

UNA PROPUESTA PARA LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE RUEDA EN PUENTES VEHICLARES DE SECCION COMPUESTA, A PARTIR DEL USO DE LA TECNICA DE ELEMENTOS FINITOS

Héctor E. Jaramillo Suárez^{*}, Gilberto Areiza Palma[†]

^{*} Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería de Materiales
Universidad Autónoma de Occidente, UAO
Calle 25 # 115-85 Km. 2 vía Cali - Jamundi, Colombia
e-mail: hejaramillo@cuao.edu.co, web page: <http://www.cuao.edu.co>

[†] Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle, UV
Calle 13 # 100-00, Cali, Colombia
e-mail: gareiza@mafalda.univalle.edu.co

Palabras claves: Factor de rueda, elementos finitos, AASHTO, puentes de sección compuesta, momento flector, fuerza cortante.

Resumen. *En este trabajo se presenta los resultados obtenidos de analizar alrededor de noventa puentes de sección compuesta, simplemente apoyados mediante la técnica de Elementos Finitos, con el objeto de poder encontrar una relación entre las diferentes variables del diseño, como la inercia de las vigas, espesor de la losa de concreto, la separación entre vigas, cantidad y tipo de arriostramiento, y la distancia entre apoyos, y su efecto en la determinación del factor de rueda. Además se determinó el tipo de modelo por Elementos Finitos más adecuado para el modelado de los puentes, teniendo en cuenta como criterios de selección, el tiempo de proceso invertido en el análisis y la precisión de los resultados. De los datos obtenidos en los análisis, se proponen cuatro formulas para la determinación del factor de rueda y, se comparan con los valores obtenidos por el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes. Se concluye finalmente que los valores obtenidos a partir de los datos de momento flector, son los que más se acercan a los valores del código, mientras que en los valores obtenidos para fuerza cortante hay una diferencia sustancial. También se encontró que los valores obtenidos por las formulas propuestas y objeto de esta investigación, se acercan más a los valores experimentales que los valores del factor de rueda determinados a partir del código.*

1. INTRODUCCIÓN

Una carga puntual móvil (carga de rueda) colocada sobre la superestructura de un puente afecta todos los elementos del sistema estructural con lo cual es necesario realizar análisis tridimensionales para determinar los esfuerzos y las deformaciones. Sin embargo, este tipo de análisis es dispendioso y consume mucho tiempo si no se dispone de ayudas computacionales. Por lo anterior el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes permite “simplificar” el problema reduciéndolo a un análisis bidimensional en el cual las cargas actuantes sobre el elemento estructural son afectadas por un factor de “corrección” (factor de rueda = FR) cuyo objetivo es tener en cuenta la condición real tridimensional.

En el diseño de puentes formados por losa de concreto reforzado apoyada en vigas longitudinales, frecuentemente 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: efectos torsionales, flexión biaxial y esfuerzos cortantes producidos en planos diferentes al de carga.

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

2. FACTOR DE RUEDA

El “factor de rueda ” se define como la relación entre el efecto interno (fuerza cortante o momento flector) en una sección longitudinal 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, correspondiente a medio (1/2) camión de diseño:

$$F.R. = \frac{\text{Momento flector real}}{\text{Momento flector calculado para una carga de medio camión}} \quad (1)$$

En el pasado se han publicado resultados de estudios analíticos realizados tendientes a calibrar los factores de rueda recomendados por la Norma AASHTO en puentes simplemente apoyados de sección compuesta como el realizado por Tarhini (1992)³ quien propone la ecuación 2 para determinar el factor de rueda en vigas interiores, donde L y S son respectivamente la distancia entre apoyos y la separación entre vigas, ambos expresados en pies.

$$FR = 0.00013L^2 - 0.021L + 1.25\sqrt{S} - \frac{S+7}{10} \quad (2)$$

Otros trabajos publicados relacionados con el tema son el de Bishara (1993)⁴ y el de Kostem y De Castro (1977)⁵ quienes concluyen que el factor de rueda, en puentes de vigas longitudinales de acero y tablero de losa de concreto, es insensible a la presencia de riostras transversales. Adicionalmente, Areiza y Jaramillo (1999)⁶ publicaron los resultados de un estudio analítico de calibración del factor de rueda, realizado usando la técnica de elementos finitos, para un puente de tablero de concreto apoyado en vigas longitudinales de acero simplemente apoyadas de 22 metros (72.16 pies) de luz y separadas 3 metros (9.84 pies). Como conclusiones de este trabajo se puede citar: “*Se presentan notables diferencias de los valores de los factores de rueda obtenidos del análisis tridimensional y los de la Norma AIS-200-95*”, “*El arriostramiento no influye en los valores del factor de rueda, conclusión que concuerda con los resultados de Kostem y De Castro (1977)*”

De otro lado se encontró que Zokaie (1991)⁷ introduce un nuevo factor de rueda como resultado de una parte del proyecto NCHRP 12-26⁸. Esta nueva fórmula tiene en cuenta parámetros como la luz entre apoyos, espacio entre vigas y propiedades de la sección transversal. En el reporte final del proyecto NCHRP 12-26 se presenta una nueva fórmula para el factor de rueda, para momento flector en puentes de viga metálica, ecuación (3):

$$g = 0.15 + \left(\frac{S}{3}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left[\frac{n(I + Ae^2)}{12Lt^3}\right]^{0.1} \quad (3)$$

