

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UP-03-2014

# **EXPERIMENTO CON MODELO DE PUENTE TIPO CERCHA Y SU COMPARACIÓN CON PREDICCIONES ANALÍTICAS**

## **Manual del Profesor**

Preparado por:

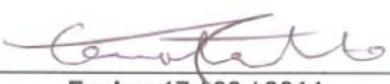
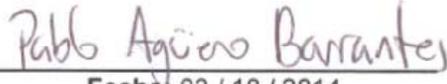
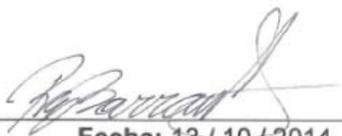
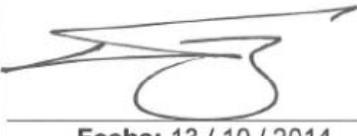
Unidad de Puentes



San José, Costa Rica

Noviembre de 2014

Página intencionalmente dejada en blanco

<b>1. Informe:</b> LM-PI-UP-03-2014		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b>  EXPERIMENTO CON MODELO DE PUENTE TIPO CERCHA Y SU COMPARACIÓN CON PREDICCIONES ANALÍTICAS – Manual del Profesor		<b>4. Fecha del informe</b>  14 Noviembre 2014
<b>5. Organización y dirección</b>  Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>6. Notas complementarias</b>  Ninguna.		
<b>7. Resumen</b> Este manual del profesor contiene instrucciones detalladas para dirigir un experimento usando un modelo de un puente tipo cercha. El objetivo final de la prueba es que el estudiante calcule analíticamente las cargas en los elementos y deformaciones en los nodos de la estructura hiperestática por medio del método de trabajo virtual o la programación matricial, y lo compare con los resultados experimentales utilizando un modelo experimental instrumentado de una estructura tipo cercha, utilizando el sistema modular de PASCO. En este manual también se incluyen, como referencia, resultados analíticos de las cargas y deflexiones de la estructura obtenidos por medio del método de trabajo virtual y el método de elemento finito para motivos de comparación.		
<b>8. Palabras clave</b> Cercha, experimentos, fuerza, celdas de carga, adquisición de datos.	<b>9. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>10. Núm. de páginas</b> 23
<b>11. Informe por:</b> Eduardo Montalito Bolaños Asistente Unidad de Puentes   Fecha: 17 / 09 / 2014	<b>12. Revisado por:</b> Ing. Pablo Agüero Barrantes, M. Sc. Unidad de Puentes   Fecha: 03 / 10 / 2014	
	<b>13. Aprobado por:</b> Ing. Roy Barrantes Jiménez. Coordinador, Unidad de Puentes   Fecha: 13 / 10 / 2014	<b>14. Aprobado por:</b> Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph. D. Coordinador General PITRA   Fecha: 13 / 10 / 2014



Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales



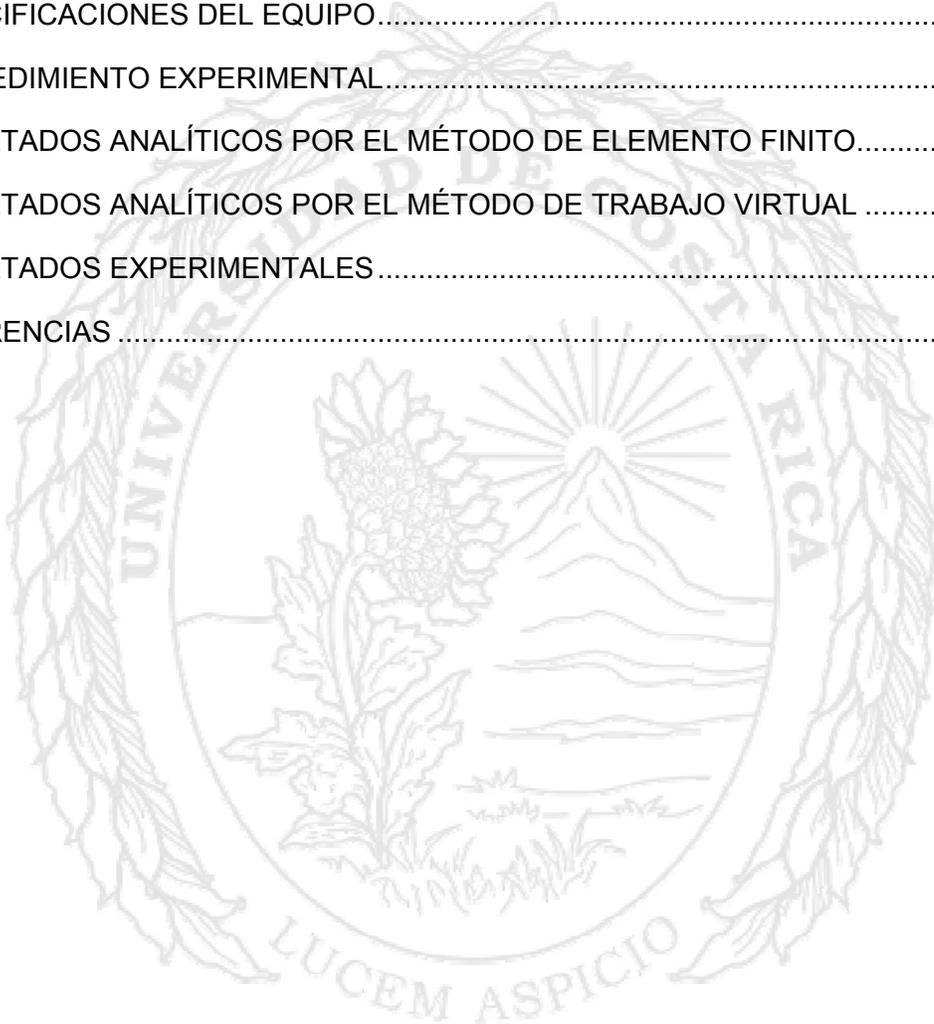
PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE

