

Ingeniería. Revista de la Universidad de

Costa Rica

ISSN: 1409-2441

marcela.quiros@ucr.ac.cr

Universidad de Costa Rica

Costa Rica

Rodríguez Calderón, Wilson; Muñoz Díaz, Edgar Eduardo; Núñez Moreno, Federico
Alejandro

OPTIMIZACIÓN APLICADA A LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE
ELEMENTOS FINITOS DE PUENTES

Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica, vol. 17, núm. 1, enero-julio, 2007, pp.
43-59

Universidad de Costa Rica
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44170519003>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

OPTIMIZACIÓN APLICADA A LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS DE PUENTES

Wilson Rodríguez Calderón
Edgar Muñoz Díaz
Federico Núñez Moreno

Resumen

Este artículo presenta una propuesta para aplicar técnicas de optimización a la calibración de modelos de elementos finitos en análisis estructural. Concretamente, estas técnicas son aplicadas a un modelo computacional del puente Puerto Salgar, localizado en Colombia, sobre la carretera Honda - Río Ermitaño, en la abscisa correspondiente al cruce sobre el río Magdalena. Para realizar el proceso de calibración se ejecutaron fases de campo y de oficina entre las que están: instrumentación del puente para monitorear las cargas en elementos claves, levantamiento geométrico y de secciones del puente, pesaje de vehículos, medición de deflexiones, toma de registros fotográficos y fílmicos, monitoreo de variables durante las pruebas de carga por espacio de una hora aproximadamente, obtención de muestras de acero y pruebas mecánicas y químicas a estas, procesado de la información obtenida en campo, implementación de modelos numéricos del puente en SAP-2000®¹ y ANSYS®², pruebas de calibración en SAP-2000® y por último, desarrollo de un esquema de optimización en APDL (Lenguaje paramétrico para realizar macros personalizados) de ANSYS®, con el que se abordó la calibración automatizada del modelo de elementos finitos, implementado en este mismo paquete computacional. Dadas las restricciones propias de las publicaciones científicas, solo se hace énfasis en los temas esenciales de la calibración del modelo del puente y se deja de lado algunos aspectos técnicos de la instrumentación y el análisis de confiabilidad estructural, los cuales son motivo para otras publicaciones al respecto del proyecto. Finalmente, debe destacarse que este artículo surge del proyecto “evaluación por confiabilidad estructural de puentes en acero apoyada en monitoreo e instrumentación” y de proyectos preliminares del Grupo de estructuras - PUJ.

Palabras clave: optimización, elementos finitos, calibración de modelos numéricos.

Abstract

This article presents a methodology to apply optimization techniques to calibration of structural finite element models. These techniques are particularly applied to the computer model of the Puerto Salgar Bridge located over the Magdalena River, part of the roadway Honda - Río Ermitaño. In order to perform this calibration process “in situ” labours were done and later post process analysis performed among which are: Bridge instrumentation of principal elements in order to obtain loads information and real time data, geometrical detailing of member sections, vehicle weighting, deflection control, photographic records, variables monitoring for an space of one hour approximately, steel recovering and mechanical and chemical testing, post process analysis of the recorded data, numerical models implementation on SAP-2000® and ANSYS® environments, SAP-2000® calibration tests and finally the implementation of an inner optimization layout on APDL® ANSYS® parametric language in order to develop personalized macros, with which automatic calibration of the finite element model was performed. Given the inner restrictions of scientific publications, this document will only emphasise on main topics of the calibration process of the bridge model and some technical issues of instrumentation and the structural reliability are left, which are issues for other publications. Finally this project comes from the initial project “Structural reliability evaluation of steel bridges supported on monitoring and instrumentation” and some other projects performed by the STRUCTURES group of the - PUJ.

Key words: optimization, finite elements, numerical model calibration.

Recibido: 13 de febrero del 2006 • **Aceptado:** 05 de octubre del 2006

1. INTRODUCCIÓN

La calibración de modelos numéricos de estructuras es muy importante, si se quiere

obtener un orden aceptable de confiabilidad en los resultados arrojados por un modelo computacional. De esta manera, todo el proceso que involucra la calibración está justificado en

el hecho de que las estructuras están sometidas a múltiples tipos y escenarios de carga, sobre los que se debe tener seguridad en el grado de correspondencia, entre el comportamiento real de la estructura y el simulado. Para alcanzar este grado de correspondencia, se hacen pruebas de carga controlada sobre la estructura donde se monitorean, como mínimo, las variables fundamentales del problema como la magnitud y posición de las cargas, deflexiones y/o fuerzas internas, longitudes y secciones de elementos y las características mecánicas de los materiales de las estructuras medidas en laboratorio.

El objetivo de la calibración, en este caso, es optimizar la eficiencia, del modelo de elementos finitos en cuanto a la predicción de deflexiones, e indirectamente, obtener resultados lo más cercanamente posibles a la realidad, aunque intrínsecamente todo modelo posee hipótesis y aproximaciones que son ineludibles y que marcan una restricción entre la coincidencia de lo real y lo modelado.

Lograda la eficiencia del modelo numérico, se puede emplear este para ejecutar otros casos de carga con la tranquilidad de tener un orden de error lo más pequeño posible. El modelo calibrado del Puente Salgar se utilizó para la evaluación por confiabilidad estructural, apoyado en monitoreo e instrumentación.

El valor agregado de la metodología empleada para la calibración radica en la contribución hecha

a la automatización del proceso matemático que se requiere para llegar a resultados confiables de los parámetros que condicionan el comportamiento estructural, por tanto, es necesario ajustar estos hasta obtener resultados satisfactorios que muestren que el modelo numérico se aproxima a la realidad. El esquema empleado es propio y para su implementación se desarrolló un macro con el lenguaje APDL de ANSYS; en este mismo sentido pueden existir otros algoritmos y otros caminos que den resultados similares o mejores, sin embargo, en el caso del modelo del Puente Salgar quedó demostrada la funcionalidad de la propuesta de calibración realizada en ANSYS.

Se espera, en proyectos futuros, instrumentar y calibrar otros puentes importantes de la red vial colombiana.

El desarrollo del proyecto en sus fases de campo y de oficina se resumen en la Figura 1. Esta figura sirve como guía sobre los tópicos abarcados a lo largo del artículo.

2. METODOLOGÍA

Para la calibración del modelo estructural del Puente Salgar se emplearon los datos de deflexiones tomadas en campo en nueve puntos clave del cordón inferior del puente. Estas deflexiones fueron tomadas bajo cargas perfectamente conocidas en su magnitud y posición dentro de una de las naves del puente. Además, se hicieron

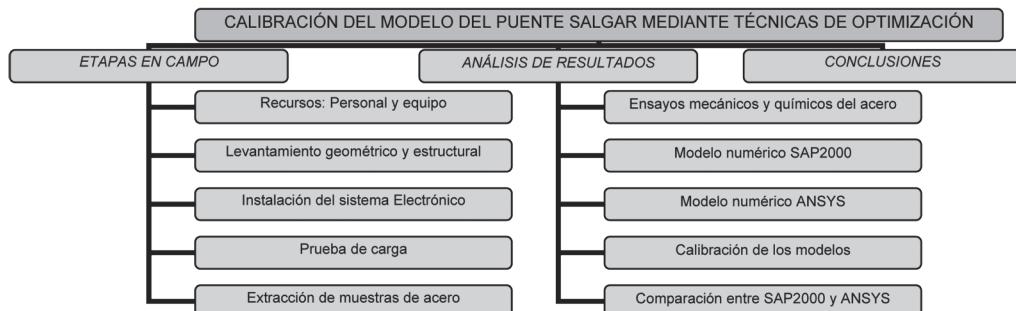


Figura 1. Diagrama de flujo del desarrollo del proyecto.