En la ecuación (3), S = espacio entre vigas (3.5 pies <S<16 pies); L = Longitud entre apoyos (20 pies <L<200 pies); n = relación modular entre la viga y el material de la losa; I = momento de inercia de la viga (pulg.⁴); A = sección transversal de la viga (pulg.²); e = distancia entre el eje neutro de la viga y la superficie intermedia de la losa (pulg.); y t = espesor de la losa de concreto (pulg.). La ecuación (3) es recomendada para puentes vehiculares con al menos dos líneas de carga, con sección transversal compuesta o no compuesta, simplemente apoyado o continuo. Sin embargo esta ecuación se recomienda para puentes con al menos cuatro vigas.

En trabajos reportados por Mabsout (1998)⁹, (2002)¹⁰ sobre el factor de rueda en puentes de luces continuas, en el cual realiza una comparación entre el factor de rueda hallado por un análisis por elementos finitos, con el determinado por la norma AASHTO (1996), obtiene como conclusión, que el factor de rueda calculado como S/5.5 es conservativo respecto de los determinados mediante la técnica de elementos finitos, y que los resultados han demostrado una relación no lineal entre el espaciamiento de las vigas y el cálculo del factor de rueda.

En el diseño de puentes generalmente se encuentran algunas variables que influyen en este y a su vez pueden llegar a influir de alguna manera sobre el factor de rueda. En relación al efecto de las variables en el factor de rueda, se encuentra un estudio realizado por Zokaie (1991)¹¹, en el cual se plantea que el parámetro más significativo que influye sobre el factor de rueda es la separación entre vigas (S), seguido de la longitud entre apoyos (L). La rigidez de la viga y el espesor de la losa de concreto son secundarios en su determinación. En esta misma dirección Burdette y Goodpasture (1988; tabla 4, p12)¹² reportaron en un estudio para identificar y evaluar aspectos en el comportamiento de puentes que normalmente no son

considerados, que la continuidad del puente y las riostras tipo cruz son factores secundarios en la evaluación del factor de rueda.

3. MODELADO DE LA SUPERESTRUCTURA Y CONDICIONES DE CARGA

La geometría de la superestructura de un puente puede ser idealizada para su análisis de diferentes formas. Es en esta fase de idealización del modelo, es en donde se pueden encontrar grandes diferencias entre un modelo y otro. Hays (1986)¹³ idealizó la superestructura usando elementos Plate y elemento Beam, con el centroide de la viga y la losa de concreto coincidiendo. Imbsen y Nutt (1978)¹⁴ colocaron elementos rígidos conectando la losa de concreto idealizada como elemento tipo Plate y la viga como elemento Beam, con el objeto de cubrir la diferencia entre los ejes centroidales de los dos elementos. Sin embargo, Bishara (1984)¹⁵, modeló la superestructura del puente utilizando elementos tipo Plate tanto para la viga de acero como para la losa de concreto y conectó estos dos elementos usando conectores rígidos entre el patín superior de la viga y la losa. En 1992 en un trabajo de Kassim¹⁶ se modeló la losa de concreto con elementos tipo Brick y la viga metálica con elemento tipo Plate, realizando la conexión entre estos usando elementos conectores rígidos, por la diferencia entre los centros de gravedad de los dos elementos.

La carga viva para puentes de carreteras está conformada por camiones estándar o líneas de carga que son equivalentes a trenes de camiones. El Código Colombiano de Diseño sísmico de Puentes¹ define dos clases de carga de carretera: C 40-95 y C 32-95. El camión C 40-95 posee una carga total de 400.000N, repartida en 150.000N sobre el eje trasero e intermedio y 100.000N sobre el eje delantero, siendo el camión de carga C32-95 el 80% de la C 40-95. Para los análisis presentados y posterior determinación del factor de rueda, se seleccionó un camión de carga C-40-95.

4. MODELO POR ELEMENTOS FINITOS

Al consultar las referencias en relación con el modelado de puentes de sección compuesta, no se encontró una homogeneidad al modelar este tipo de estructura, por tanto se optó por evaluar varias alternativas, que representen adecuadamente el comportamiento que se desea estudiar, con el objeto de elegir una alternativa que se ajuste más a los requerimientos de la investigación. Para el modelado de la superestructura del puente se evaluaron cinco alternativas de modelos, los cuales se describen en la tabla 1:

Tabla 1: Diferentes alternativas para el modelado de la superestructura de puentes de sección compuesta.

Modelo	Tipo de elemento usado		
	Viga metálica	Losa de concreto	Adicionales
1	Plate	Brick	Sin conectores
2	Brick	Brick	No Aplica
3	Plate	Plate	Con conectores
4	Beam	Plate	Con conectores
5	Plate	Plate	Sección Equivalente

Para evaluar las cinco alternativas de modelado se selecciono un viga de acero simplemente apoyada con una longitudinal entre apoyos de 10 metros de luz y tablero superior formado por una placa de concreto, con una carga uniformemente distribuida de 25000 N/m². A cada uno de los modelos se les realizo un análisis estático usando el software Algor²¹, obteniendo como resultados tanto las fuerzas internas (fuerzas cortantes y momentos flectores) como las deflexiones; estos valores fueron comparados con los valores teóricos, cuyo análisis se encuentra consignado en la tabla 2.

