

Efecto de las riostras sobre el factor de rueda en puentes de sección compuesta

HÉCTOR ENRIQUE JARAMILLO SUÁREZ*
GILBERTO AREIZA PALMA**

Resumen

En este artículo se presentan los resultados obtenidos de analizar, mediante la técnica de elementos finitos, una serie de puentes simplemente apoyados, de sección compuesta (viga metálica y losa de concreto) con diferentes condiciones de arriostramiento lateral. Para los diferentes modelos se determinó la incidencia de la cantidad de riostras laterales sobre el momento flector y la fuerza cortante que se generan sobre la viga metálica o, en otras, sobre el factor de rueda.

1. Introducción

La superestructura de un puente de sección compuesta, básicamente está constituida por una losa de concreto, dos vigas laterales o de borde, una serie de vigas intermedias y las riostras, que pueden ser solamente colocadas en los extremos o en los extremos y en posiciones intermedias. Las partes constitutivas de la superestructura de un puente se muestran en la Figura 1.

En el diseño de puentes formados por losa de concreto reforzado apoyada en vigas longitudinales, fre-

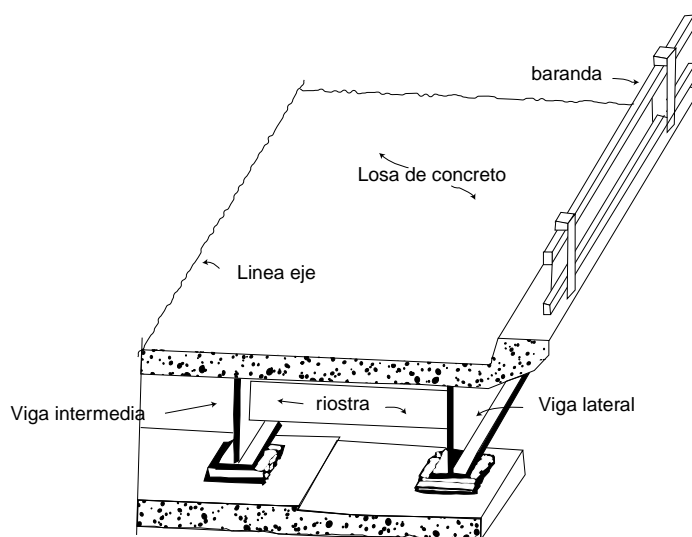


Figura 1. Partes de la superestructura de un puente de sección compuesta.

* Ingeniero Mecánico, Especialista en Estructuras. Profesor de la Universidad Autónoma de Occidente. hejaramillo@cua.edu.co

** Ingeniero Civil, M. Sc Profesor de la Universidad del Valle. gareiza@mafalda.univalle.edu.co

cuentemente el análisis estructural se reduce a un problema bidimensional en el cual sólo se consideran las fuerzas cortantes en el plano de carga y los momentos flectores causados respecto al eje perpendicular a dicho plano, despreciando el carácter tridimensional del comportamiento de la superestructura, donde se pueden encontrar otros tipos de efecto como los torsionales, flexión biaxial y esfuerzos cortantes producidos en planos diferentes al de carga.

Esta práctica generalizada de un análisis simplificado se ha visto fortalecida por el hecho de ser permitida y en cierta forma estimulada por los códigos de diseño desde hace varias décadas, porque permite una rápida solución del análisis estructural de las vigas longitudinales. Para citar sólo el caso de nuestra Norma AISI-200-95¹, donde los valores de los actuales factores de rueda fueron tomados de la Norma AASHTO² de 1944.

Por otra parte, para la aplicación del método simplificado en el análisis estructural de las vigas longitudinales, la Norma AISI-200-95 establece lo siguiente:

Se denomina “carga de rueda” a una línea de cargas concentradas de magnitud igual a la mitad de la carga de camión, y con su misma distribución. En este método el valor de cada carga de rueda se multiplica por el llamado “factor de rueda”, que indica el número de cargas de rueda que se consideran actuando sobre una determinada viga longitudinal.