Página intencionalmente dejada en blanco



## TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN.....	6
2. INTRODUCCIÓN.....	6
3. TEORÍA.....	6
4. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO.....	8
5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	13
6. RESULTADOS ANALÍTICOS POR EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO.....	14
7. RESULTADOS ANALÍTICOS POR EL MÉTODO DE TRABAJO VIRTUAL.....	17
8. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	22
9. REFERENCIAS.....	23





## 1. RESUMEN

Este manual del profesor contiene instrucciones detalladas para dirigir un experimento usando un modelo de un puente tipo cercha. El objetivo final de la prueba es que el estudiante calcule analíticamente las cargas en los elementos y deformaciones en los nodos de la estructura hiperestática por medio del método de trabajo virtual o la programación matricial, y lo compare con los resultados experimentales utilizando un modelo experimental instrumentado de una estructura tipo cercha, utilizando el sistema modular de PASCO. En este manual también se incluyen, como referencia, resultados analíticos de las cargas y deflexiones de la estructura obtenidos por medio del método de trabajo virtual y el método de elemento finito para motivos de comparación.

## 2. INTRODUCCIÓN

Este manual abarca los pasos necesarios para ejecutar el experimento utilizando el modelo del puente tipo cercha de la marca PASCO. El manual inicia con información básica sobre el modelo experimental a utilizar y el equipo de medición. El manual continúa explicando en forma detallada cómo determinar experimentalmente las fuerzas internas en los elementos y las deformaciones en los nodos del modelo. Finalmente se presentan los resultados analíticos obtenidos utilizando el programa de elemento finito SAP 2000, el método de trabajo virtual y los resultados experimentales de la prueba.

## 3. TEORÍA

Una estructura se puede clasificar según su grado de determinación estática. Cuando todas las fuerzas presentes en la estructura se pueden determinar a partir de las ecuaciones de equilibrio, se considera a la estructura como estáticamente determinada o isostática. No obstante, cuando existen más fuerzas desconocidas que ecuaciones de equilibrio disponibles, se trata de una estructura estáticamente indeterminada o hiperestática. En este caso para encontrar las cargas desconocidas, se requiere de ecuaciones adicionales que se obtienen a partir de las relaciones entre reacciones y cargas internas con los desplazamientos y pendientes en distintos puntos de la estructura. A estas ecuaciones se les conoce como ecuaciones de compatibilidad (Hibbeler, 2012).

Las estructuras reales suelen ser hiperestáticas debido a diversos motivos. Uno de ellos es que, por lo general, presentan esfuerzos y deformaciones menores que las que se presentan en estructuras isostáticas. Otra razón por la cual se utilizan estructuras hiperestáticas en la práctica es su capacidad de redistribuir las cargas en caso de un mal diseño o de cargas excesivas, evitando el colapso. También hay que destacar que algunos edificios son estáticamente indeterminadas debido a la forma estructural a utilizar; por ejemplo, en la mayoría de estructuras de concreto reforzado, las vigas y columnas se cuegan en forma monolítica generando uniones rígidas que en conjunto producen una estructura hiperestática (Hibbeler, 2012).

En general, existen dos métodos para analizar estructuras hiperestáticas: método de fuerzas o flexibilidad, y método de desplazamientos o rigidez. El método de flexibilidad se basa en las relaciones de carga – desplazamiento y en las ecuaciones de compatibilidad de deformaciones, cuyas incógnitas son fuerzas. Se encuentran las fuerzas redundantes para posteriormente encontrar el resto de las fuerzas actuantes en la estructura. Por su parte, el método de rigidez se basa en escribir las relaciones de carga – desplazamiento para luego satisfacer las condiciones de equilibrio de la estructura. En este caso, las incógnitas para las cual se resuelve el método son desplazamientos (Hibbeler, 2012). Cabe destacar que los programas de análisis estructural que utilizan el método del elemento finito, tales como SAP 2000 y ETABS, se basan en el método de rigidez.

