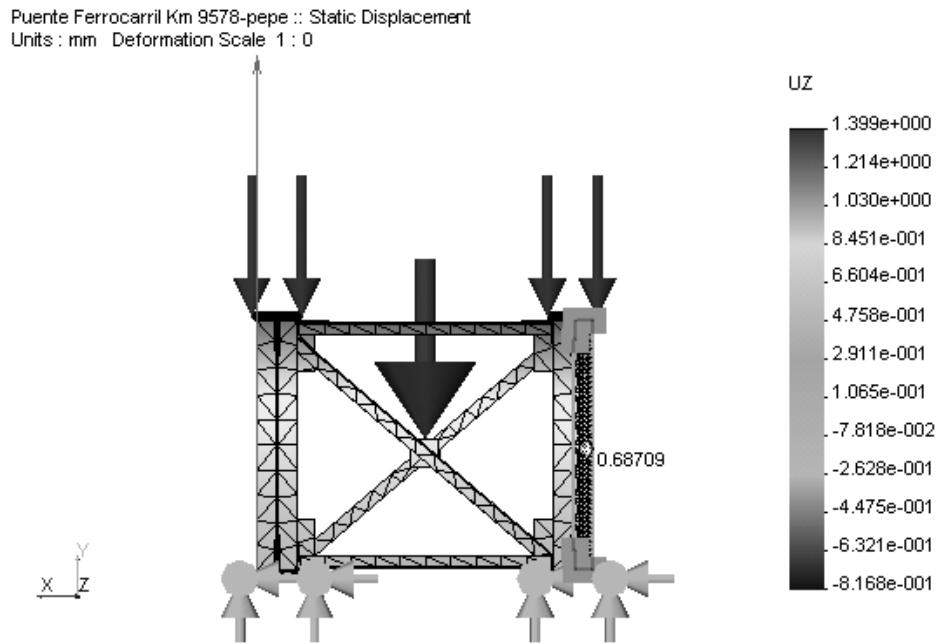


Figura 7 Imagen del modelo de EF del que se obtuvo el desplazamiento horizontal (U_z) en el punto donde se colocó el Sensor WA-10 mm (1). Observe el refinamiento de la malla en esa zona.

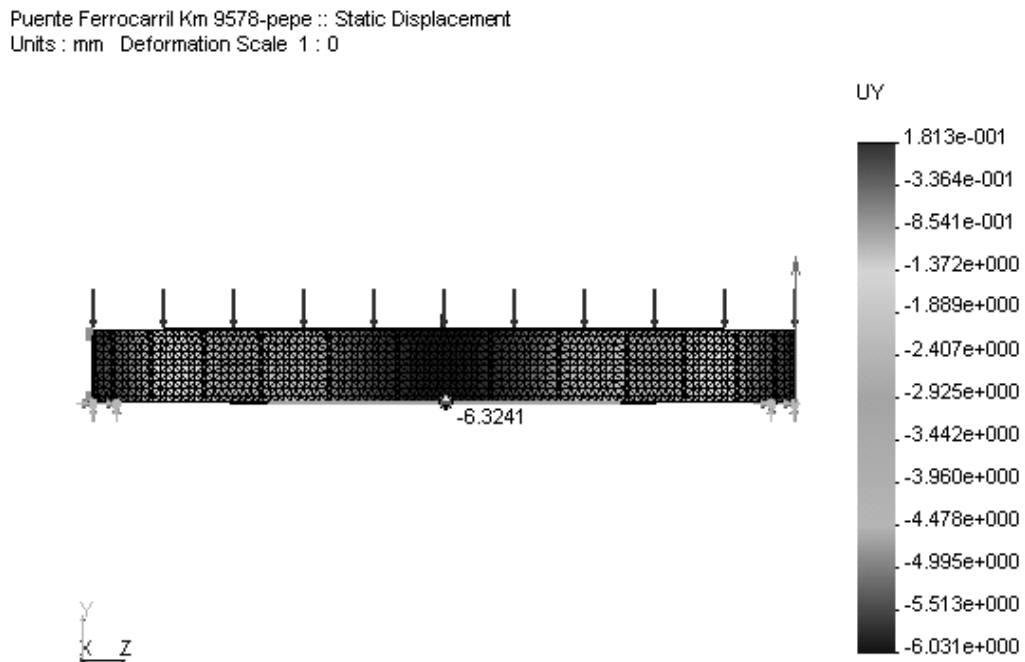


Figura 8 Imagen del modelo de EF del que se obtuvo el desplazamiento vertical (U_y) en el punto donde se colocó el sensor PA-5 (L/2) Viga Izquierda (2)