Tabla 2: Evaluación de las diferentes alternativas para el modelado de la superestructura de puentes de sección compuesta.

Descripción	Unid.	Val. Teórico	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
No de elementos			160	190	215	61	120
No de ecuaciones			978	1158	1143	387	813
Tiempo de proceso	[s]		10.9	13.6	11.9	6.6	9.5
Esfuerzo en la fibra superior	[MPa]	-1.525	-1.527	-1.528	-1.531	-1.487	-1.793
% Error			0.1	0.2	0.3	2.5	17.5
Esfuerzo en la fibra inferior	[MPa]	18.07	17.84	18.10	17.79	18.17	17.44
% Error			1.2	0.1	1.5	0.5	3.4
Deflexión máxima	[mm]	13.58	15.54	15.46	15.51	13.57	14.92
% Error			14.4	13.8	14.2	0.058	9.8

Con base en los resultados obtenidos para los diferentes tipos de modelos analizados y su comparación con los valores teóricos, se encontró: a. respecto a la precisión de los resultados de esfuerzos, el mayor y menor “porcentaje de error” corresponde a los modelo 5 y 2 respectivamente; b. respecto a las deformaciones máximas obtenidas la mayor precisión corresponde al modelo 4; y c. el menor tiempo de proceso y por lo tanto la mayor eficiencia de solución corresponde igualmente al modelo 4. Por tanto para el análisis tridimensional de los puentes se opto por utilizar el modelo 4, que utiliza elementos tipo *Plate* o placa para la losa de concreto, elemento tipo *Beam* para las vigas metálicas y debido a la diferencias de posición de los elementos *Plate* con respecto a los tipo *Beam*, se utilizaron elementos conectores off-set. Si se desea ampliar al respecto de la selección del tipo de modelo usado se recomienda consultar un trabajo anterior¹⁷ publicado por los autores. En la figura 1 se muestra el esquema del modelo utilizado por elementos finitos y en la figura 2 uno de los modelos tridimensionales usados en los análisis.

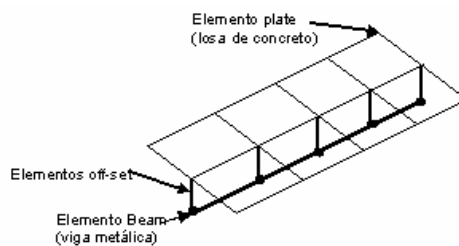


Figura 1: Modelo utilizado en el análisis

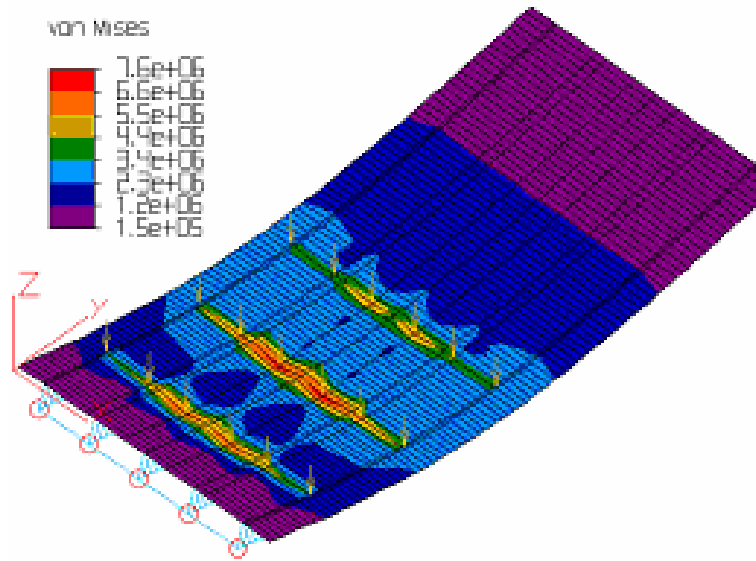


Figura 2: Modelo tridimensional por elementos finitos utilizado en el análisis de los puentes

5. MODELO PROPUESTO PAR EL CÁLCULO DEL FACTOR DE RUEDA

En este punto se presenta una formulación para el cálculo del factor de rueda, teniendo en cuenta consideraciones como:

- El arriostramiento lateral de cualquier tipo^{12,18,16,19} no influye considerablemente en los valores del factor de rueda, como para ser considerado en una formulación.
- Las ecuaciones que se obtengan, no deben de considerar variables que se dimensionen a partir del factor de rueda como el momento de inercia de la viga y el espesor de la losa de concreto. Se debe hacer a partir de variables que sean los primeros datos de entrada o de diseño
- La formulación debe estar en función de las variables con mayor influencia sobre el factor de rueda y no de todas las variables consideradas en este estudio, con el objeto de poder obtener una formulación simple, pero que represente adecuadamente su comportamiento, sin perder rigor en su determinación.
- El factor de rueda calculado a partir de los valores de la fuerza cortante difieren de los valores determinados por el momento flector, y más aún, los valores para la viga intermedia y de borde presentan diferencias por lo que esto debe ser considerado por separado en la formulación.
- El factor de rueda no es constante a lo largo de la longitud de la viga. Para este caso se presentará unas curvas de ajuste al cálculo del factor de rueda dependiendo de la posición longitudinal donde se desea calcular.