Para la aplicación del método simplificado se clasifican las superestructuras de los puentes en seis tipos, de acuerdo con la sección transversal, la cual caracteriza las propiedades de distribución transversal de la carga:

- a) *de losa maciza.*
- b) *de losa y vigas longitudinales.*
- c) *celulares.*
- d) *de vigas adosadas.*
- e) *de estructura lateral.*
- f) *de parrilla metálica.*

De otro lado, el código no menciona el tipo de efecto que puede llegar a presentar la cantidad de arriostamiento lateral en el puente o específicamente su influencia sobre el factor de rueda. Por lo anterior surgen algunas inquietudes: ¿influye o no la cantidad del arriostamiento en el factor de rueda?, y si influye, ¿qué tanta es su influencia?

Interrogantes como los planteados anteriormente, son los que se tratan de explicar en este artículo, a partir de realizar el análisis de una serie de puentes con diferentes tipos de arriostamiento lateral, utilizando la técnica de elementos finitos. Los tipos de arriostamiento lateral utilizados en la superestructura de los puentes para el análisis fueron:

- a) Sólo riostras en los extremos de las vigas, es decir, *sin riostras intermedias.*
- b) Con riostras en los extremos y en la mitad ($a L/2$) de las vigas.
- c) Con riostras en los extremos y a cada tercio ($a L/3$) de la longitud de las vigas.
- d) Con riostras en los extremos y a cada cuarto ($a L/4$) de la longitud de la viga.
- e) Con riostras en los extremos y a cada octavo ($a L/8$) de la longitud de la viga.

2. Factor de rueda

El “factor de rueda (FR)” se define como la relación entre el

1. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), «Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (Norma AIS-200-95)», Bogotá, diciembre 1995.
2. AASHTO, «Standard Specifications for Highway Bridges». Fourteenth Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1989.

efecto interno (fuerza cortante o momento flector) en una sección de la viga producida por una carga viva móvil, obtenido de un análisis tridimensional y el valor correspondiente determinado mediante un análisis bidimensional usando un tren de cargas de rueda:

$$F.R. = \frac{\text{Momento flector real}}{\text{Momento flector calculado para una carga de medio camión}}$$

3. Modelo utilizado

Para modelar una estructura se pueden utilizar varios tipos de modelos por elementos finitos, y también se pueden utilizar combinaciones entre los diferentes tipos de modelos que tenga a disposición el software que se utilizará para el análisis. Lo anterior se realizará con el objeto de poder acercarse mucho más al comportamiento del modelo a lo que sucede en la realidad, pero se debe tener cuidado de combinar adecuadamente estos tipos de modelos, ya que una combinación mal realizada puede llevar a que el modelo refleje un comportamiento alejado de lo que sucede en la realidad, arrojando datos erróneos.

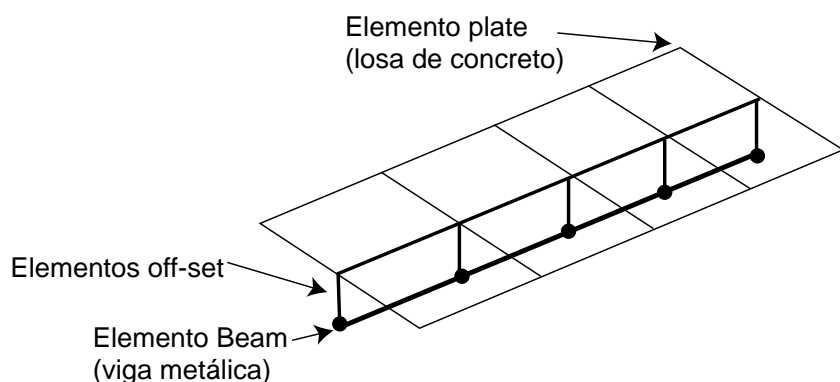


Figura 2. Modelo utilizado en el análisis

Para el análisis se utilizó un modelo tipo *Plate* o placa para la losa de concreto, elemento tipo *Beam* o viga para las vigas y debido a las diferencias de posición de los elementos *Plate* con respecto a los tipo *Beam*, se utilizaron elementos conectores off-set (ver Figuras 2 y 3).

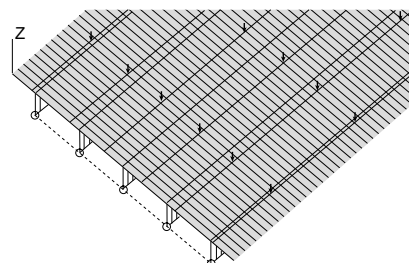


Figura 3. Modelo por elementos finitos³

El elemento *Plate* posee cinco grados de libertad por nodo, tres de translación (movimiento a lo largo de los ejes X, Y y Z) y dos de rotación (alrededor de los ejes X y Y). Este tipo de elemento se modela como una superficie intermedia paralela a las superficies superior e inferior (Figura 4).