Fuente: (Los autores).

pruebas mecánicas (Módulos Elásticos) al acero constitutivo del puente, como característica básica del material predominante de la estructura.

Por otra parte, cuando se tiene un problema de calibración, usualmente se emplean pruebas de modelación basadas en la intuición sobre los rangos de las variables de diseño o en valores preliminares obtenidos de pruebas de campo o de laboratorio que estiman, de alguna manera, el orden de magnitud de las variables a calibrar; sin embargo, la mejor opción o por lo menos, la más eficiente y precisa, es emplear técnicas de optimización para calibrar la estructura bajo un sistema n-pla de variables de estado (deflexiones modeladas) que verifican el comportamiento del puente. Para tal caso, el sistema n-pla consistía en las deflexiones de los nueve puntos clave de verificación de deflexión elegidos en campo.

Con base en lo anterior, se realizaron dos modelos estructurales:

- El primero en el programa de análisis estructural SAP-2000 (Modelos de prueba-error, ya que SAP-2000 no cuenta con motores de optimización).
- El segundo en el programa ANSYS empleando algoritmos de optimización para la correspondiente calibración.

2.1 Modelo estructural en SAP-2000

Se complementó y mejoró el modelo estructural desarrollado en SAP-2000 en el año 2002 en investigaciones preliminares (Daza, R; Salazar, F & Muño, E, 2002). El modelo estructural desarrollado en SAP-2000 tiene las siguientes características: doscientos veinte nudos, dos mil setecientos cincuenta y cuatro elementos finitos discretos (“frame”), con los cuales se modelaron los miembros de las armaduras y de las vigas que hacen parte del tablero. Las vigas longitudinales en el tablero se apoyan en las transversales y tienen unión solamente a corte. Se tuvo en cuenta la rigidez que aporta cada uno de los elementos del puente, la cual depende de la tipología de la estructura en

estudio. Además, se establecieron adecuadamente las condiciones de frontera, tales como apoyos, cargas externas, grados de libertad, etc.

Adicionalmente, el modelo consta de seis mil ochocientos cuarenta elementos finitos continuos (“shell”), que modelan la losa en concreto reforzada apoyado en vigas longitudinales y transversales de acero. Apoyos fijos y móviles. En la Figura 2 se presenta el modelo estructural desarrollado y se indican los elementos seleccionados para el estudio.

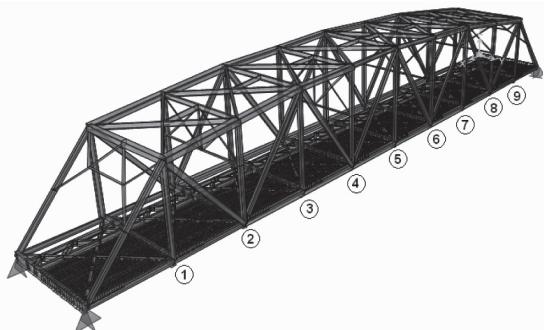


Figura 2. Modelo en SAP-2000 del puente Puerto Salgar.
Fuente: (Los autores).

La calibración del modelo del puente se desarrolló partiendo del conocimiento de las propiedades de los materiales (Apartado 1.1.1), la geometría del puente (Apartado 1.1.2) y las cargas aplicadas (Apartado 1.1.3).

2.1.1 Ensayos mecánicos y químicos del acero

Las platinas que fueron extraídas de los elementos del puente fueron enviadas al Laboratorio de la Siderúrgica Acerías Paz del Río, donde se realizaron los ensayos a tensión y de metalografía. Los ensayos se realizaron en la máquina universal especialmente acondicionada para ensayos a tensión, de este tipo de platinas. El ingeniero, Federico Núñez del grupo de investigación visitó el laboratorio y presenció algunos de los ensayos mecánicos.

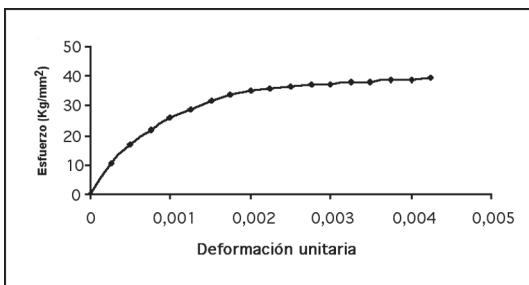


Figura 3. Diagrama esfuerzo deformación para la probeta 1, módulo de elasticidad 4'018.089 Kgf/ cm².

Fuente: (Los autores).

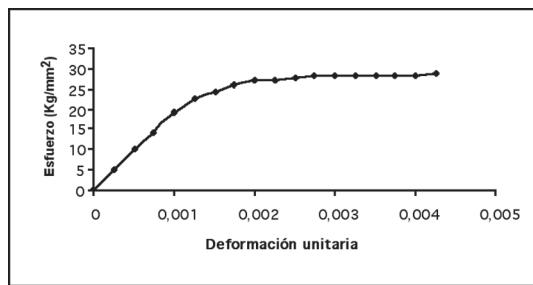


Figura 7. Diagrama esfuerzo deformación para la probeta 5, módulo de elasticidad 2'101.873 Kgf/cm².

Fuente: (Los autores).

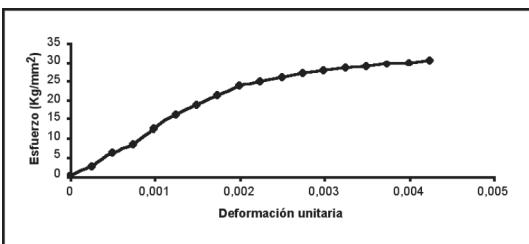


Figura 4. Diagrama esfuerzo deformación para la probeta 2, módulo de elasticidad 1'213.013 Kgf/ cm².

Fuente: (Los autores).

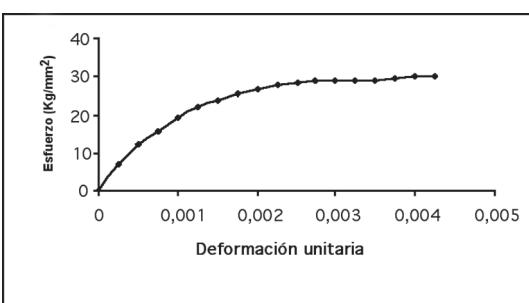


Figura 5. Diagrama esfuerzo deformación para la probeta 3, módulo de elasticidad 2'428.764 Kgf/cm².

Fuente: (Los autores).

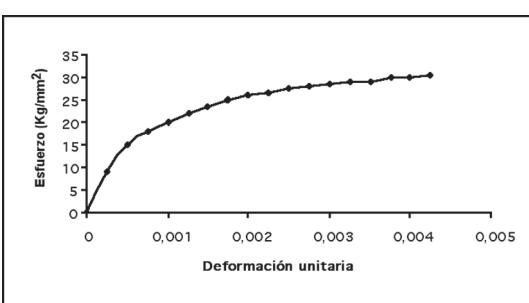


Figura 6. Diagrama esfuerzo deformación para la probeta 4, módulo de elasticidad 2'937.626 Kgf/ cm².