El efecto de cada una de las variables consideradas sobre el valor del factor de rueda se pondero calculando un factor de incidencia de la variable de análisis sobre el factor de rueda, ver ecuación (4). Como resultado se pudo clasificar las variables de mayor a menor incidencia de estas sobre el factor de rueda, lo cual se presenta en la figura 3.

$$FI = \frac{\text{Máxima variación porcentual del factor de rueda}}{\text{Máxima variación porcentual de la variable de análisis}} \quad (4)$$

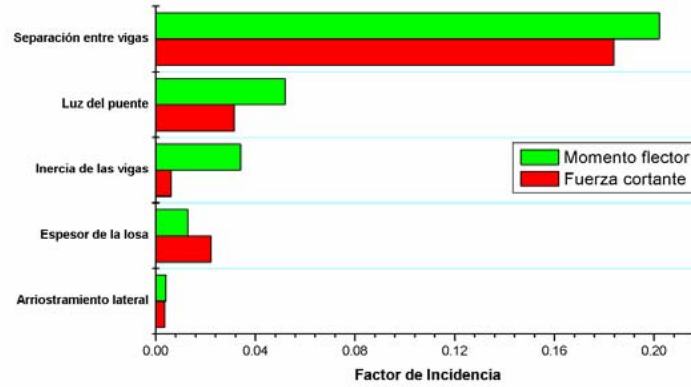


Figura 3: Incidencia de las variables sobre el factor de rueda

Con el análisis anterior se determinó que las ecuaciones que se determinen para el cálculo del factor de rueda deben estar en función de variables como la separación entre vigas (S) y la luz entre apoyos (L), debido a que son las variables que presentan la mayor incidencia sobre este, también se debía presentar una formulación por separado para determinar los efectos de la fuerza cortante y para el momento flector.

5.1. Factor de Rueda para fuerza cortante

A partir de los datos de fuerza cortante determinados mediante el análisis por elementos finitos se hallaron las ecuaciones 5 para el cálculo del factor de rueda en la viga intermedia, y, la ecuación 6 para la viga lateral o de borde. Ambos casos cuando se desean calcular los efectos de fuerza cortante.

$$FR = (1.17685 - 0.00583L)S^{(0.67652-0.000605246L)} \quad (5)$$

$$FR = (1.44678 - 0.0089L)S^{(0.50265-0.0023L)} \quad (6)$$

5.2. Factor de Rueda para momento flector

A partir de los datos de momento flector determinados mediante el análisis por elementos finitos se hallaron las ecuaciones 7 para el cálculo del factor de rueda para la viga intermedia, y, la ecuación 8 para la viga lateral o de borde. Ambos casos cuando se desean calcular los efectos de momento flector.

$$FR = (0.9657 - 0.00921L)S^{(0.69897-0.00292L)} \quad (7)$$

$$FR = (1.29713 - 0.00818L)S^{(0.4171-0.000184918L)} \quad (8)$$

5.3. Ajuste del Factor de Rueda para una sección longitudinal cualquiera

En los análisis se observó que el factor de rueda dependía de la posición longitudinal de la sección o corte donde se calcula, por esto se determinó un comportamiento que permita ajustar los valores del factor de rueda calculados por las ecuaciones 5 a 8 para cuando se desean los efectos de fuerza cortante y momento flector en una sección longitudinal cualquiera.

Las figuras 4 y 5 representan el comportamiento de un Factor que depende de la sección donde se desea. Es decir el factor de rueda determinado por las ecuaciones 5 a 8 debe ser multiplicado por el factor multiplicador que se determina de las figuras 4 y 5, dependiendo de la sección longitudinal donde se desea y de si los efectos a calcular son los de la fuerza cortante o del momento flector.

Así por ejemplo el factor de rueda para la viga intermedia calculado a partir del momento flector para una sección a $3L/8$ del apoyo izquierdo, de un puente con una luz entre apoyos (L) de 23 m y una separación entre vigas (S) de 3.0 m, se tiene que es:

Usando la ecuación 7:

$$FR = (0.9657 - 0.00921L)S^{(0.69897 - 0.00292L)} \quad (9)$$

$$FR = (0.9657 - 0.00921 \times 23)(3)^{(0.69897 - 0.00292 \times 23)} \quad (10)$$

$$FR = 1.5092 \quad (11)$$

De la figura 5 se obtiene un factor multiplicador, que para una sección a $3L/8$ es:

$$FactorMultiplificador \cong 0.89 \quad (12)$$

Por tanto el valor final del factor de rueda para esta sección será de:

$$FR_{3L/4} = FactorMultiplificador \times FR \quad (13)$$

$$FR_{3L/4} = 0.89 \times 1.5092 = 1.3432 \quad (14)$$

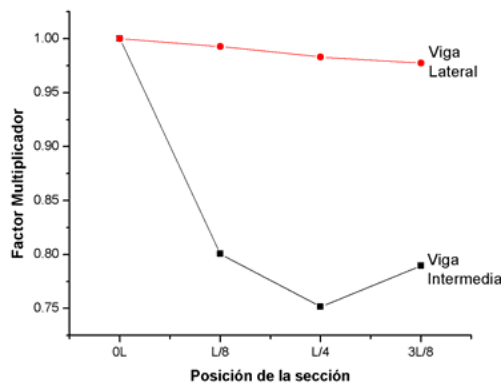


Figura 4: Curvas de ajuste del FR a la sección deseada, calculado para los efectos de la fuerza cortante

