

Incidencia de la norma AASHTO LRFD bridge design specifications en el análisis y diseño de tableros de puentes de concreto reforzado

Impact of AASHTO LRFD bridge design specifications on analysis and design of reinforced concrete bridge decks

Pinto, Arnaldo^{1*} y Torres, Rafael¹

¹Departamento de Estructuras. Escuela de Ingeniería Civil,
Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

*arnaldopinto@ula.ve

Resumen

A lo largo de los años en nuestro país se ha venido empleando para el diseño de la mayoría de los puentes la norma Standard Specifications for Highway Bridges de la American Association of State Highway and Transportation Officials (A.A.S.H.T.O.), esto debido a la inexistencia de una norma para el diseño de puentes en Venezuela. A partir del año 2007 la norma Standard Specifications for Highway Bridges deja de tener vigencia en los EEUU, entrando en uso con obligatorio cumplimiento la nueva norma LRFD Bridge Design Specifications. La mayoría de los puentes construidos en Venezuela fueron diseñados con la norma que prescribió. Los cambios incorporados en la nueva norma son sustanciales, desde el punto de vista de las cargas y su forma de aplicación, de los factores de mayoración de cargas y de minoración de resistencias. Con este trabajo de investigación se realiza un estudio comparativo de tableros de puentes diseñados con ambas normas para determinar la incidencia de la nueva norma en el diseño de los tableros de puentes de concreto armado. El estudio se basa en la comparación de tableros de puentes de las siguientes longitudes: 10 m, 18 m, y 30 m. Los tableros de puentes estudiados tienen un ancho de 10.40 m conformados con cuatro vigas.

Palabras clave: Puentes, tableros, concreto armado, AASHTO LRFD, AASHTO Standard.

Abstract

The Standard Specifications for Highway Bridges of the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) has been utilized in Venezuela throughout the years for the design of most bridges, due to the lack of a Venezuelan code. However, this set of norms was replaced in the United States in 2007 with the new mandatory LRFD Bridge Design Specifications. Most bridges built in Venezuela were designed with the now prescribed norm. The changes incorporated in the new design specifications are substantial, from the point of view of loads and as applicable, loads and resistance factors. This research paper presents a comparative study of bridge decks designed with both codes to determine the impact of the new code on the design of reinforced concrete bridge decks. The study was based on a comparison of bridge decks of the following lengths: 10 m, 18 m and 30 m. The bridge decks analyzed have a width 10.40 m formed with four beams.

Key words: Bridges, decks, reinforced concrete, AASHTO LRFD, AASHTO Standard.

1 Introducción

1.1 Definición de Puentes

Los puentes son obras de arte que permite la continui-

dad de una vía ante un obstáculo. La vía puede ser férrea, peatonal o carretera para vehículos automotores y el obstáculo una depresión del terreno, corriente de agua u otra vía. El objetivo fundamental es el de preservar la continuidad del eje vial. Los puentes están conformados por: superestructura e infraestructura.

1.2 Elementos estructurales

La superestructura: o también conocida como tablero del puente, conformada por la calzada, soporta las cargas rodantes transfiriéndolas a los apoyos.

Los materiales más utilizados para construir los tableros de los puentes son: concreto reforzado, concreto presforzado y acero estructural.

La superestructura transmite a la infraestructura su peso propio, las acciones de los vehículos o carga viva que circulan por ella y otras acciones como: viento, sismo, impacto, frenado, etc.

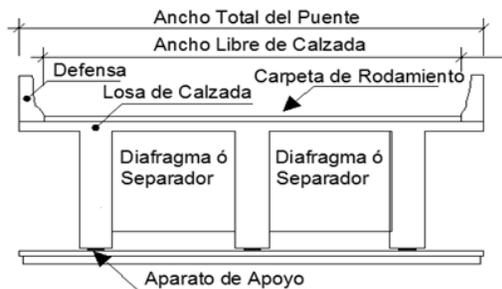


Fig.1. Sección Transversal del Tablero

Los tableros de puentes están conformados por los siguientes elementos (Arnal 2000):

Losa de calzada: normalmente de concreto reforzado.

Vigas principales: de acero o de concreto, de sección constante o variable, tanto en planta como en elevación.

Vigas secundarias o separadores (diafragmas): que actúan como elementos de amarre o arriostramiento de las vigas principales, rigidizándolas. Sirven para redistribuir las cargas, pueden ser de acero o concreto.

Los separadores extremos sirven de soporte transversal al extremo de las vigas longitudinales impidiendo su rotación. Igualmente pueden servir de apoyo a un sistema de gatos hidráulicos que permitirán levantar el puente en caso de ser necesario cambiar los apoyos de las vigas.