Fuente: (Los autores).

En las Figuras 3, 4, 5, 6 y 7 se sintetiza la información necesaria para la calibración. Estas figuras presentan las curvas de esfuerzo deformación obtenidas en la máquina universal y los respectivos módulos de elasticidad, de cada una de ellas.

2.1.2 Levantamiento geométrico y estructural.

A partir de la información encontrada, el puente Puerto Salgar fue construido hace aproximadamente cincuenta años, cruza el río Magdalena y está conformado por cuatro naves idénticas de armaduras de acero de paso inferior simplemente apoyadas. Cada nave tiene una luz de 77,1 m y un ancho total de 7,90 m. Es un puente vehicular y ferroviario, con estructura mixta (acero y concreto) como se observa en las Figuras 8 y 9. Además, posee una rampa de estructura mixta (vigas en acero y losa en concreto) de acceso curva. El estudio de campo se realizó solamente para la superestructura de una de las naves típicas, que corresponde a la primera, a partir de Honda – Puerto Boyacá.

Basado en los planos suministrados por la Interventoría de la Obra de Rehabilitación efectuada en el 2001, se realizó inicialmente la verificación de la geometría general longitudinal y transversal de la nave seleccionada del puente. Es importante mencionar que se identificaron elementos con refuerzo adicional, realizado en el proceso de rehabilitación del puente por parte del INVIA en 1999. Se hizo el levantamiento geométrico detallado de las secciones

transversales de todos los elementos del puente, empleando un equipo medidor de espesores ultrasónico, entre los que se destacan:

- Cordón superior de armadura aguas abajo
- Cordón inferior de armadura aguas abajo
- Cordón superior de armadura aguas arriba

- Cordón inferior de armadura aguas arriba
- Diagonales de armadura aguas arriba y abajo
- Verticales de armadura aguas arriba y abajo
- Vigas transversales en tablero
- Vigas longitudinales en tablero

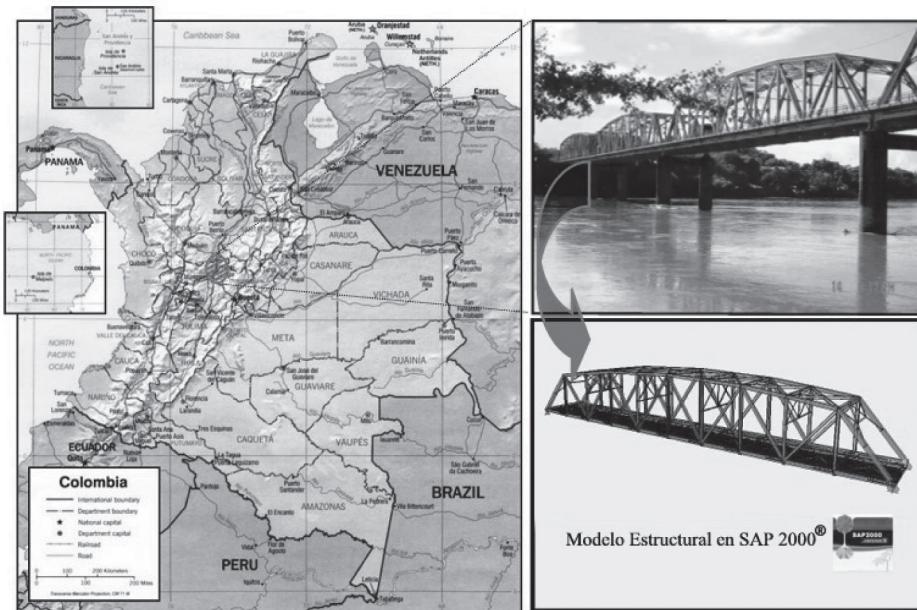


Figura 8. Localización geográfica y fotografía en perfil del Puente Salgar.
Fuente: (Los autores).



Figura 9. A la izquierda, nave elegida para ser instrumentada, de las cuatro simétricas que constituyen el puente en su extensión total.
Fuente: (Los autores).



Figura 10. Sección transversal del elemento AAR-9-1.
Fuente: (Los autores).

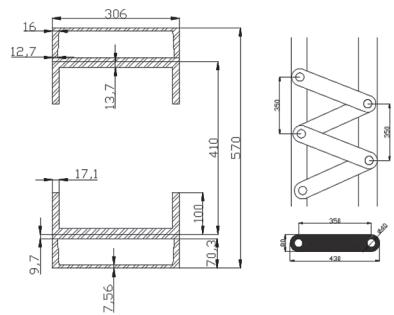


Figura 11. Sección transversal con dimensiones del elemento AAR-9-1.

Fuente: (Los autores).

En las Figuras 10 y 11 se presentan una de las secciones transversales evaluadas. Se elaboró un documento anexo donde se mostraban los siguientes aspectos del levantamiento:

- Perfil de cada una de las armaduras, con secciones y dimensiones.
 - Sección transversal de cada elemento y sus correspondientes propiedades.

Es bueno aclarar que el levantamiento de las secciones se llevó a cabo empleando el equipo de medidor de espesores (ultrasonido) con el procedimiento recomendado por el fabricante para tener la mayor confiabilidad posible. Este consistió este en la limpieza de parte de la superficie con lija, aplicación del líquido recomendado del equipo de medición y la lectura directamente (Figura 12).

2.1.3 Hipótesis de carga

El objeto de la prueba de Carga es la calibración del modelo estructural de la nave del puente Salgar, conociendo tres condiciones de frontera:

- La posición e intensidad de cargas
 - La deformación vertical que generan las diferentes posiciones mediante las mediciones de topografía.
 - La medición de los deltas de voltaje con Strain Gages.

Para tal fin se diseñaron y realizaron en campo tres hipótesis para la prueba de carga. Primero, el puente sin cargas vehiculares (Figura 13), con el objeto de evaluar el nivel cero, mediante los equipos de topografía.

Posteriormente se realizaron tres hipótesis de carga con las volquetas previamente pesadas, las cuales se muestran a continuación:

Primera hipótesis: Cuatro volquetas concentradas en el centro de la luz, simétricamente localizadas (Figuras 14 y 15). Los ejes traseros de las volquetas quedaron tan cercanos como la misma imposibilidad de tocarse las volquetas así lo demandó.



Figura 12. Medición de sección vertical del puente.
Fuente: (Los autores).



Figura 13. Puente sin carga vehicular.
Fuente: (Los autores).



Figura 14. Primera condición de carga, parte superior
Fuente: (Los autores).



Figura 16. Segunda hipótesis de carga, parte superior
Fuente: (Los autores).



Figura 18. Tercera hipótesis, parte superior.
Fuente: (Los autores).

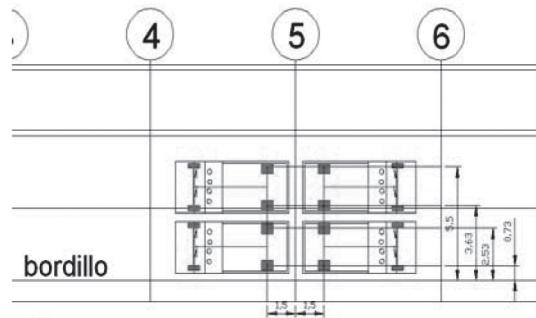


Figura 15. Localización en planta de las volquetas, en la
primera hipótesis, localización en el tablero del puente.
Fuente: (Los autores).