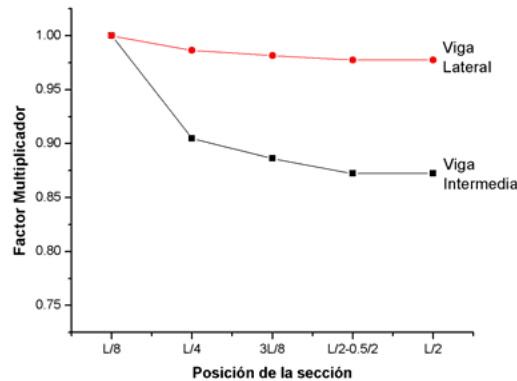


Figura 5: Curvas de ajuste del FR a la sección deseada, calculado para los efectos de momento flector

6. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LA SOLUCIÓN PROPUESTA Y LAS REFERENCIAS ENCONTRADAS

A continuación se presenta una comparación entre los valores obtenidos mediante el análisis por elementos finitos, que dieron como resultados las ecuaciones 5 a 8 y aquellas formulaciones para el cálculo del factor de rueda encontradas en las referencias consultadas, como lo son el código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (Norma AIS-200-95)¹, la formulación hecha por Tarhini⁹ y la formulación presentada por Zokaie¹¹. También se realiza una comparación entre la formulación propuesta y valores experimentales obtenidos por Mabsout (1997)²⁰.

6.1. Comparación entre la solución propuesta y los valores del Código¹

El Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes define que para puentes de concreto sobre vigas metálicas con dos o más calzadas, el factor de rueda se calcula para las vigas interiores: para valores de separación entre vigas (S) menores e iguales a 4.0 m el factor de rueda se calcula como $FR = \frac{S}{1.7}$, y para las vigas exteriores: a. Si $S \leq 1.8m$ el $FR = \frac{S}{1.7}$ y, b. si

$$S > 1.8m \text{ el } FR = \frac{S}{12 + 0.25S}$$

Como el factor de rueda calculado por el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes no es función de la luz entre apoyos, se tomará para efectos de poder comparar ambos formulaciones un puente simplemente apoyado con una luz entre apoyos de 20m, el cual se puede considerar un puente con una luz entre apoyos intermedia. Para este puente se grafican los valores del factor de rueda obtenidos a partir de la formulación presentada por el código y de la formulación propuesta (ecuaciones 5 a 8) para diferentes separaciones entre vigas.

Como el Código define de forma diferente el cálculo del factor de rueda para la viga intermedia y la lateral o de borde, en las figuras 6 y 7 se grafican los valores obtenidos a partir del código y los obtenidos a partir de la formulación propuesta tanto para las vigas laterales o de borde (figura 6), como para las vigas interiores (figura 7). Así como también se hace la

diferencia entre aquellos valores obtenidos a partir de los efectos de fuerza cortante como de momento flector.

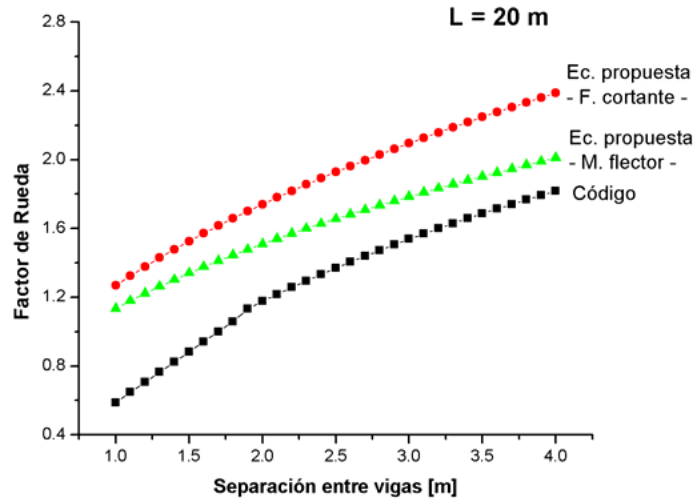


Figura 6: Comparación entre los datos para el FR obtenidos mediante el análisis por elementos finitos (FEA²¹) vs. los valores obtenidos por el Código¹, para las vigas exteriores