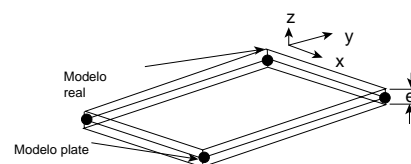


Figura 4. Modelo tipo *Plate* o placa

El elemento *Beam* posee seis grados de libertad por nodo (tres de translación y tres de rotación) de tal manera que cada nodo puede moverse a lo largo de los ejes X, Y y Z, como también girar alrededor de los mismos. Este elemento soporta momentos flectores y torsores, fuerzas axiales y cortantes, y se modela como una línea que representa la ubicación de su eje longitudinal que pasa por el centroide de la sección transversal (Figura 5).

3. Para el análisis por elementos finitos de los modelos se utilizó el software Algor.

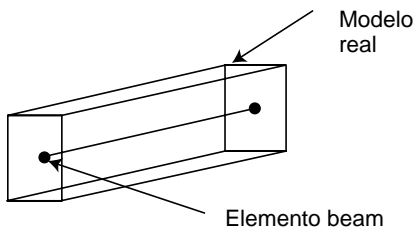


Figura 5. Modelo del elemento tipo Beam.

Teniendo en cuenta que el elemento Plate modela superficies intermedias entre las exteriores de una placa real, y debido a que el centroide del modelo de la viga metálica está por debajo de la superficie de la losa de concreto, se hace necesario unir la placa y la viga, con el objeto de poder transmitir los efectos o las cargas aplicadas hacia la viga metálica. Dicho de otra manera, al realizar el modelo tanto de la losa de concreto como de la viga, las superficies de éstas no están en contacto directo, se encuentran separadas en una distancia que es igual a la mitad del espesor de la losa más la distancia del eje neutro hasta la fibra más externa en la parte superior de la viga. La manera de colocarlas a trabajar como conjunto es unir las empleando elementos conectores entre los dos tipos de elementos. Por esto, se utiliza como elemento de conexión entre la placa y la viga, el elemento Off-Set, que es un elemento rígido, que tiene las mismas características del Beam.

El interrogante a resolver ahora es porqué se escogió este tipo de modelo. La respuesta está en el hecho de que es el modelo más eficiente, dado que es el más sencillo para modelar, requiere menores tiempos de proceso y los resultados muestran una buena precisión⁴.

4. Resultados

Del análisis por elementos finitos de los puentes se determinó el

valor de la fuerza cortante y el momento flector para diferentes condiciones de carga y para diversas opciones de arriostramiento lateral. Estos valores fueron determinados tanto para las vigas intermedias como para las laterales o de borde, con el objeto de poder determinar una posible diferenciación en el comportamiento con respecto a la posición de la viga en la superestructura del puente (Ver Figura 6).

Determinados los valores de la fuerza cortante y el momento flector, se calcularon los valores del factor de rueda para cada condición. Como el factor de rueda es una consecuencia tanto de la fuerza cortante como del momento flector, a su vez cualquier variación de éste representa una variación en la fuerza cortante o en el momento flector.

Como el interés es determinar la incidencia del tipo de arriostramiento lateral sobre el factor de rueda, se calculó la relación entre el factor de rueda hallado para un puente con riostras a $L/2$, $L/3$, $L/4$,