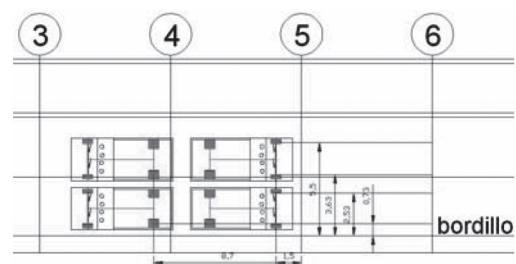


Figura 17. Localización en planta de las volquetas, en la
segunda hipótesis, localización en el tablero del puente.
Fuente: (Los autores).

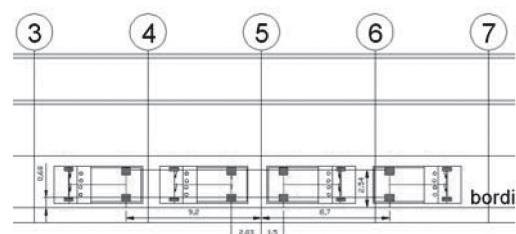


Figura 19. Localización en planta de las volquetas, en la
tercera hipótesis, localización en el tablero del puente.
Fuente: (Los autores).

Segunda hipótesis: Cuatro volquetas concentradas en el centro de la luz, corridas hacia el eje 5 del tablero del puente (Figuras 16 y 17).

Tercera hipótesis: Las cuatro volquetas en línea, para concentrar la carga en la armadura aguas arriba (Figuras 19 y 18).

2.1.4 Calibración en SAP-2000

El modelo se cargó con las fuerzas que son el equivalente estático de las volquetas que se usaron en la prueba de carga y en las posiciones que se muestran en las Figuras 15, 17 y 19. Se realizó una comparación entre las deformaciones verticales obtenidas en campo (Cuadro 1) y las del modelo estructural (Cuadro 2).

En el Cuadro 3 se muestra en términos de porcentaje, las diferencias entre lo medido en campo y lo modelado en SAP-2000, en cada uno de los puntos y para cada hipótesis de carga. Lo anterior es favorable, encontrando un promedio de calibración del 90,3 %, lo que representan un 9,7 % de diferencia entre lo real y lo analítico. Es bueno aclarar que para las pruebas de carga 2 y 3, y para los puntos de control 7 y 8, no se detectó diferencia de cotas en los niveles inicial y final. Esto pudo deberse a un error en el nivel de topografía, pero como se puede observar en la totalidad del ejercicio, las diferencias entre modelado y medido son pequeñas en los tres casos de carga.

2.2 Modelo estructural en ANSYS

Teniendo como base investigaciones preliminares en optimización aplicada a la calibración de modelos numéricos (Rodríguez, W. & Pallares, M, 2004) y con la participación del Ing. Wilson Rodríguez en los trabajos de campo y en la implementación del Modelo Numérico, se realizó la calibración del modelo empleando TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN en el programa de elementos finitos ANSYS.

Para el planteamiento del esquema de optimización es necesario contar, en primera instancia, con un modelo de elementos finitos compuestos por elementos BEAM y SHELL, una vez que se tiene esto, se busca determinar las variables de diseño (dimensiones y/o parámetros del modelo) cumpliendo criterios de optimización comúnmente llamados Función Objetivo (diferencia entre lo medido y lo calculado por ejemplo) y satisfaciendo ciertas restricciones o condiciones denominadas Variables de Estado (desplazamientos y/o tensiones calculadas). Inicialmente se aborda brevemente la teoría general de optimización y se plantea un problema de minimización de la función objetivo.

La optimización en problemas de análisis de estructuras suele ser compleja y de alto costo computacional, sin embargo, su uso se hace necesario cuando se pretende eliminar, en la medida de lo posible, algunas incertidumbres de la modelación. Para la solución computacional se parametriza el modelo empleando el lenguaje APDL del programa de elementos finitos ANSYS y se emplean los módulos de preproceso, solución, post-proceso y optimización. El diseño de optimización es una técnica que pretende determinar el mejor diseño o diseño óptimo. Por "diseño óptimo" se entiende aquel que reúne toda una serie de requisitos específicos, pero con un gasto o costo mínimo de ciertos factores tales como peso, área de la superficie, volumen, tensión, costo, etc. En otras palabras, el diseño óptimo es normalmente aquel que logra "hacer lo más eficaz posible".

Virtualmente se puede perfeccionar cualquier aspecto del diseño como: dimensiones (tal como espesor), forma (tal como radio del chaflanado), colocación de apoyos, costo de fabricación, frecuencia natural, propiedad del material, y así sucesivamente. En nuestro caso el objetivo es optimizar la eficiencia del modelo de elementos finitos en cuanto a la predicción de deflexiones e indirectamente obtener resultados lo más cercanamente posibles a la realidad, aunque intrínsecamente todo modelo posee hipótesis y aproximaciones que son ineludibles y que marcan una restricción entre la coincidencia de lo real y lo modelado.

Cuadro 1. Deformaciones verticales de acuerdo con topografía.

Punto	Nivelación topográfica				Deltas de nivel (mm)				
	Vacío	P1	P2	P3	Punto	Vacío	P1	P2	P3
1	98,55	98,55	98,55	98,55	1	98,55	3	5	3
2	98,55	98,55	98,55	98,55	2	98,55	3	3	3
3	98,55	98,54	98,54	98,54	3	98,55	5	6	5
4	98,55	98,54	98,54	98,54	4	98,55	11	10	10
5	98,55	98,54	98,54	98,54	5	98,55	10	10	10
6	98,55	98,54	98,54	98,54	6	98,55	12	10	10
7	98,54	98,54	98,54	98,54	7	98,54	2		
8	98,54	98,54	98,54	98,54	8	98,54	2		
9	98,54	98,53	98,53	98,53	9	98,54	3		8

Fuente: (Los autores).

Cuadro 2. Deformaciones analíticas del modelo de SAP-2000.Todo en mm. $E = 2\ 403\ 380$ Kgf/cm²

PC1	PC2	PC3
2,00	2,17	2,37
3,72	4,04	4,39
5,46	5,97	6,62
7,86	10,26	8,85
10,43	9,91	10,18
7,88	7,22	8,81
5,52	5,09	6,58
3,75	3,45	4,37
2,00	1,84	2,34

Fuente: (Los autores).

Cuadro 3. Promedios de calibración por punto de control y por prueba de carga. También promedio general de calibración total del modelo.

Porcentaje de calibración (%)			Promedio calibración general (%)
PC1	PC2	PC3	
66	43	79	
124	135	146	
109	99	132	
71	103	88	
104	99	102	
66	72	88	
188			
67	61	29	
Promedio	88,36	87,53	90,30
			90,30

Fuente: (Los autores).