Las ecuaciones de compatibilidad en las cuales se basa el método de fuerzas se pueden plantear en forma matricial de la forma que se presenta en la ecuación 3-1. En este planteamiento  $R_i$  corresponde a la fuerza redundante  $i$ ,  $\Delta_i$  es la deformación en el grado de libertad  $i$  debido a las cargas reales aplicadas a la estructura auxiliar isostática y  $f_{ij}$  corresponde a la deformación en el grado de libertad  $i$  causado por una carga unitaria en el grado de libertad  $j$ .

$$\begin{pmatrix} f_{11} & \dots & f_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & \dots & f_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \vdots \\ \Delta_n \end{pmatrix} \quad [3-1]$$

Cada uno de los  $f_{ij}$  se denomina coeficiente de flexibilidad y puede ser determinado a través de métodos de energía para encontrar desplazamientos, tales como trabajo virtual o el teorema de Castigliano. Para el caso del trabajo virtual, se recuerda que las ecuaciones para resolver desplazamientos están dadas por la ecuación 3-2, para el caso de carga axial, y por la ecuación 3-3, para deformaciones por flexión. También existen expresiones dadas para las deformaciones

causadas por cortante, pero usualmente se desprecian por ser mucho menores a las generadas por flexión y carga axial.

$$1 \cdot \Delta = \sum \frac{nNL}{AE} \quad [3-2]$$

$$1 \cdot \Delta = \int_0^L \frac{mM}{EI} dx \quad [3-3]$$

## 4. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO

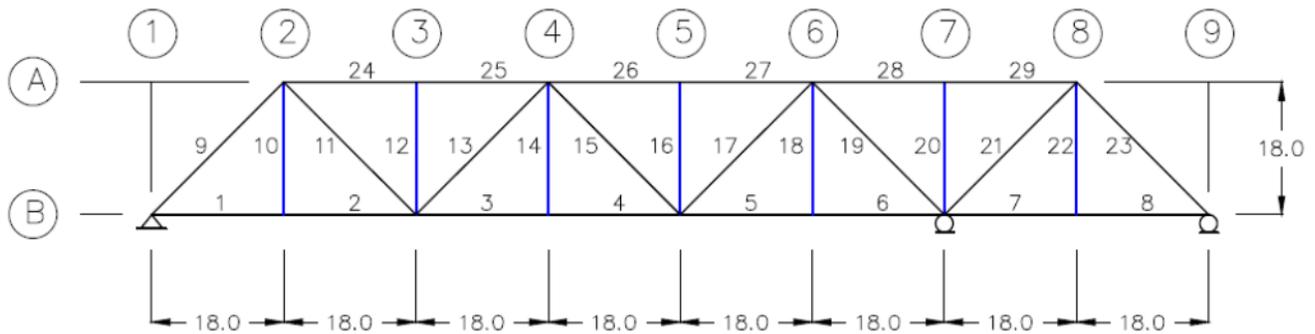
### 4.1 Modelo de puente tipo cercha de PASCO

El set de puentes de PASCO contiene elementos tales como vigas I, cuerdas, tablero flexible, conectores y tornillos que permiten construir modelos de estructuras de cerchas y puentes. Estos modelos permiten evaluar el comportamiento de las estructuras ante condiciones de carga estática o dinámica.

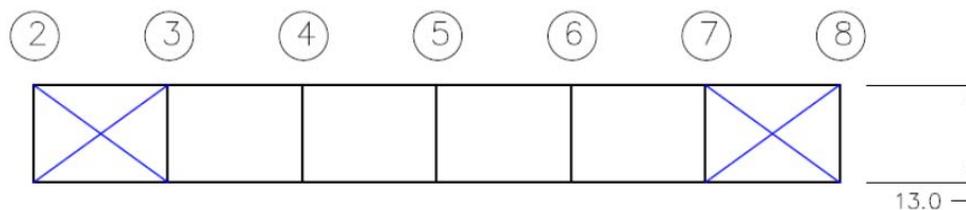
Para este experimento, el modelo que se ha construido es de un puente tipo cercha (Figura 1). En las Figuras 2, 3 y 4 se presentan las dimensiones del puente y sus condiciones de apoyo. Los elementos verticales de las cerchas laterales (10, 12, 14, 16, 18, 20 y 22) y los elementos de arrioste de la cercha superior e inferior poseen secciones rectangulares y se muestran en azul en las Figuras 2, 3 y 4. El resto de elementos del puente tipo cercha son vigas I, cuya sección se describe posteriormente en la Figura 5.