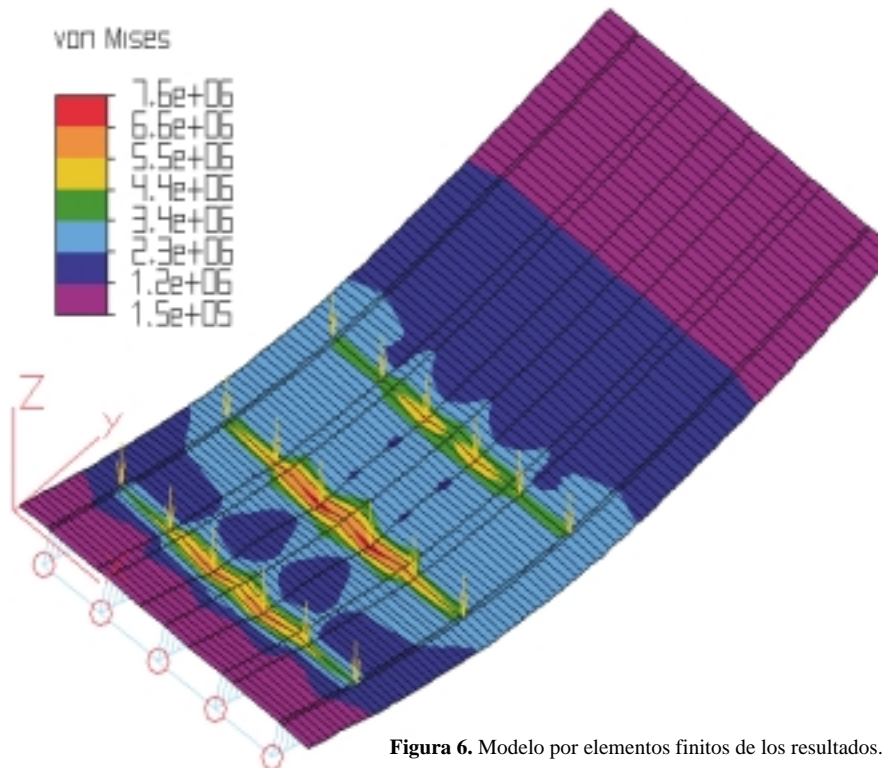


Figura 6. Modelo por elementos finitos de los resultados.

4. Ver Jaramillo, H.E., Areiza, P. «Algunas generalidades sobre la modelación de secciones compuestas usando elementos finitos». Revista *El Hombre y la Máquina*. Edición No. 15. Santiago de Cali, 2000.

y $L/8$ versus el factor de rueda para un puente sin riostras intermedias.

A manera de ejemplo, supongamos que para un puente con una luz de 22 m entre apoyos y una separación entre vigas de 3.6 m, el valor del factor de rueda para momento flector en la viga intermedia es de 1.9314 (sin riostras intermedias) y de 1.8966 (con riostras a $L/3$). Si se hace el cociente entre $1.8966/1.9314=0.9820$. El valor determinado representa la variación del factor de rueda para la condición de riostras a $L/3$ respecto de la condición de sin riostras intermedias.

Para ampliar un poco más lo anterior, se puede decir, si deseo el factor de rueda para una condición de riostras a $L/3$, determino el valor para la condición de sin riostras

intermedias (1.9314) y multiplico este valor por 0.9820, de manera que obtengo el valor para la condición de riostras deseada (1.8966).

Las Figuras 7 y 8 muestran las variaciones del factor de rueda respecto de una condición sin riostras intermedias, determinado para momento flector, tanto para la viga intermedia como para la viga de borde para diferentes modelos de puentes; con diferentes opciones de arriostramiento utilizado. De igual manera en las Figuras 9 y 10 se presentan las curvas que muestran la variación del factor de rueda calculado para la fuerza cortante, para las vigas intermedias y de borde.

De las Figuras anteriores, el valor del factor de rueda para momento flector presenta una variación

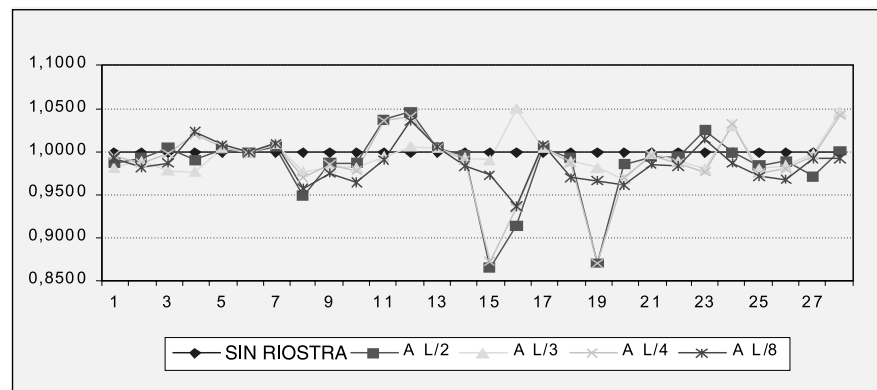


Figura 7. Variación del factor de rueda para momento flector (viga intermedia) respecto de una condición sin riostras intermedias.