El programa ANSYS ofrece dos métodos de optimización adaptables a una gama amplia de problemas. El método de la aproximación del subproblema es un método de orden cero avanzado que se puede aplicar eficazmente a la mayoría de problemas de ingeniería. El método de primer orden se basa en la sensibilidad del diseño y está recomendado para problemas que requieren alta exactitud, como es el caso de la calibración de un modelo, por tanto se utilizó este método para la calibración a costa de un mayor costo computacional. Para los dos métodos, el sub-problema y el de primer orden, el programa ejecuta una serie de ciclos de análisis – evaluación - modificación. Es decir, se desarrolla un análisis de diseño inicial, se evalúan los resultados contra criterios específicos del diseño, y se modifica el diseño si es necesario. Este proceso se repite hasta que todos los criterios específicos se satisfagan.

Antes de empezar a describir y analizar los resultados, es importante tener en cuenta algunas definiciones básicas que introducen el lenguaje propio del diseño de optimización. La terminología básica empleada en el diseño de optimización involucra términos como: variables de diseño, variables de estado, función objetivo, diseño factible y diseño no factible, archivo de análisis, iteraciones, ciclos, conjunto de diseño, etc. El problema planteado sirve como un ejemplo representativo de optimización estructural.

- Variables de Diseño (DVs) son cantidades independientes que son iteradas en orden para alcanzar el diseño óptimo. Se especifican límites superiores e inferiores como "restricciones" en las variables de diseño. Estos límites definen el rango de variación de las Variables de Diseño (DV Hasta 60 DVs) pueden definirse en ANSYS para un problema de diseño de optimización.
- Variables de Estado (SVs) son cantidades que condicionan o restringen el diseño. Se conocen también como "variables dependientes", y son típicamente variables de respuesta que son funciones de las variables de diseño.

Una variable de estado puede tener un límite máximo y un límite mínimo, o puede tener un "único límite". En el ANSYS se pueden definir hasta 100 SVs en un problema de diseño de optimización.

- La Función Objetivo es la variable dependiente que se intenta minimizar. Debe ser una función de las DVs, es decir, si cambian los valores de las DVs debe cambiar el valor de la función objetivo. En el problema tratado, la deflexión del extremo libre es la función objetivo (que se minimiza). En ANSYS solo puede ser definida una sola función objetivo.

Las variables de diseño, las variables de estado, y la función objetivo son llamadas colectivamente variables de optimización. En una optimización realizada en ANSYS el usuario representa estas variables a través de parámetros. El usuario debe identificar en el modelo cuáles parámetros son representativos de las DVs, SVs, y de la función objetivo.

Un conjunto de diseño (o diseño) es simplemente un conjunto único de valores de parámetros que representan una configuración particular de un modelo. Típicamente, un conjunto de diseño se caracteriza por los valores de las variables de optimización; sin embargo, todos los parámetros del modelo (incluso aquellos que no están identificados como variables de optimización), se incluyen en el conjunto.

Un diseño factible es uno que satisface bien todas las restricciones o condiciones especificadas tanto para las SVs así como para las DVs. Si una o ninguna de las restricciones no se satisfacen, el diseño es considerado como no factible. El mejor diseño es aquel que satisface todas las restricciones y produce el mínimo valor en la función objetivo. (Si todo el conjunto de diseño es no factible, el mejor conjunto de diseño es aquel que más se acerca a la factibilidad, independiente del valor que produzca en la función objetivo).

El archivo de análisis es en ANSYS el archivo de entrada (el cual puede ser creado por varios caminos) que contiene una secuencia completa

de análisis (preproceso, solución, post-proceso). Este archivo debe contener un modelo definido paramétricamente usando variables que representen todas las entradas y las salidas que serán usadas como DVs, SVs, y la función objetivo. Desde este archivo, se crea automáticamente un ciclo de archivos de optimización (Jobname.LOOP) que es usado por el optimizador para ejecutar o desarrollar los ciclos de análisis.

Un ciclo es un paso a través del ciclo de análisis. (Esto es como un paso por el archivo de análisis). La salida para el último ciclo ejecutado se preserva en un archivo llamado Jobname.OPO. Una iteración de optimización (o simplemente iteración) es uno o más ciclos de análisis los cuales resultan en un nuevo conjunto de diseño. Típicamente, una iteración equivale a un ciclo. Sin embargo, para el método de primer orden, una iteración representa más de un ciclo.

La base de datos de optimización contiene el último entorno de optimización, e incluye las definiciones de las variables de optimización, los parámetros, todas las especificaciones de optimización y los conjuntos de diseño acumulados. Esta base de datos puede ser salvada (por Jobname.OPT) o resumida en cualquier momento en el optimizador.

Algunos de los conceptos descritos anteriormente pueden ser entendidos mejor a través de la Figura 20, que muestra el flujo de información durante un análisis de optimización. El archivo de análisis debe existir como una entidad separada, dado que la base de datos de optimización no hace parte de la base de datos del modelo de ANSYS.

2.2.1 Planteamiento del esquema de optimización del modelo del Puente Salgar.

Teniendo claridad sobre los conceptos de optimización, se empleó el siguiente esquema para el proceso de calibración del modelo:

- **Función Objetivo:** la función objetivo está definida como la norma del vector diferencia de deflexión vertical de nueve puntos de inspección localizados en el cordón inferior de la armadura aguas arriba del puente salgar (Diferencia entre lo medido y lo calculado). Sobre este cordón se realizan lecturas de nivelación topográfica para determinar las cotas antes de la aplicación de carga y después de la aplicación de carga. A la función objetivo se le agregó una constante arbitraria de 10, de tal manera, que el mejor ajuste se obtiene cuanto mas se acerca la función objetivo a su valor mínimo, en este caso a 10.

Es importante resaltar que se trató de eliminar incertidumbres en las fases preliminares de campo y de modelación con SAP-2000, de esta forma, el proceso de calibración tenía un avance intrínseco en las fases previas, que hizo que la modelación numérica realmente fuera la última fase de ajuste del modelo de elementos finitos.

- **Variables de Diseño:** para el caso se escogieron como variables de diseño el modulo elástico de los elementos de acero del puente y el espesor de losa. Esta escogencia obedece a que sobre estos parámetros pueden haber dudas sobre su valor óptimo para la modelación numérica.

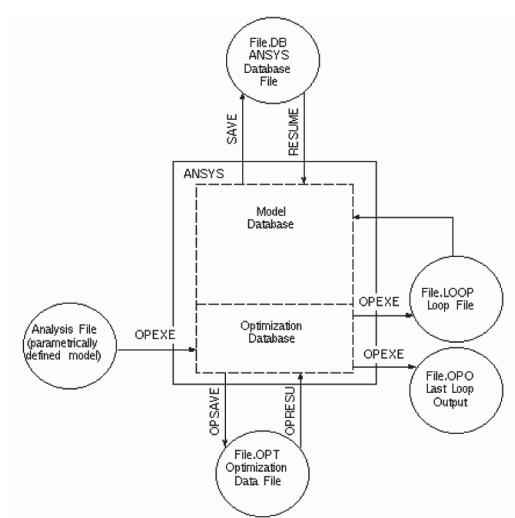


Figura 20. Flujo de datos de optimización.
Fuente: (Los autores).

- Variables de Estado: se escogieron las deflexiones de los nueve nodos nombrados en 1), de tal manera, que estas deben ser recalculadas cada vez que se modifica el diseño.