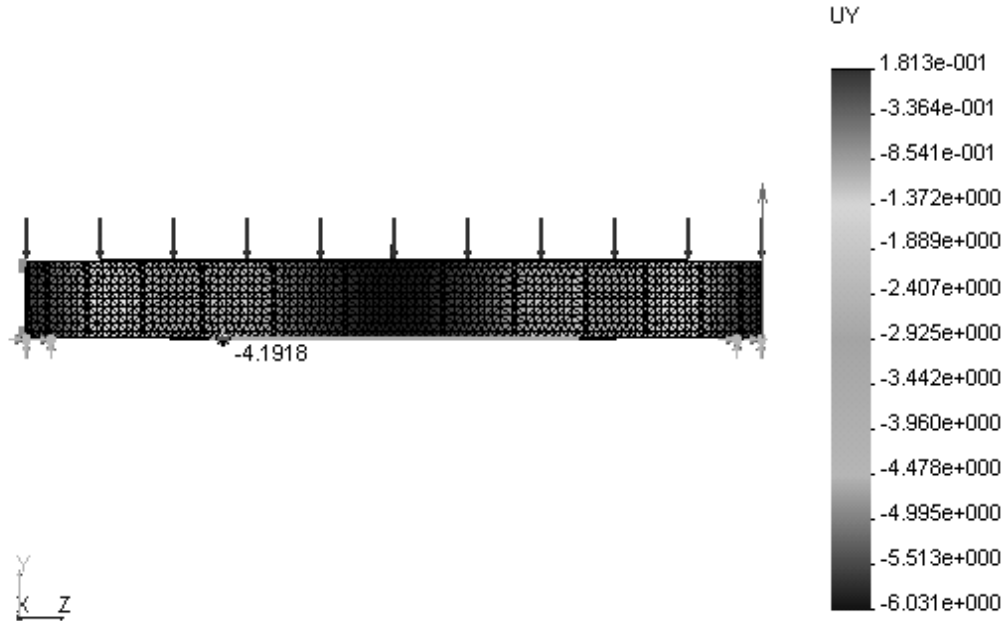


Figura 9 Imagen del modelo de EF del que se obtuvo el desplazamiento vertical (U_Y) en el punto donde se colocó el sensor PA-5 (L/4) Viga Izquierda (3)

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

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

Las deformaciones fueron obtenidas como promedio de 20 mediciones.

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

En las Figuras 10 y 11 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 los sensores en el puente.