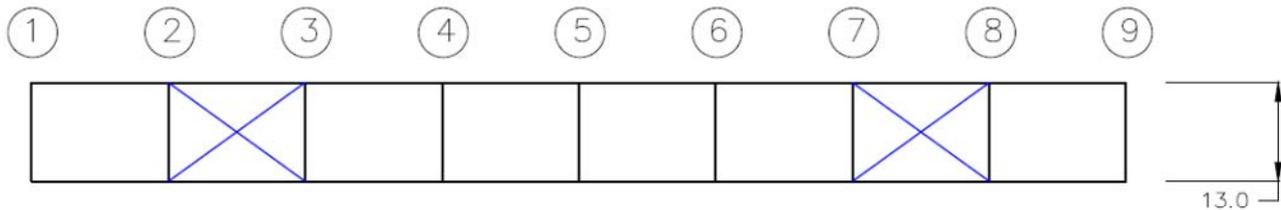
**Figura 1.** Modelo de puente tipo cercha de PASCO



**Figura 2.** Elevación de cercha lateral del modelo (unidades en centímetros)

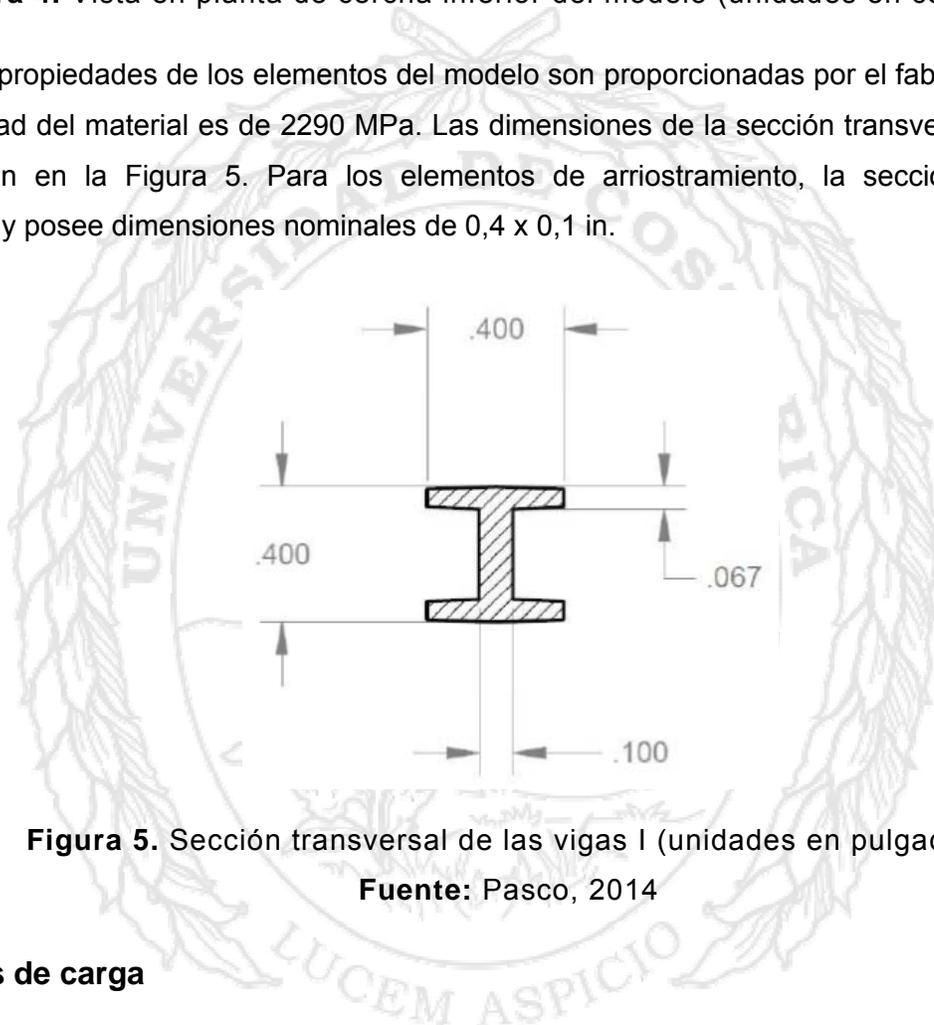


**Figura 3.** Vista en planta de cercha superior del modelo (unidades en centímetros)



**Figura 4.** Vista en planta de cercha inferior del modelo (unidades en centímetros)

Las propiedades de los elementos del modelo son proporcionadas por el fabricante. El módulo de elasticidad del material es de 2290 MPa. Las dimensiones de la sección transversal de las vigas I se muestran en la Figura 5. Para los elementos de arriostramiento, la sección transversal es rectangular y posee dimensiones nominales de 0,4 x 0,1 in.



**Figura 5.** Sección transversal de las vigas I (unidades en pulgadas)

**Fuente:** Pasco, 2014

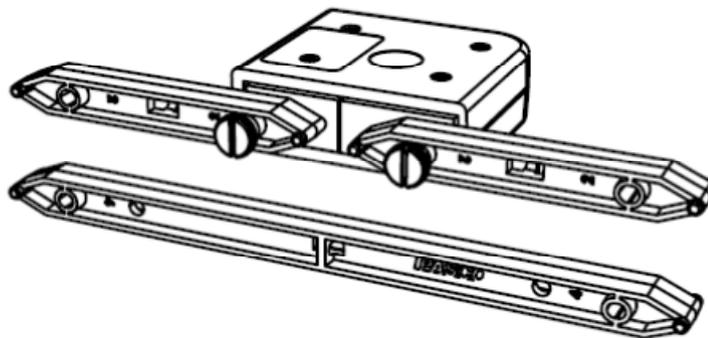
## 4.2 Celdas de carga

Se utilizarán celdas de carga de PASCO (Figura 6) con capacidad de medir fuerzas en el rango de -100 N y +100 N. Estas celdas de carga se conectan al sistema de adquisición de datos CompactDAQ de *National Instruments* para transmitir la señal al computador.