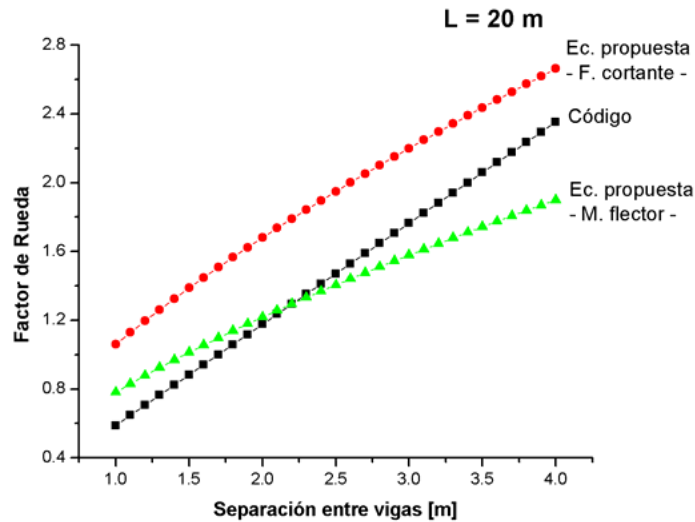


Figura 7: Comparación entre los datos para el FR obtenidos mediante el análisis por elementos finitos (FEA²¹) vs los valores obtenidos por el Código para las vigas interiores

En las figuras 8 y 9 se comparan los valores del factor de rueda para momento flector, determinados por el análisis por elementos finitos, para luces entre apoyos de 10m, 15m, 20m y 25m, respecto de los determinados por el código. En la figura 8 se grafican los valores del factor de rueda en la viga intermedia y en la figura 9 para la viga lateral o de borde.

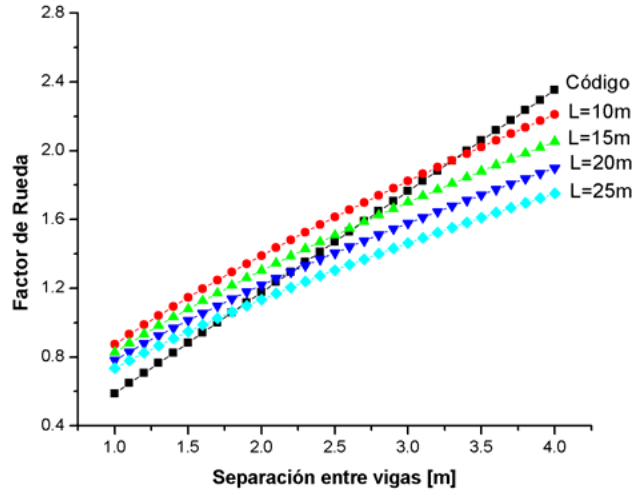


Figura 8: Comparación entre los datos del FR determinados por el Código versus los valores determinados por el análisis por Elementos Finitos (FEA) para diferentes luces entre apoyos, en la viga intermedia.

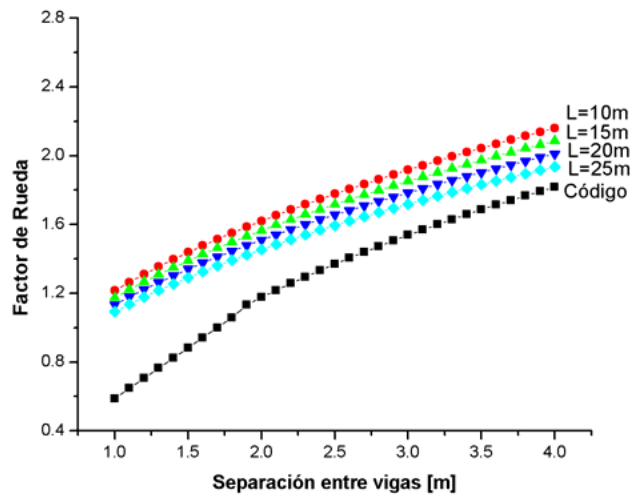


Figura 9: FR determinado por el Código versus los valores determinados por el análisis por Elementos Finitos para diferentes luces entre apoyos, en la viga exterior.

6.2. Comparación entre la solución propuesta y las referencias encontradas

Se comparan los valores obtenidos mediante la formulación propuesta y los valores del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, la formulación presentada por Tarhini⁹ y Zokaie¹¹. Como la ecuación utilizada por el código, solo depende del valor del espaciamiento entre vigas, se tomo un modelo de puente con todas sus variables (I , e , t , L) completamente definidas, al cual se le varía el espaciamiento entre vigas. La comparación solo se realiza con

la formulación presentada para la viga interior, ya que las formulaciones de Tarhini y Zokaie, no hacen una diferencia entre los valores obtenidos para la viga interior y para la viga exterior.

Para las comparaciones se tomo un puente con una luz entre apoyos de 20m, con una viga metálica W36x170, una área de 50pulg², momento de inercia 10500 pulg⁴, espesor de losa de 7.24 pulg., una distancia entre el centroide de la viga metálica y la losa de concreto de 21.7 pulg. Las unidades son presentadas en el sistema ingles debido a que las formulas presentadas por Tarhini y Zokaie lo exigen en estas, sin embargo se realizo la conversión, para presentarlas en la figura 10 en el sistema internacional.