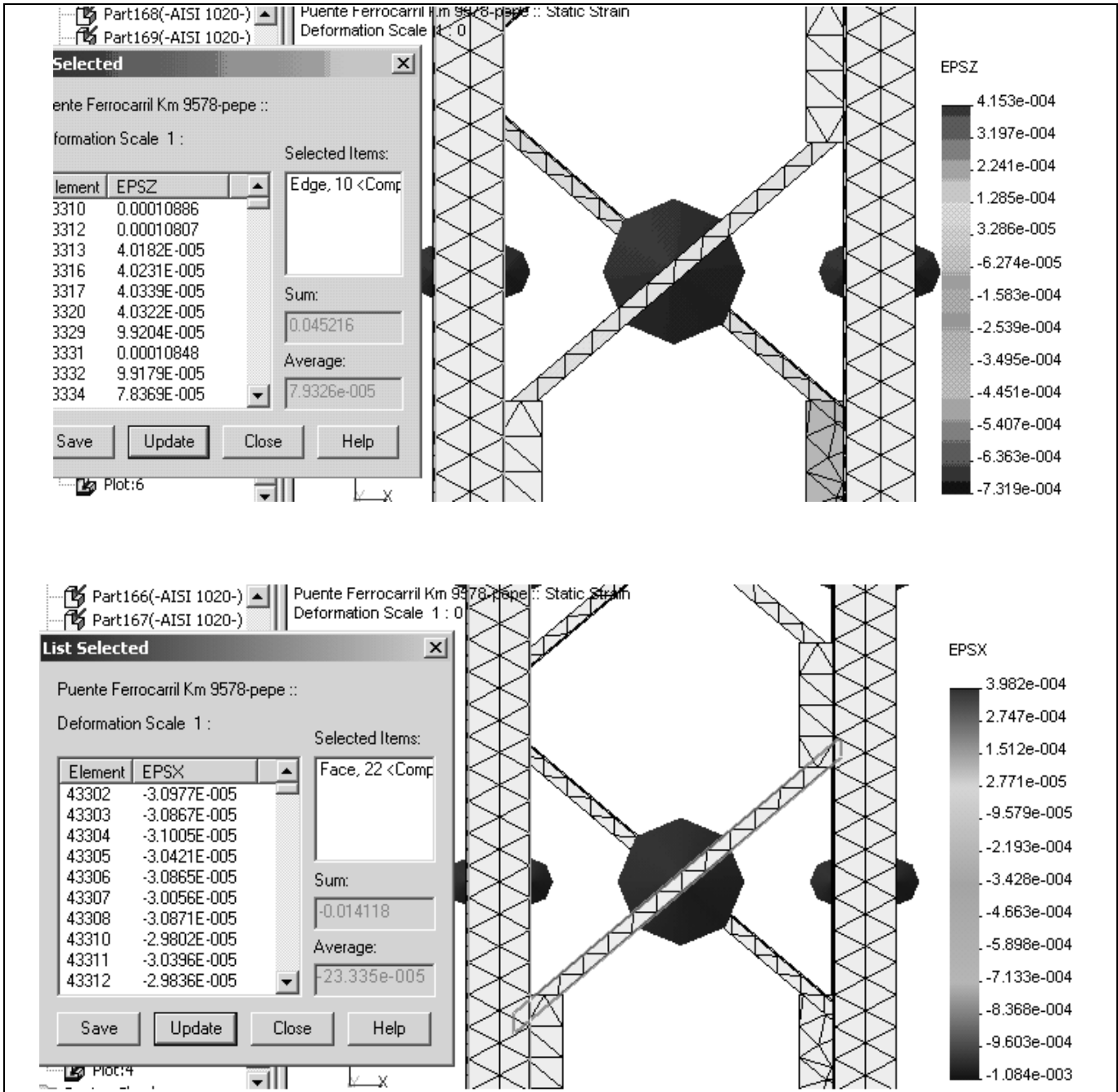


Figura 10 Imágenes del modelo de EF del que se obtuvo la deformación ϵ_z y ϵ_x (EPSZ y EPSX) en los puntos y direcciones en que se colocaron las galgas extensiométricas (L/2) Viga Izquierda (4 y 5)