**Figura 6.** Celda de carga de PASCO

Para medir fuerzas axiales en elementos de modelos PASCO se pueden incluir las celdas de carga al modelo. Para ello, se reemplaza una viga por dos vigas más cortas y la celda de carga (Figura 7). Se deben colocar los tornillos en forma suelta para asegurar que la celda de carga únicamente registre cargas axiales.



**Figura 7.** Ensamblaje de celdas de carga en elemento del modelo

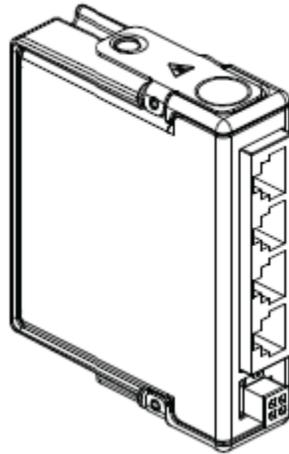
**Fuente:** Pasco, 2014

### 4.3 Sistema de adquisición de datos CompactDAQ

El CompactDAQ de *National Instruments* (Figura 8) es un sistema de adquisición de datos (se utilizan los acrónimos DAQ o DAS para *Data Acquisition System*) que se encarga de la temporización, sincronización y adquisición de datos provenientes de diversos sensores que se conectan a los módulos que se integran al chasis. Existen diversos módulos según el tipo de sensor que se desee conectar (acelerómetros, medidores de voltaje u otros). En el caso de las celdas de carga, se conectan al módulo NI 9237 que posee entradas RJ-50 (Figura 9).



**Figura 8.** Sistema de adquisición de datos CompactDAQ



**Figura 9.** Módulo NI 9237 utilizado para conectar las celdas de carga

**Fuente:** Pasco, 2014

El sistema de adquisición de datos se controla en la computadora a través de un programa desarrollado con la plataforma de desarrollo de sistemas LabView de *National Instruments*. El programa para estos fines posee las funciones de iniciar y terminar las mediciones de las celdas de carga, desplegar las mediciones en tiempo real y registrar los datos de estos sensores.

## 5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 5.1 Propósito

Esta sección explica cómo determinar experimentalmente las cargas en los elementos internos y las deflexiones en los nodos de la estructura tipo cercha.

### 5.2 Materiales

1. Modelo experimental de puente tipo cercha PASCO
2. Celdas de carga
3. Vernier de patas largas, regla o cinta métrica
4. Masas de 0,5 kg
5. Sistema de adquisición de datos

### 5.3 Procedimiento

A continuación se presenta el procedimiento experimental para una condición particular de cargas y apoyos. La distribución de apoyos y cargas puede ser variada a criterio del profesor,

1. Encienda el sistema de adquisición de datos CompactDAQ y el computador al cual se encuentra conectado.
2. Coloque celdas de carga en los elementos 5, 11, 21 y 26, y conéctelas al sistema de adquisición de datos. Asegúrese de conectar las celdas de carga al módulo apropiado del CompactDAQ. Para realizar las estimaciones analíticas, se debe suponer que las propiedades de la sección transversal de estos elementos permanecen constantes.
3. Mida la separación entre la cuerda inferior de la cercha lateral y la base en los ejes 2, 4 y 6. Se recomienda utilizar, al menos, un vernier. Esto debido a que las deflexiones esperadas en el modelo tienen valores menores a 1 mm por lo que no se podrán detectar correctamente con un instrumento de menor precisión.
4. Coloque dos masas de 0,5 kg (para un total de 1 kg) en cada uno de los elementos transversales en las intersecciones de los ejes B y 2, A y 4, B y 6, A y 8 (Figura 2).
5. En el computador ingrese al programa de LabView denominado carga\_axial\_cercha.vi. De inicio al programa para que empiece a mostrar las mediciones de las celdas de carga. Haga click derecho en el gráfico que aparece en pantalla para exportar los datos.
6. Mida nuevamente la separación entre la cuerda inferior de la cercha lateral y la base en los ejes 2, 4 y 6 mientras la carga está aplicada para determinar las deflexiones.