Aceras y barandas: Son elementos eminentemente relacionados con el tráfico peatonal sobre el puente. Las barandas modernas se utilizan para desviar la trayectoria del vehículo en el momento de una colisión, proporcionando protección y seguridad a los usuarios.

Carpeta de rodamiento: Se coloca sobre la losa de concreto y sirve como superficie suave de rodamiento.

Juntas de dilatación: Juegan un papel importante en el comportamiento de la superestructura ante los movimientos generados por las dilataciones y deflexiones del tablero, absorbe los movimientos laterales, longitudinales y rotación.

Aparatos de apoyo: Son los sistemas mecánicos que transmiten las cargas de la superestructura a la infraestructura, amortiguan y disipan las vibraciones originadas por el paso de vehículos por el puente.

Drenajes de la calzada: Se asegura por medio de bom-

beo y de la pendiente longitudinal, previenen los efectos adversos que pueden producirse por la acumulación de agua en el tablero. En el caso de rasantes horizontales, se garantiza por medio de drenes o sumideros de diámetro adecuado, normalmente de cuatro pulgadas colocados a no más de tres metros de separación.

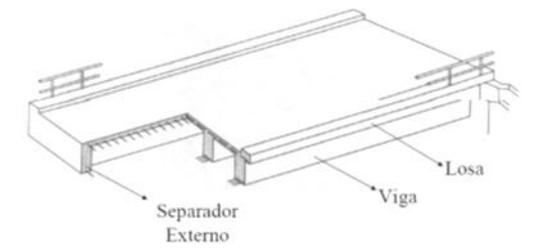


Fig. 2. Losa de Puente de concreto armado

La infraestructura: Está conformada por todos los elementos estructurales que dan apoyo a la superestructura, transfiriendo al suelo las cargas de la superestructura, las cargas propias y las que actúan sobre ella. Está constituida por dos estribos y una o varias pilas intermedias en puentes de dos o más tramos. Los estribos dan apoyo en los extremos del puente y contienen los rellenos en los accesos junto con las aletas o muros de contención. Las pilas son los apoyos intermedios del puente y están compuestas por la zapata, cuerpo y cabecero. Puede ser pila estribo con un funcionamiento correspondiente (estribo perdido) o pila pilote si mantiene la sección de pilotaje (Herrera 1991).

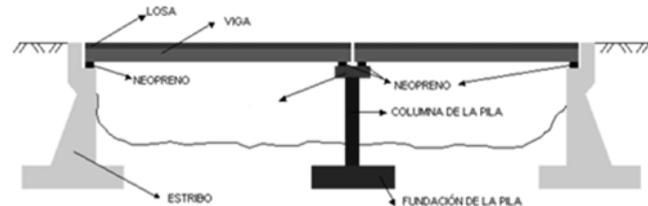


Fig. 3. Elementos de la Infraestructura

2 Cargas y sobrecargas

Los puentes son diseñados para soportar una diversidad de cargas, entre las cuales se encuentran: cargas permanentes, cargas variables, impacto como efecto dinámico y vibratorio de las carga variable, fuerzas longitudinales de frenado, fuerzas centrífugas, carga de viento sobre la estructura y sobre la carga variable, cargas sísmicas, empujes de tierras, efectos hidráulicos, fuerzas de colisión, esfuerzos de acortamiento elástico y retracción de fraguado, flotación, y todas las posibles combinaciones de estas, para tener los máximos esfuerzos que se puedan producir en los diferentes elementos que conforman la estructura.

2.1 Cargas Permanentes

Se consideran pesos muertos o cargas permanentes a todas aquellas que se consideran fijas y/o permanentes durante la vida útil del puente. Entre ellas están: peso propio de vigas, losa, separadores, aceras, brocales y barandas. Sistemas de iluminación y señalamiento. Servicios públicos (acueductos, oleoductos, etc.). La carpeta asfáltica puede variar su espesor en el tiempo incrementando el peso sobre la estructura, en este sentido, no se debe repavimentar sin remover la carpeta deteriorada y pavimentar con el espesor original de diseño.

2.2 Carga Viva

Las cargas vivas, actuantes sobre el puente, son originadas por equipos mecánicos o personas que lo utilizan durante la vida útil de éste. Se considera su naturaleza dinámica y móvil.

Es imposible para el proyectista de un puente conocer las variaciones que pueden ocurrir en las cargas vivas con el tiempo. Para garantizar la seguridad del puente debe existir: control del peso y dimensiones de los vehículos, además de un continuo mantenimiento.

Las cargas vivas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Cargas reales.
- Cargas legales (permitidas).
- Cargas de diseño (normativas).
- Cargas de inventario y operación (evaluación).