2.2.2 Solución del problema de calibración del modelo de elementos finitos del Puente Salgar.

A continuación se muestra la evolución del problema de optimización en cuanto a la función objetivo y las variables calibradas.

Las variables HLOSA, ECAERO y FOBJ son la altura de losa, el módulo elástico del acero y la función objetivo respectivamente. Las dimensiones básicas, son kgf y cm. Se inició con un HLOSA obtenido de referencias de consultores de estudios anteriores y el módulo de inicio es el promedio de cinco muestras testigo extraídas del puente, donde se encontraron valores extremos de 1 267 800 Kgf/cm² y 3 398 100 Kgf/cm². Se nota que la función objetivo logra un valor estable, el cual es muy difícil bajar, ya que es imposible eliminar errores

inherentes en la medición, incertidumbres de los parámetros e hipótesis propias de la modelación por elementos finitos.

Basado en el proceso de optimización, se concluyó que el modelo debe tener los siguientes datos:

- Una altura de la losa de 18,9 cm.
- Un módulo de elasticidad de 2 182 874 Kgf/cm².

Con lo anterior se logra una función objetivo igual a 10,65. En las Figuras 23 y 25 se muestran los gráficos de isocontornos en ANSYS de la solución de deflexión vertical.

3. COMPARACIÓN ENTRE SAP2000 Y ANSYS

La comparación y las diferencias para verificar el nivel de calibración del modelo, empleando los programas SAP-2000 y ANSYS se presentan en las Figuras 25, 26 y 27.

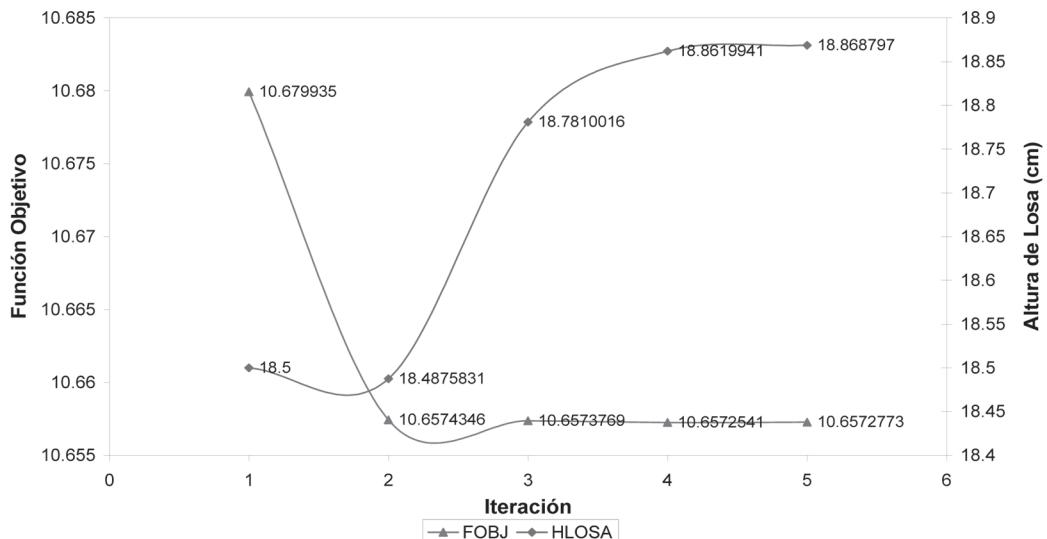


Figura 21. Calibración de la altura de losa del modelo del puente Salgar.
Fuente: (Los autores).

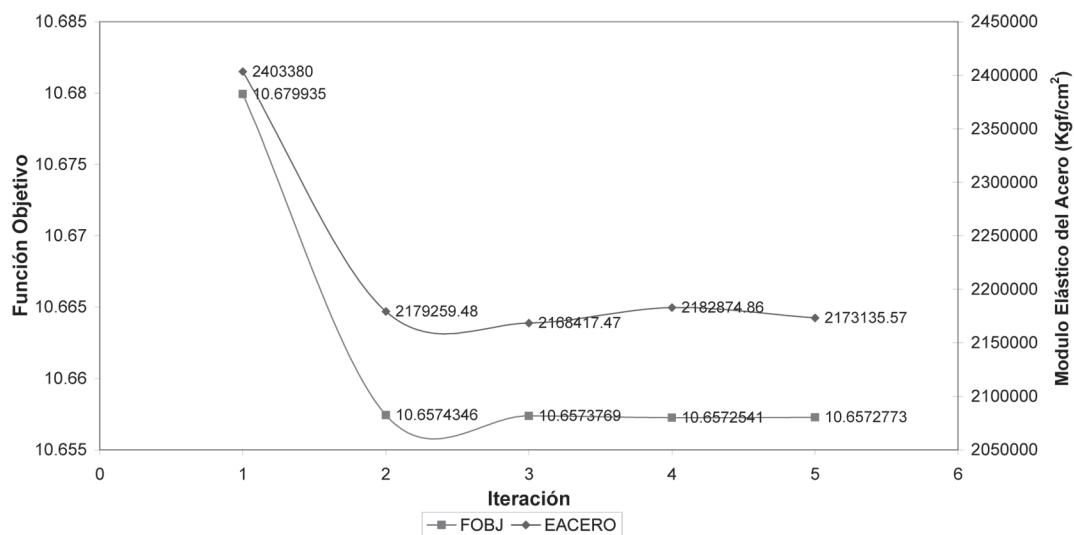


Figura 22. Calibración del módulo del acero del modelo del puente Salgar.
Fuente: (Los autores).