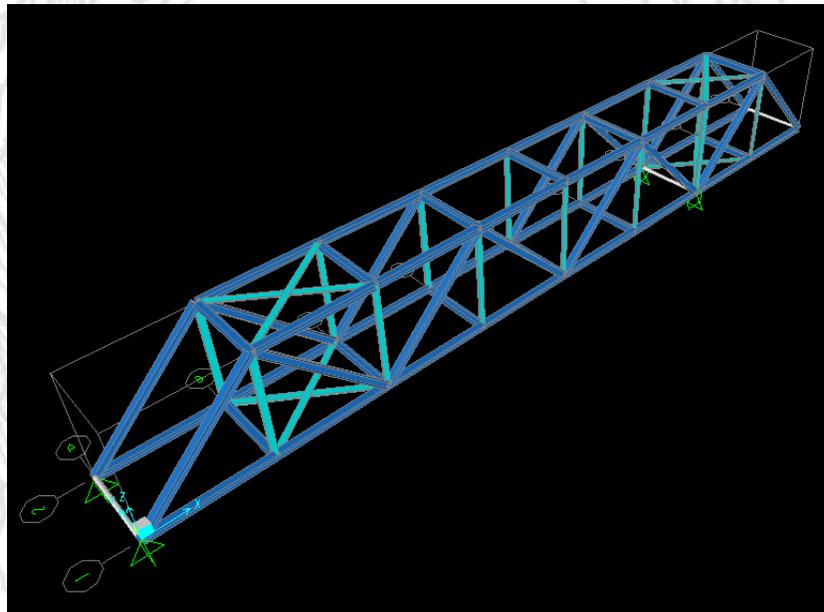
## 6. RESULTADOS ANALÍTICOS POR EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

### 6.1 Modelos

La estructura de puente tipo cercha se ha modelado en el programa de elemento finito SAP 2000. Para ello se han considerado las siguientes propiedades del material:  $E = 2290 \text{ MPa}$ ,  $U = 0,35$  y  $\rho = 1140 \text{ kg/m}^3$ . Los elementos de la estructura se han introducido como elementos tipo barra en el programa de análisis. Las secciones transversales utilizadas en el modelo analítico son las secciones

de dimensiones nominales que establece PASCO y que se indicaron previamente en la descripción del modelo real. A su vez, se han empleado las dimensiones mostradas en las Figuras 2, 3 y 4 para la configuración geométrica de los elementos de la estructura. Debido a la configuración real de las conexiones entre elementos, se han modelado las uniones como rígidas.

Para el modelado de los apoyos, se han colocado apoyos de tipo patín en los nodos B7 y B9 y apoyos tipo cuchilla en los nodos en B1. Sin embargo, al obtener los resultados del modelo se observa que la reacción de los apoyos en B9 es en dirección de la gravedad. Dada la configuración real de los apoyos, estos únicamente pueden actuar en sentido contrario a la gravedad; por tanto se han eliminado los apoyos B9 para el análisis de cargas y deformaciones. Esto concuerda con el comportamiento observado en el ensayo, en el cual los apoyos en B9 no trabajan una vez que se han colocado las cargas en los elementos de la estructura. El modelo analítico se muestra en la Figura 10.



**Figura 10.** Modelo analítico del puente tipo cercha en SAP 2000

Para el análisis se ha desarrollado un modelo simplificado y otro más complejo. El modelo simplificado incluye únicamente el peso propio de los elementos y las cargas externas aplicadas. Por su parte, en el modelo más elaborado se han incluido el peso de las celdas de carga (75 g), el peso de los elementos de unión en los nodos (20 g) y el peso de los apoyos tipo patín que están conectados a la estructura (310 g). Principalmente se considera importante incluir el peso del apoyo

en B9 puesto que pierde el contacto con el “suelo”, por lo que actúa como una carga adicional en la estructura.

## 6.2 Resultados

Para ambos modelos se han obtenido las cargas internas y deflexiones al aplicar las cargas establecidas en el procedimiento de la prueba. Los resultados se muestran en los Cuadros 1 y 2. Hay que destacar que las cargas internas se han obtenido a partir de la combinación de carga muerta y carga específica aplicada.

**Cuadro 1.** Cargas axiales de elementos según modelos de SAP 2000

<i>Elemento</i>	<i>Carga axial interna (N)</i>	
	<i>Modelo simplificado</i>	<i>Modelo completo</i>
5	3,75	2,61
11	3,26	4,66
21	-7,67	-11,67
26	-7,99	-9,35

Para la obtención analítica de las deformaciones con los modelos, se obtuvo la diferencia entre la deformación inducida cuando la estructura está sometida únicamente a su peso propio y la deflexión de la estructura al estar sometida a su peso propio y las cargas adicionales. En el caso del modelo simplificado esto concuerda con la deflexión de la estructura al aplicar únicamente la carga adicional. Sin embargo, en el modelo más complejo esto no es así puesto que cuando la estructura está sometida únicamente a su peso propio, los apoyos en B9 sí trabajan. Por tanto, para este modelo se obtienen las deflexiones para la carga muerta considerando los apoyos en B9, y las deflexiones para la carga muerta y la carga adicional sin considerar los apoyos en B9.