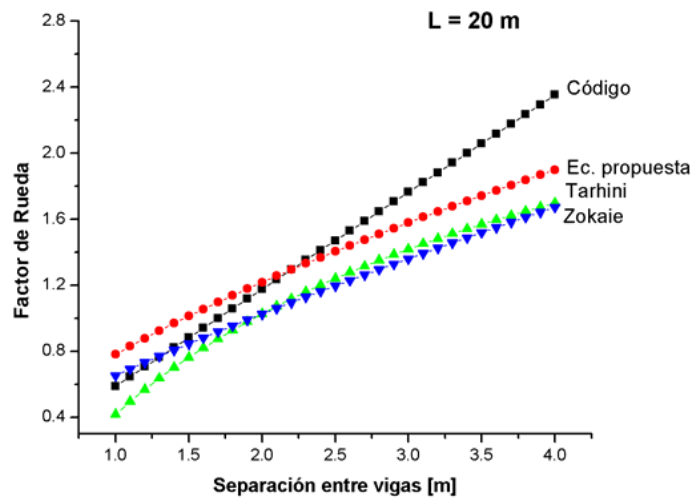


Figura 10: Modelo propuesto por el FR versus el obtenido por el código, la formulación de Tarhini y Zokaie

En la figura 10 se compraran los valores del factor de rueda determinados con las ecuación propuesta (ecuación 7) con la formulación dada por el Código Colombiano de Diseño sísmico de Puentes¹; la propuesta por Tarhini⁹ (ecuación 2); y la formulación propuesta por Zokaie¹¹ que se calcula a partir de la ecuación 3.

6.3. Comparación entre la solución propuesta y los valores experimentales obtenidos en las referencias

Debido a la imposibilidad de realizar pruebas de campo por los costos tan elevados que esto implicaría, se opto por comparar los datos obtenidos mediante el análisis por elementos finitos (FEA) con valores experimentales obtenidos en las referencias consultadas.

En algunas evaluaciones experimentales hechas por Mabsout (1997)²⁰, basada en los trabajos anteriores de Hindman y Vandegrift (1945)²², Linger (1963)²³, Baldwin (1965)²⁴ y Burdette (1971)²⁵, con respecto al factor de rueda son comparados con los valores obtenidos a partir de la formulación propuesta para el cálculo del factor de rueda para momento flector sobre la viga intermedia (ecuación 7).

Tabla 3: Comparación entre los valores experimentales y los determinados a partir de la formulación del código y de la formulación propuesta.

PUENTE	L		S		FACTOR DE RUEDA		
	pies	m	pies	m	Exp.	Cod.	FEA
Bridge type A (Hindman 1945)	88	26.8	6.93	2.1	1.05	1.24	1.14
Clive Road (Linger 1963)	68.25	20.8	9.5	2.9	1.40	1.71	1.53
	41.25	12.6	9.5	2.9	1.58	1.71	1.72
Burris Fork (Baldwin 1965)	52.5	16.0	9.0	2.7	1.40	1.59	1.56
Burris Fork (Baldwin 1965)	60	18.3	6.67	2.0	1.14	1.18	1.25
Tennessee Route 130	90	27.5	8.34	2.5	1.20	1.47	1.26
Mansford Road (Burdette 1971)	60	18.3	7.34	2.2	1.16	1.29	1.33
Mahmoud (1987) ¹¹	60	18.3	7.5	2.3	1.19	1.35	1.36

En la tabla 3, en la gran columna del factor de rueda, “exp.”, corresponde a los valores experimentales obtenidos de las referencias; “Cod.”, corresponde a los valores determinados por el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes; y “FEA.”, corresponde a los valores obtenidos a partir de la formula propuesta (ecuación 7).

7. CONCLUSIONES

A partir de todos los análisis realizados se encontraron varias diferencias en relación con el comportamiento del factor de rueda frente a las formulaciones encontradas en el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, como también de la norma AASHTO de 1944, y que deben ser tenidas en cuenta en cualquier tipo de formulación que pretenda reflejar el comportamiento de factor de rueda.

Mientras el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes y la norma AASHTO de 1944, considera que la única variable que incide sobre el factor de rueda es la separación entre vigas, se pudo determinar que hay otras variables como la inercia de las vigas, el espesor de losa de concreto, luz del puente y el arriostramiento lateral que inciden sobre este, aunque en diferente proporción. En orden de mayor a menor incidencia de las variables sobre el factor de rueda se tiene: separación entre vigas, luz del puente, inercia de las vigas, espesor de la losa de concreto y arriostramiento lateral; por tanto si se desea una mejor formulación para el calculo del factor de rueda, se recomienda que dicha formulación debe incluir al menos las dos primeras variables con el objeto de poder obtener mejores resultados.

Otros dos aspecto y que tampoco son tenidos en cuenta en el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes y en la norma AASHTO, son que el factor de rueda no depende de la posición de la viga en la superestructura del puente, y también que no diferencian el calculo del factor de rueda cuando se desea determinar los efectos de fuerza cortante y momento flector. En relación a lo anterior se encontró que los valores del factor de rueda son mayores cuando se analiza una viga interior y también cuando se desean los efectos de fuerza cortante, lo cual indico que se debía presentar una formulación diferenciando estos dos condiciones. Se encontró que los valores del factor de rueda, para separaciones entre vigas pequeños (inferiores a 2.2m aproximadamente), determinados por el código son bajos comparados con los resultados a partir del análisis por elementos finitos. Sin embargo para separaciones

mayores (superiores 2.2m, aproximadamente) se encuentra que los valores del código son conservativos.