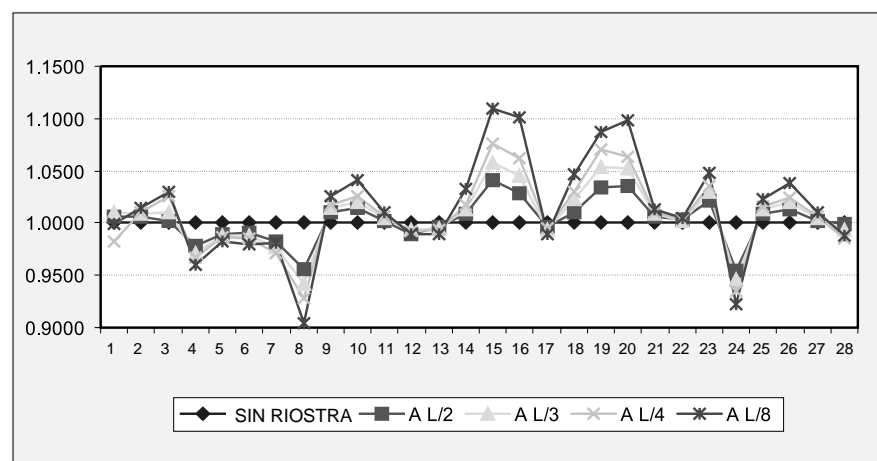


Figura 8. Variación del factor de rueda para momento flector (viga lateral) respecto de una condición sin riostras intermedias.

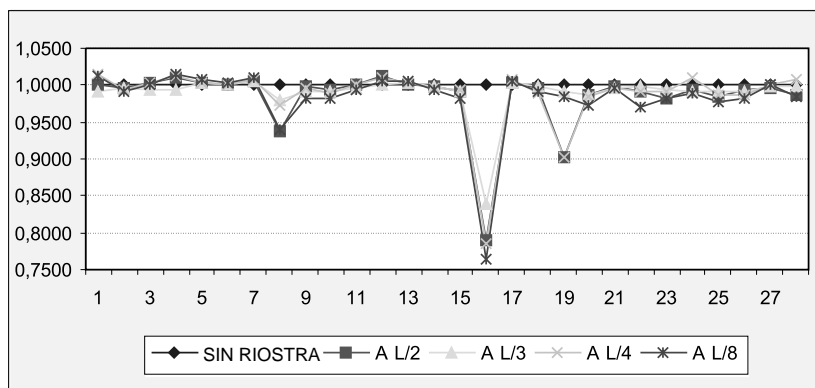


Figura 9. Variación del factor de rueda para fuerza cortante (viga intermedia) respecto de una condición sin riostras intermedias.

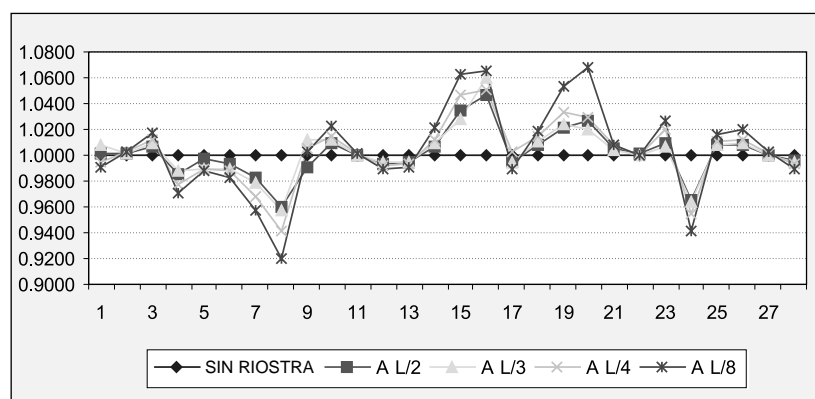


Figura 10. Variación del factor de rueda para fuerza cortante (viga lateral) respecto de una condición sin riostras intermedias.

máxima entre +5% y -14% en la viga intermedia, y de +10% y -11% en la viga de borde. Para el factor de rueda para fuerza cortante la variación es de +3% y -24% para la viga intermedia y de +7% y -8% para la viga lateral.

Obtenido el comportamiento del factor de rueda para las diferentes condiciones, se realizó un promedio general sobre todos los datos, los cuales se resumen en la Tabla 1. Lo anterior con el objeto de poder obtener una tendencia del comportamiento del factor de rueda para las diferentes condiciones de arriostamiento. Estos datos se encuentran graficados en las Figuras 11 y 12.