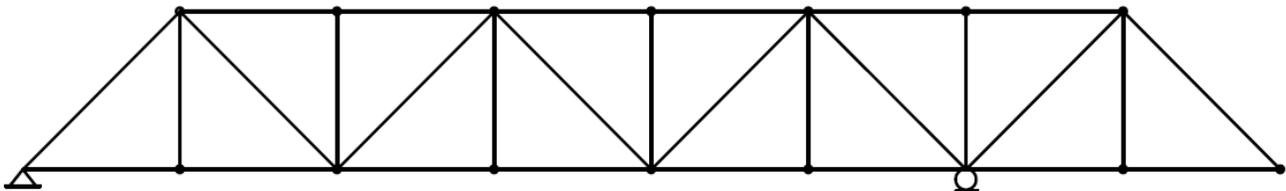
**Cuadro 2.** Deflexiones en distintos puntos de cuerda inferior de cercha lateral según modelos de SAP 2000

Eje	Deflexión de cuerda inferior de cercha lateral (mm)					
	Modelo simplificado			Modelo completo		
	Peso propio	Peso propio y carga adicional	Carga adicional	Peso propio	Peso propio y carga adicional	Carga adicional
2	-0,01649	-0,11515	-0,09867	-0,04560	-0,14015	-0,09455
4	-0,03002	-0,18240	-0,15238	-0,08289	-0,22536	-0,14247
6	-0,01485	-0,10682	-0,09197	-0,04106	-0,12620	-0,08514

## 7. RESULTADOS ANALÍTICOS POR EL MÉTODO DE TRABAJO VIRTUAL

### 7.1 Modelo

Los resultados analíticos empleando el método de trabajo virtual se han obtenido con base en un modelo simplificado de la estructura. En este caso se ha realizado un modelo bidimensional considerando únicamente una de las cerchas laterales. La única propiedad del material considerada fue el módulo de elasticidad  $E$  con un valor de 2290 MPa. Se consideraron las propiedades geométricas de las secciones que se describieron previamente, y las dimensiones de la estructura de la Figura 2. Por simplicidad se modelaron las uniones entre elementos como goznes, generando una estructura tipo cercha. Debido a que se conoce que los apoyos tipo patín en B9 no actúan, no se incluyeron en el modelo. El modelo se presenta en la Figura 11.



**Figura 11.** Modelo de la estructura para el análisis por trabajo virtual

## 7.2 Resultados

La obtención de las cargas y deflexiones se ha realizado considerando únicamente la carga aplicada a la estructura (se ha despreciado el peso propio). En los Cuadros 3, 4 y 5 se presentan los datos del análisis para la obtención de las deflexiones en cada uno de los nodos. En ellos también se puede encontrar la carga axial de los elementos.



**Cuadro 3.** Trabajo virtual para deflexión de cuerda inferior de la cercha lateral en eje 2

Elemento	$N (N)$	$n$	$L (mm)$	$A (mm^2)$	$E (MPa)$	$NnL/AE (mm)$
1	6,540	0,833	180	51,74	2290	0,00828
2	6,540	0,833	180	51,74	2290	0,00828
3	9,809	0,499	180	51,74	2290	0,00744
4	9,809	0,499	180	51,74	2290	0,00744
5	3,270	0,167	180	51,74	2290	0,00083
6	3,270	0,167	180	51,74	2290	0,00083
7	0,000	0	180	51,74	2290	0,00000
8	0,000	0	180	51,74	2290	0,00000
9	-9,249	-1,178	254,56	51,74	2290	0,02341
10	4,905	1	180	25,81	2290	0,01494
11	2,313	-0,236	254,56	51,74	2290	-0,00117
12	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
13	-2,313	0,236	254,56	51,74	2290	-0,00117
14	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
15	-4,624	-0,236	254,56	51,74	2290	0,00234
16	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
17	4,624	0,236	254,56	51,74	2290	0,00234
18	4,905	0	180	25,81	2290	0,00000
19	-11,561	-0,236	254,56	51,74	2290	0,00586
20	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
21	-6,937	0	254,56	51,74	2290	0,00000
22	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
23	0,000	0	254,56	51,74	2290	0,00000
24	-8,174	-0,666	180	51,74	2290	0,00827
25	-8,174	-0,666	180	51,74	2290	0,00827
26	-6,540	-0,332	180	51,74	2290	0,00330
27	-6,540	-0,332	180	51,74	2290	0,00330
28	4,905	0	180	51,74	2290	0,00000
29	4,905	0	180	51,74	2290	0,00000
						$\Sigma$ 0,10277

**Cuadro 4.** Trabajo virtual para deflexión de cuerda inferior de la cercha lateral en eje 4

Elemento	$N (N)$	$n$	$L (mm)$	$A (mm^2)$	$E (MPa)$	$NnL/AE (mm)$
1	6,540	0,5	180	51,74	2290	0,00497
2	6,540	0,5	180	51,74	2290	0,00497
3	9,809	1,5	180	51,74	2290	0,02235
4	9,809	1,5	180	51,74	2290	0,02235
5	3,270	0,5	180	51,74	2290	0,00248
6	3,270	0,5	180	51,74	2290	0,00248
7	0,000	0	180	51,74	2290	0,00000
8	0,000	0	180	51,74	2290	0,00000
9	-9,249	-0,707	254,56	51,74	2290	0,01405
10	4,905	0	180	25,81	2290	0,00000
11	2,313	0,707	254,56	51,74	2290	0,00351
12	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
13	-2,313	-0,707	254,56	51,74	2290	0,00351
14	0,000	1	180	25,81	2290	0,00000
15	-4,624	-0,707	254,56	51,74	2290	0,00702
16	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
17	4,624	0,707	254,56	51,74	2290	0,00702
18	4,905	0	180	25,81	2290	0,00000
19	-11,561	-0,707	254,56	51,74	2290	0,01756
20	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
21	-6,937	0	254,56	51,74	2290	0,00000
22	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
23	0,000	0	254,56	51,74	2290	0,00000
24	-8,174	-1	180	51,74	2290	0,01242
25	-8,174	-1	180	51,74	2290	0,01242
26	-6,540	-1	180	51,74	2290	0,00994
27	-6,540	-1	180	51,74	2290	0,00994
28	4,905	0	180	51,74	2290	0,00000
29	4,905	0	180	51,74	2290	0,00000
						$\Sigma$ 0,15700