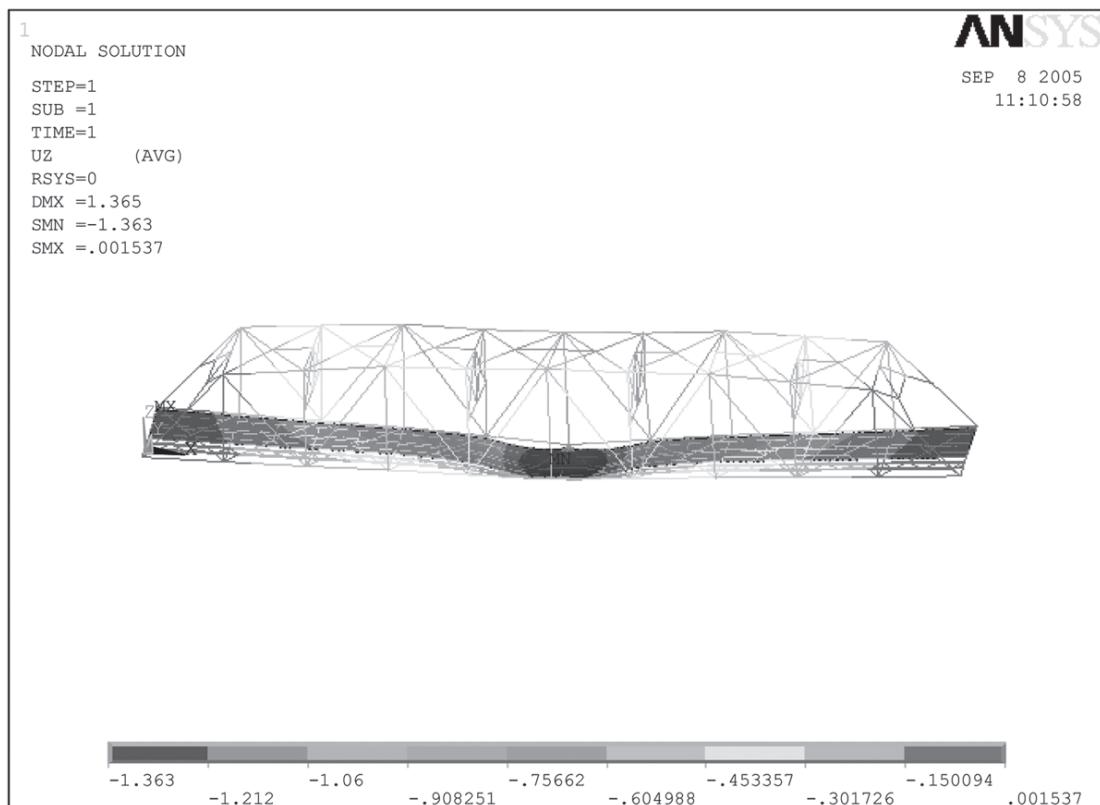


Figura 23. Solución de deflexión vertical de una de las naves del Puente Salgar.
Fuente: (Los autores).

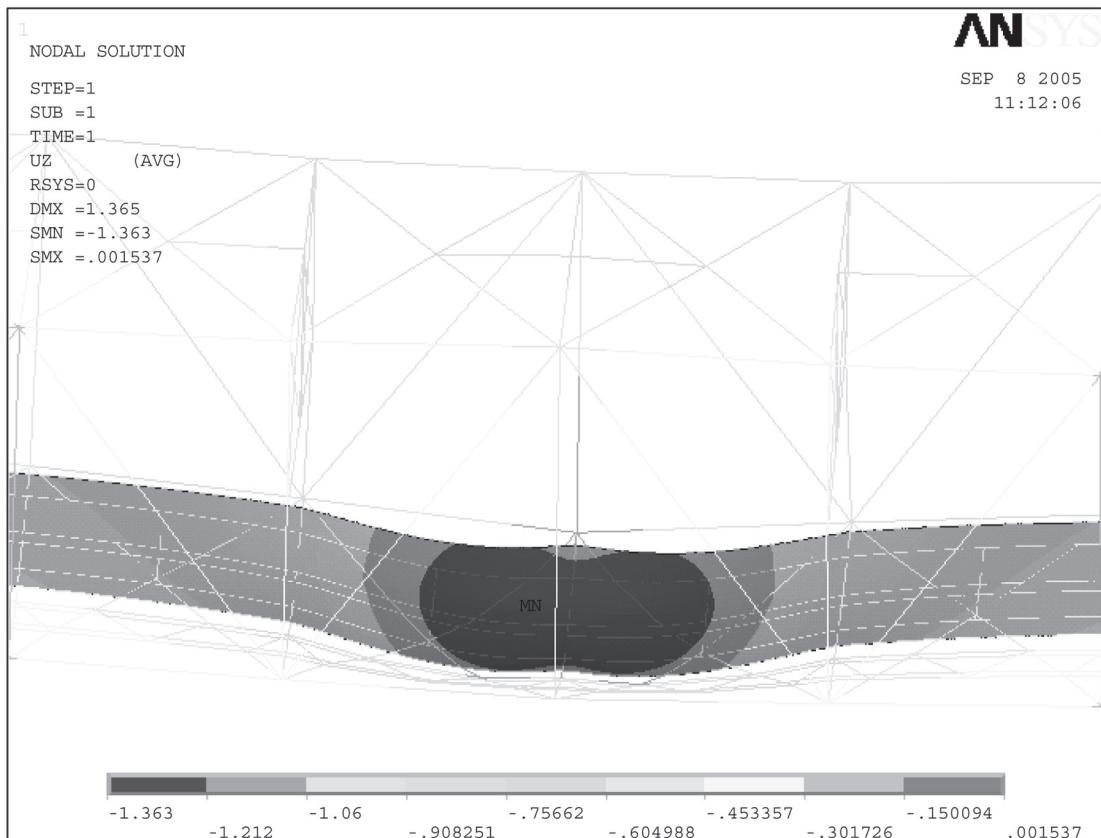


Figura 24. Detalle de deflexión vertical en la zona central de una nave del Puente Salgar.
Fuente: (Los autores).

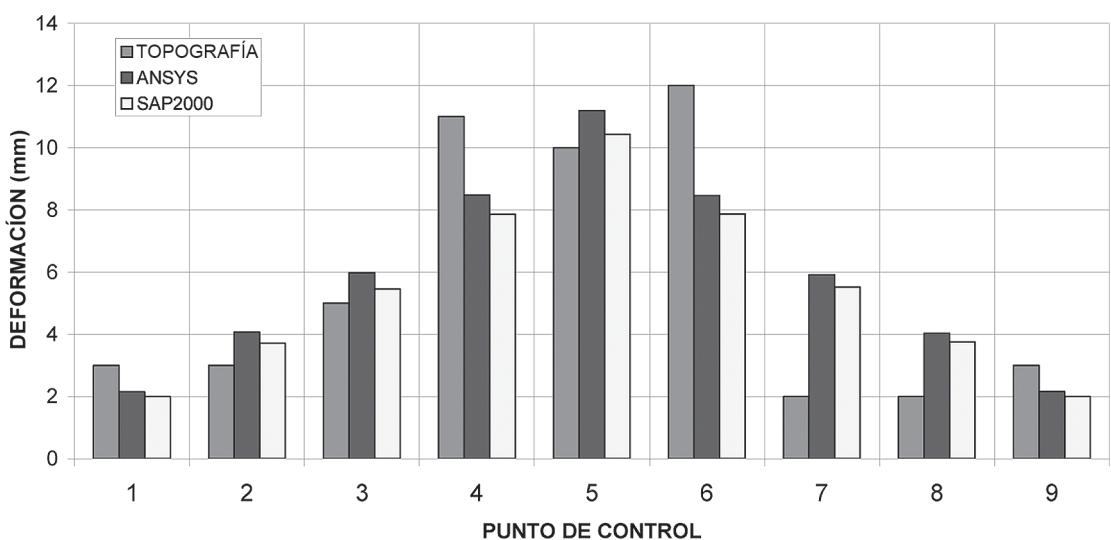


Figura 25. Deformación del puente para la prueba de carga 1.
Fuente: (Los autores).