2.2.1 Carga Viva de Diseño

La carga viva de diseño es la que se utiliza para el diseño estructural. Consiste en un sistema hipotético de cargas que trata de simular las condiciones más desfavorables que causan los vehículos reales. En Venezuela en puentes carreteros se usa la carga viva estandarizada de la norma AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) incrementada en un 20 %. En puentes para ferrocarriles se emplea la carga viva AREMA (*American Railway Engineering & Maintenance of Way Association*).

El código AASHTO define diversos tipos de cargas móviles que actúan sobre los diferentes componentes de los puentes: camiones de dos ejes (H20, H15), camiones de tres ejes (HS20-44) y cargas distribuidas equivalentes al flujo vehicular, con eje de cargas concentradas.

Mientras los camiones de carga idealizados simulan el efecto de la presencia de vehículos pesados de dos y tres ejes, la carga distribuida equivalente con eje de cargas concentradas simula el efecto de un congestionamiento vehicular sobre el puente. En ambos tipos de carga se presupone

que actúan sobre un carril del puente con un ancho de 10 pies (3,05 m). Con estos trenes de carga se pretende cubrir la totalidad de los camiones que circulan por los puentes.

2.2.1.1 Carga Tandem

El eje tándem es un vehículo de dos ejes con un peso de 12 ton cada uno separados 1,20 m, con separación entre líneas de ruedas es de 1,80m (AASHTO STANDARD SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES 1996).

2.2.1.2 El Camión H20

Corresponde a un camión de dos ejes, se denomina por la letra H de *Highway* seguida de un número que expresa el peso en toneladas inglesas (20 toneladas inglesas -short ton- equivalente a 40.000 libras americanas, y 18.145 kg en el sistema métrico). Es un camión idealizado en el que cada rueda del eje posterior concentra el 40% de la carga de referencia (0,4 x 40.000 lb = 16.000 lb), mientras cada rueda del eje delantero concentra el 10% de la carga de referencia (0,1 x 40.000 lb = 4.000 lb). El camión H15 corresponde al 75% del camión H20 y su peso es de 13.609 kg. La línea de ruedas longitudinal del H20 pesa 20.000 libras (AASHTO STANDARD SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES 1996).

2.2.1.3 El Camión HS20

Camión idealizado de tres ejes que corresponde al camión H20 más un eje adicional o semitrailer que pesa 16.000 libras, se repite el peso del eje trasero del camión H20 (AASHTO STANDARD SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES 1996).

El HS20-44 es el camión de diseño de puentes para autopistas y carreteras principales y secundarias, aunque frecuentemente suele utilizarse camiones menos pesados para vías de comunicación secundarias, de igual manera, existen trenes de carga más pesados para ser usados en instalaciones especiales como aeropuertos y puertos. El peso total de este camión es 32.661 kg, está vigente en los Estados Unidos desde 1.944. El camión HS15 pesa el 75% del camión HS20 con 24.496 kg. Entre el eje trasero de la parte tractora y el eje semitrailer, se tiene una distancia variable de 4,27 m a 9,15 m, con el objetivo de poder determinar las máximas solicitaciones por flexión y corte, en vigas continuas esta separación se toma de manera de producir máximo momento negativo en el apoyo (Herrera 1991).

Cada carril del puente (trocha de 10 ft de ancho) se carga con un camión HS20-44 en solitario, ubicado en distintas posiciones para obtener el efecto máximo sobre cada elemento del puente.

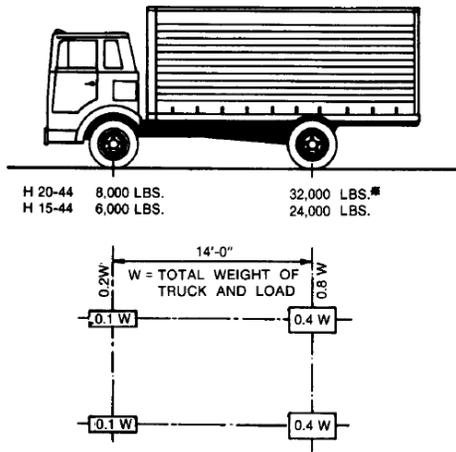


Fig. 4. Tren de Carga H20-44 y H15-44 (AASHTO STANDARD SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES 1996).