Finalmente y a partir de los datos obtenidos en los análisis por Elementos Finitos, se presentan cuatro ecuaciones en función de dos de las variables que más inciden sobre los valores del factor de rueda. Con estas ecuaciones se pretende que el factor de rueda se calcule de forma separada cuando se desean los valores fuerza cortante y momento flector, como también dependiendo de si la viga metálica es una viga intermedia o una viga de borde. Adicionalmente se proponen unas curvas de ajuste que representan el comportamiento del factor de rueda a lo largo de la longitud de la viga, con el objeto de corregir el factor en función de la posición longitudinal de la sección o el corte, donde se desean calcular los efectos de fuerza cortante y momento flector.

8. REFERENCIAS

- [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.
- [3] Tarhini, K.M. and Frederick G.R. (1992). “Wheel load distribution in I-girder highway bridges”. *Journal Structural Engineering*, ASCE vol. 118, No 5.
- [4] Bishara, A. Liu G., Chuan M. and Nasser, E. A; “Wheel Load Distribution on Simply Supported Skew I-Beam Composite Bridges”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 2, February 1993, pp 399-419.
- [5] Kostem, C. N. and De Castro, E. S., “Effect of Diaphragms on Lateral Load Distribution in Beam-Slab Bridges”, *Transp. Res. Rec.*, Bridge Tests, 1977, pp 6-9.
- [6] Areiza, G. y Jaramillo, H. E, “Calibración de Factores de Rueda en Puentes de Viga Metálica y Losa de Concreto”, *Memorias XIII Jornadas Estructurales de la Ingeniería Colombiana*, Bogotá, Septiembre 30 y Octubre 1 y 2 de 1999.
- [7] Zokaie, T., Osterkamp, T. A., and Imbsem, R.A. (1991) “Distribution of wheel loads on highway bridges.”. Rep. 12-26/1, Nat. Cooperative Hwy. Res. Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [8] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1996) *Standard specifications for highway bridges*, 16th Ed., Washington, D. C.
- [9] Mabsout M. E., Tarhini K. M., Frederick G. R. and Tayar C. “Effect of continuity on wheel load distribution in steel girder bridges”. *Journal of Bridge Engineering*. Pag. 103-110. 1998.
- [10] Mabsout M. E., Naddaf Y., Tarhini K. M., and Frederick G. R.. “Load reduction in steel girder bridges”. *Practice Periodical of Structural Design and Construction* . Pag. 37-43. 2002.

- [11] Zokaie, T., Osterkamp, T.A. and Imbsen, R.A. (1991). "Distribution of wheel loads on highway bridges". Rep. 12-26/1, Mat. Cooperative Hwy. Res. Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [12] Burdette, E. G., and Goodpasture, D. W. (1988). "Correlation of bridge load capacity estimates with test data". Rep. No 306, Nat. Cooperative Hwy. Res. Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [13] Hays, C. O., Jr. Sessions L. M., and Berry, A. J. (1986). "Further studies on lateral load distribution using finite element methods". Transp. Res. Rec., (1072), Transportation Research Board, Washington, D. C., 6-14.
- [14] Imbsen, R. A., and Nutt, R. V. (1978), "Load distribution study on highway bridges using STRUDL F.E.A capabilities." Conf. on Computing in Civil Engineering, ASCE, New York, N. Y.
- [15] Bishara, A. G. (1984). "Analysis for design of bearing at skew bridge support." Report ODOT 14346, Ohio Department of Transportation, Columbus, Ohio.
- [16] Kassim M., Tarhini, and Frederick G.R. (1992) Wheel load distribution in I-girder highway bridges". Journal Structural Engineering, ASCE vol. 118, No 5.
- [17] Jaramillo H. E., Areiza G. "Algunas generalidades sobre el modelado de secciones compuestas usando elementos finitos", Revista Scientia et Technica, Edición No 13 junio de 2000. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [18] Azizinamini, A., Kathol, S., and Beacham, M. W. (1995). "Influence of cross frames on load resisting capacity of steel girder bridges". Engineering Journal. 33(3), 107-116
- [19] Jaramillo, H. E. Areiza, P. (2002). "Efecto de las riostras sobre el Factor de Rueda en puentes de sección compuesta". El Hombre y la Máquina, CUAO, 18: 34-40
- [20] Mabsout M. E., Tarhini K. M., Frederick G. R. and Tayar C. "Finite – Element Analysis of Steel Girder Highway Bridges". Journal of Bridge Engineering. Pag. 86. 1997.
- [21] Algor software, Linear static stress. Version 12.22 Win 27- 27 September 2002.
- [22] Hindman, W. S. and Vandegrift, L. E: (1945). "Load distribution over continuous deck type bridge floor systems" Bull 122, Engrg. Experiment Station, Ohio State Univ., Columbus, ohio.
- [23] Linger, D.A., and Hulsbos, C. L. (1963). "Dynamic load distribution in continuous I-beam highway bridges". Hwy. Res. Board Rec., 34,47-69.
- [24] Balwin, J.W. (1965). "Field test of a three-span continuous highway bridges". Hwy. Res. Board Rec., 76,140-167.
- [25] Burdette, E.G., and Goodpasture, D. W. (1971). "Full-scale bridge testing: an evaluation of bridge design criteria". University of Tennessee at Knoxville, Knoxville, Tenn.