**Cuadro 5.** Trabajo virtual para deflexión de cuerda inferior de la cercha lateral en eje 6

Elemento	$N (N)$	$n$	$L (mm)$	$A (mm^2)$	$E (MPa)$	$NnL/AE (mm)$
1	6,540	0,167	180	51,74	2290	0,00166
2	6,540	0,167	180	51,74	2290	0,00166
3	9,809	0,499	180	51,74	2290	0,00744
4	9,809	0,499	180	51,74	2290	0,00744
5	3,270	0,833	180	51,74	2290	0,00414
6	3,270	0,833	180	51,74	2290	0,00414
7	0,000	0	180	51,74	2290	0,00000
8	0,000	0	180	51,74	2290	0,00000
9	-9,249	-0,236	254,56	51,74	2290	0,00469
10	4,905	0	180	25,81	2290	0,00000
11	2,313	0,236	254,56	51,74	2290	0,00117
12	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
13	-2,313	-0,236	254,56	51,74	2290	0,00117
14	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
15	-4,624	0,236	254,56	51,74	2290	-0,00234
16	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
17	4,624	-0,236	254,56	51,74	2290	-0,00234
18	4,905	1	180	25,81	2290	0,01494
19	-11,561	-1,178	254,56	51,74	2290	0,02926
20	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
21	-6,937	0	254,56	51,74	2290	0,00000
22	0,000	0	180	25,81	2290	0,00000
23	0,000	0	254,56	51,74	2290	0,00000
24	-8,174	-0,332	180	51,74	2290	0,00412
25	-8,174	-0,332	180	51,74	2290	0,00412
26	-6,540	-0,666	180	51,74	2290	0,00662
27	-6,540	-0,666	180	51,74	2290	0,00662
28	4,905	0	180	51,74	2290	0,00000
29	4,905	0	180	51,74	2290	0,00000
						$\Sigma$ 0,09449

## 8. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los valores de carga y deflexiones reales medidos en la estructura se presentan en los Cuadros 6 y 7, en conjunto con el error de estimación de cada uno de los métodos de análisis empleados. En general la estimación de las cargas es aceptable empleando cualquiera de los métodos. Sin embargo, la estructura presentó una flexibilidad mucho mayor a la estimada analíticamente. Por lo tanto, las deflexiones reales son muy superiores a las estimadas analíticamente. Se destaca que las deflexiones se registraron por medio de procesamiento de imagen digital con una precisión de  $\pm 0,015$  mm.

**Cuadro 6.** Cargas axiales de elementos obtenidas experimentalmente

<i>Elemento</i>	<i>Carga axial experimental (N)</i>	<i>Error de modelo simplificado en SAP 2000 (%) (Continuo)</i>	<i>Error de modelo completo en SAP 2000 (%) (Continuo)</i>	<i>Error de modelo bidimensional por trabajo virtual (%) (Con goznes)</i>
5	2,87	30,77	8,99	14,03
11	4,03	19,17	15,54	42,65
21	-8,47	9,50	37,70	18,15
26	-11,76	32,04	20,48	44,38

**Cuadro 7.** Deformación experimental en distintos puntos de cuerda inferior de cercha lateral

<i>Eje</i>	<i>Deflexión experimental (mm)</i>	<i>Error de modelo simplificado en SAP 2000 (%)</i>	<i>Error de modelo completo en SAP 2000 (%)</i>	<i>Error de modelo bidimensional por trabajo virtual (%)</i>
2	0,347	71,59	72,75	70,41
4	0,516	70,45	72,39	69,56
6	0,258	64,30	67,00	63,32

## 9. REFERENCIAS

Hibbeler, R. (2012). *Structural Analysis*. New Jersey: Prentice Hall.

PASCO. (2014). *100 N Load Cell Manual*. Recuperado el 21 de Agosto de 2014, de PASCO:  
[http://www.pasco.com/prodCatalog/PS/PS-2201\\_100-n-load-cell/#resourcesTab](http://www.pasco.com/prodCatalog/PS/PS-2201_100-n-load-cell/#resourcesTab)

PASCO. (4 de Abril de 2010). *Cross section and material properties for structure system beams*.  
Recuperado el 21 de Agosto de 2014, de PASCO: <http://www.pasco.com/support/technical-support/technote/techIDlookup.cfm?TechNoteID=1060>