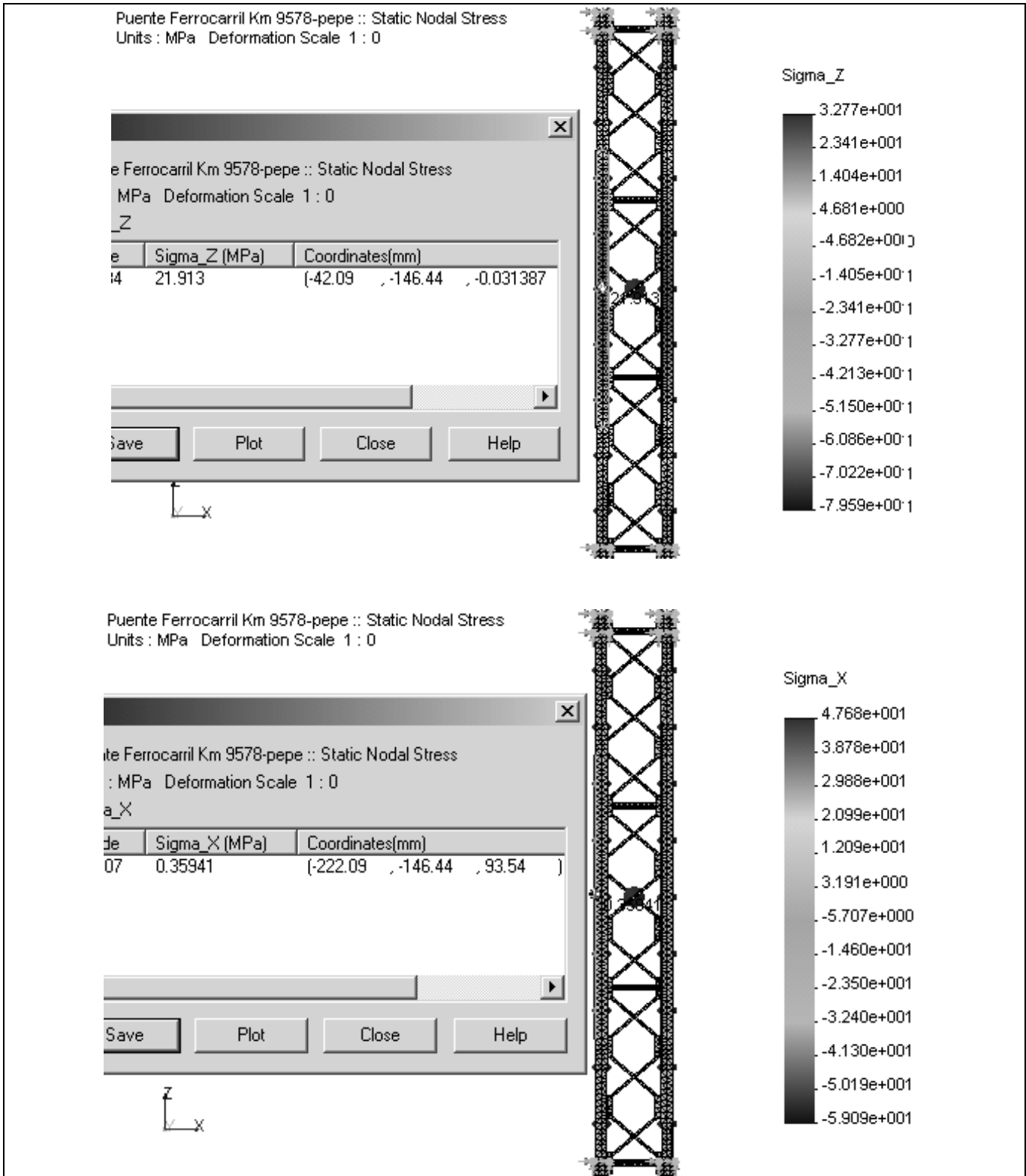


Figura 11 Imágenes del modelo de EF del que se obtuvo la tensión σ_z y σ_x (Sigma_Z y Sigma_X) en el punto donde se colocó la galga extensométrica (L/2) Viga Izquierda (4).

CONCLUSIONES

- 1.- La vinculación del FEA con los Ensayos es un proceso complejo que toca todos los aspectos de la ingeniería del diseño y del análisis, pero la implementación de este proceso no es una opción, es una obligación.
- 2.- El análisis de sensibilidad o convergencia ofreció una precisión adecuada ya que la diferencia entre los valores de las variables analizadas entre dos análisis consecutivos fue menor de 2,1 %.
- 3.- 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.
- 4.- La calibración del modelo posibilita establecer las condiciones de utilización del puente con niveles de seguridad apropiados.
- 5.- Este trabajo puede constituir una guía para otras investigaciones ya que contribuye al uso correcto de las técnicas de ensayo y del FEA.

FUENTES DE INFORMACIÓN CONSULTADAS

1. Allemang, R. J., "The modal assurance criterion – twenty years of use and abuse", Journal of Sound and Vibration, Agosto, 2003.
2. Chagoyen Méndez, César A., "Introducción ala medición mediante Strain Gages", Monografía, UCLV, Santa Clara, Cuba, 2005.
3. Dascotte, E., "Linking FEA with Test", Journal of Sound and Vibration, Abril, 2004.
4. FEMtools 3.0 Software for Correction. Validation and Updating of Simulation Model. Dynamics Design Solution N.V. www.femtools.com/, visitada el 20 de Febrero del 2006.
5. <http://www.cosmosm.com/>, visitada el 15 de Abril del 2006.
6. <http://www.dtop.gov.pr/act/puentes/Apendice.htm>, visitada el 18 de Junio del 2006.