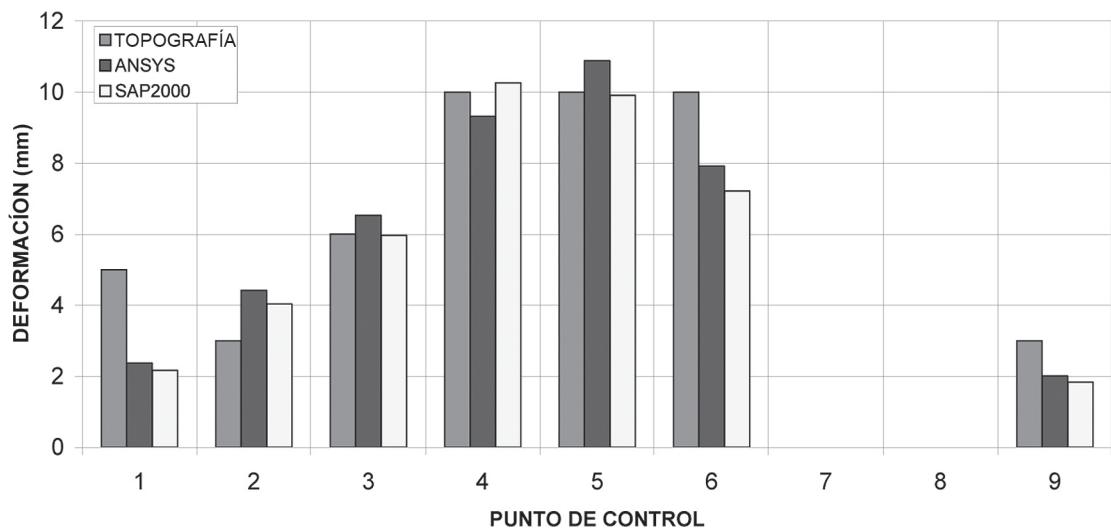


Figura 26. Deformación del puente para la prueba de carga 2.
Fuente: (Los autores).

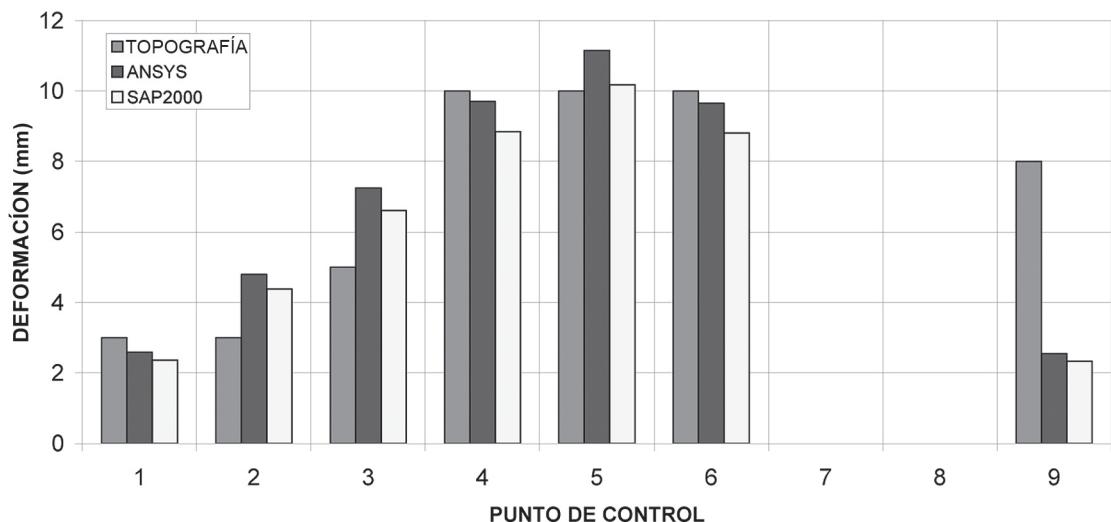


Figura 27. Deformación del puente para la prueba de carga 3.
Fuente: (Los autores).

CONCLUSIONES

1. Las técnicas de optimización reemplazan a las heurísticas de tanteo o de aproximación empíricas de los parámetros de un modelo numérico de una estructura, de esta manera, se plantea una técnica generalizable y eficiente para diferentes tipos de estructuras (puentes, edificaciones, túneles etc.).
2. El proceso de calibración de un modelo estructural requiere una secuencia de pasos rigurosa, que además debe ser realizada con la mayor precisión posible, si se quiere minimizar el error de las predicciones hechas a través de un modelo numérico. Los errores inherentes no son controlables por los algoritmos numéricos y por tanto, se debe tener especial cuidado en la toma de información de campo.
3. El éxito conseguido en la calibración por optimización del modelo de elementos finitos del Puente Salgar, abre la puerta para emplear estas técnicas en Colombia a través de proyectos de macroingeniería que normalmente requieren la optimización como herramienta para dar factibilidad a una propuesta técnico-económica.
4. Se realizó la calibración exitosa del modelo estructural del Puente Salgar, empleando resultados de la prueba de carga, ensayos mecánicos, levantamiento estructural y labores de topografía. Se llegó a un nivel de calibración del 90,3 % empleando el programa SAP2000, es decir, una diferencia del 9,7 % entre los datos experimentales y los obtenidos por el modelo estructural. Igualmente se obtuvo un 109,6 % empleando técnicas de optimización en el programa de elementos finitos ANSYS, lo que representa una diferencia de 9,6 % entre los datos experimentales y los obtenidos con el modelo.
5. Se empleó el modelo calibrado por ANSYS para realizar evaluaciones determinísticas y de probabilidad con mayor confiabilidad y menor incertidumbre para las recomendaciones del proyecto. De esta

manera se demuestra que la calibración del modelo estructural es un paso que debe ser previo a la realización de modelaciones estocásticas, para así poder disminuir las incertidumbres propias del modelo numérico que caracteriza el comportamiento tensodeformacional del puente.

6. Mediante la calibración del modelo del puente Salgar se garantiza que los procesos posteriores de evaluación por confiabilidad estructural, representan una herramienta confiable para la toma de decisiones y la evaluación del riesgo estructural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS. (1987). *Users Manual Revision 4.3A*, Swason Analysis System Inc.
- Bathe, K. J. (1982). *Finite element procedures in engineering analysis*. Prentice Hall Inc.
- Daza, R; Salazar, F & Muño, E. (2002). Metodología de evaluación estructural de Puente Metálico por técnicas de fiabilidad estructural. *Ingeniería de Construcción*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 17, 44- 52.
- Hinton, E. & Owen, D. R. J. (1979). *Finite element programming*. Academic Press.
- Nakamura Shoichiro (1997). *Análisis numérico y visualización gráfica con Matlab*. México D.F: Prentice Hall Hispanoamericana.
- Oñate, E. (1995). *Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos*. Barcelona: CIMNE.
- Oñate, E. & Suárez, B. (1986). An unified approach for the analysis of bridges, plates and axisymmetries shells using the linear Mindlin strip element. *Computer and Struct*, 3(17), 407-26.
- Rodríguez, W. & Pallares, M. (2004). Determinación de la superficie libre en presas

de tierra mediante técnicas de optimización.
Revista Ternura, 15, 33-44.

Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R. L. (1994). *El método de los elementos finitos*. Barcelona: McGraw-Hill.

SOBRE LOS AUTORES

Wilson Rodríguez Calderón

Ingeniero Civil, Magíster en Ciencias de la Ingeniería
Profesor investigador del Departamento de Ingeniería Civil
Grupo Estructuras
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C. Colombia
Teléfono: 3208320 extensión 5261
Correo electrónico: wilroca@javeriana.edu.co

Edgar Eduardo Muñoz Díaz

Ingeniero Civil, Magíster en Ciencias de la Ingeniería
Jefe de la Sección de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil
Grupo Estructuras
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C. Colombia
Teléfono: 3208320 extensión 5262
Correo electrónico: edgar.muñoz@javeriana.edu.co

Federico Alejandro Núñez Moreno

Ingeniero Civil
Joven investigador
Grupo Estructuras
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. Colombia
Teléfono: 3208320 extensión 5255
Correo electrónico: fnunez@javeriana.edu.co