En las Figuras 11 y 12 se puede observar claramente una tendencia

definida, en la medida que aumenta la cantidad de arriostamiento, el efecto tanto de fuerza cortante como de momento flector aumenta para la viga lateral y disminuye para la viga intermedia. Esto se puede explicar con el hecho de que en la medida que aumenta el arriostamiento, el sistema se rigidiza y el efecto de las cargas tiende a repartirse por igual, tanto en las vigas de borde como en las vigas laterales.

5. Conclusiones

El efecto que producen las riostras intermedias sobre el factor de rueda en el caso del momento flector es en promedio del orden de $\pm 1.5\%$ (Figura 11) y de la fuerza cortante de +0.5% y -1.75% (Figura 12), respecto de un puente sólo con riostras extremas.

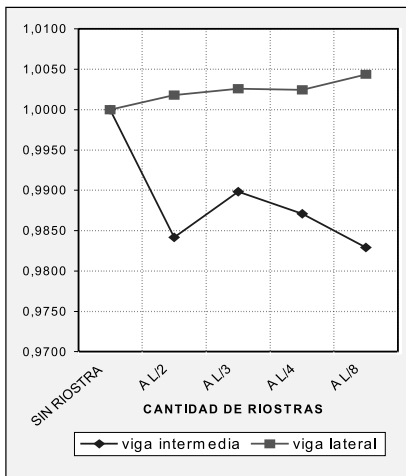


Figura 11. Efecto promedio de las riostras intermedias sobre el cambio en el valor del factor de rueda para momento flector

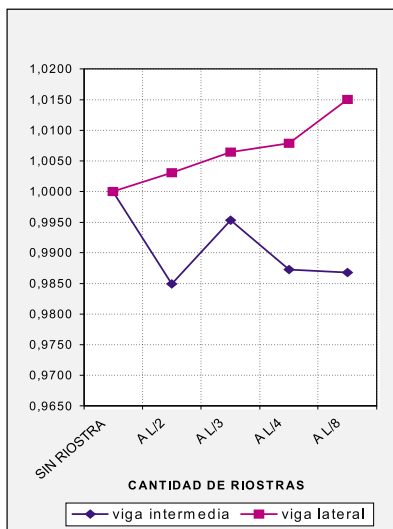


Figura 12. Efecto promedio de las riostras intermedias sobre el cambio en el valor del factor de rueda para fuerza cortante.

	Momento flector		Fuerza cortante	
	viga intermedia	viga lateral	viga intermedia	viga lateral
SIN RIOSTRA	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
A L/2	0,9849	1,0030	0,9842	1,0018
A L/3	0,9953	1,0064	0,9898	1,0025
A L/4	0,9872	1,0078	0,9871	1,0024
A L/8	0,9868	1,0150	0,9829	1,0044

Tabla 1. Razón entre promedios de los datos del factor de rueda para puentes con riostras intermedias, y el factor de rueda hallado para puentes sólo con riostras extremas.

Para efectos del cálculo del momento flector y de la fuerza cortante o en su defecto el factor de rueda, consideramos que no se debe tener en cuenta la cantidad de arriostamiento lateral colocado sobre el puente, ya que éste posee poca influencia sobre el factor de rueda y en su defecto se puede despreciar. Otra opción es diseñar con base en el factor de rueda calculado para la condición más desfavorable de arriostamiento lateral.

El aumento de la cantidad de arriostamiento en el sistema, influye muy poco en el factor de rueda, pero sí permite que la distribución de los efectos de las cargas verticales tenga una mejor forma sobre todas las vigas. Además, minimiza los efectos torsionales producidos por cargas laterales. ⚙

6. Bibliografía

- Baidar, B., Leslie G. J. Bridge analysis simplified. McGraw Hill Book Company. Singapore. 1985.
- Gaylord, E. Gaylord, C. Design of steel structures. McGraw Hill. Tokyo, 1957.
- Ministerio de Transporte. Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá 1995.
- Nilson, A.H., Winter, G. Diseño de estructuras de concreto. 11ª edición, McGraw Hill. México, 1994
- Spyrakos C.C., Raftoyiannis, J. Finite element analysis, in engineering practice. Algor inc. Publishing Division. Pittsburg, P.A. 1997.