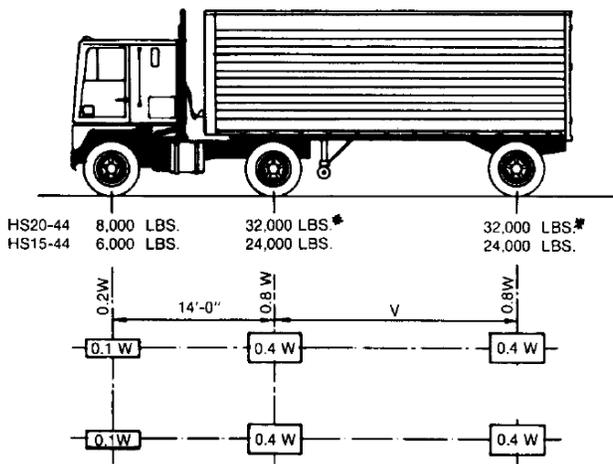


Fig. 5. Tren de Carga de 3 Ejes HS20-44 y HS15-44 (AASHTO STANDARD SPECIFICATIONS BRIDGES FOR HIGHWAY 1996).

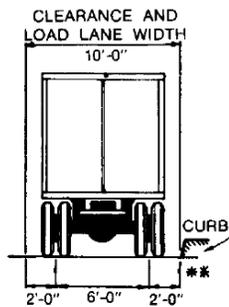


Fig. 6 Espacio y anchura del canal de carga (AASHTO STANDARD SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES 1996).

2.2.1.4 Carga Distribuida Equivalente y Eje Transversal de Carga Concentrado

A través de la carga distribuida equivalente y del eje transversal de carga concentrado se modela el efecto de un

congestionamiento vehicular sobre el puente. Al igual que los camiones de carga se asume que ocupa un ancho de carril de 10 ft (3,05 m). No se consideran fracciones de líneas de carga en el diseño, de manera tal que, en un puente con dos canales que ocupen un ancho de 7,20 m, se tienen 2 y no 2,36 líneas de carga distribuida equivalente (Herrera 1991).

Generalmente el tren de cargas concentradas HS20-44 domina el diseño de elementos estructurales con distancias entre apoyos pequeñas y moderadas (en vigas y losas longitudinales hasta aproximadamente 35 m de luz), mientras que para grandes luces son las cargas distribuidas equivalentes las que definen el diseño de los elementos que superan tales luces.

El Código AASHTO establece que todos los elementos estructurales deben ser diseñados para soportar tanto los camiones de carga como las cargas distribuidas equivalentes de 952 kg/ml por trocha de 3,05 m.

2.2.1.4 El Camión HL93

El camión HL93 (AASHTO LRFD) consiste en un camión HS20 más una carga distribuida equivalente en toda la longitud del puente por cada trocha de 3,05 m de ancho (AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS 2012).

2.2.2 Aplicación de la Carga Viva

Carga de camión: Se coloca el camión HS en solitario por cada canal de circulación en la posición más desfavorable o un tren de camiones H de acuerdo al vehículo de diseño.

Carga distribuida equivalente: Se aplica en forma continua o discontinua, de acuerdo a las líneas de influencia, junto a una o dos cargas concentradas para obtener los máximos momentos. En sentido transversal se aplica en un ancho de 3,05 m.

Si se usa la norma AASHTO LRFD las cargas son una combinación de cargas de camión o tándem simultáneamente con la carga distribuida equivalente.

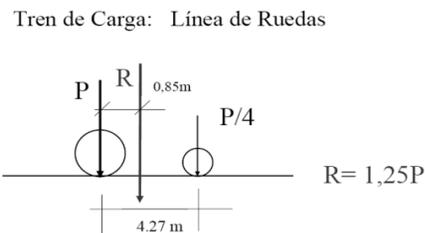


Fig. 7. carga viva: Línea de rueda H

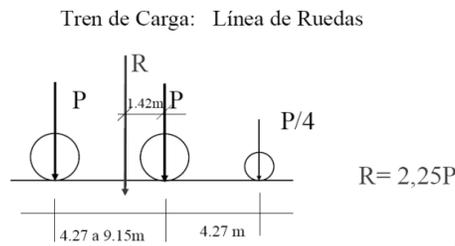


Fig. 8. Carga viva: Línea de rueda HS

R = Resultante del tren de cargas
P = Carga por Rueda

3 Metodología

Para el estudio de la incidencia de la norma AASHTO LRFD en el análisis y diseño de tableros de puentes de concreto reforzado, se desarrolló la siguiente metodología:

3.1 Predimensionado del tablero

3.1.1 Diseño de la sección transversal del puente

La sección transversal del tablero del puente en estudio está constituida por: 2 canales de 3,60 m, 2 hombrillos de 1,20 m y 2 barandas de 0,40m, tal como se ilustra en la Fig.9. Para un ancho total del tablero de 10,40 m.

3.1.2 Altura de viga H_v

$$H_v = \left(\frac{L_c + 3,65}{18} \right) \times 1,10 \quad (1)$$

$$H_v = 0,07 \times L_c \quad (2)$$

Se toma el valor mayor entre la Ec. 1 y 2

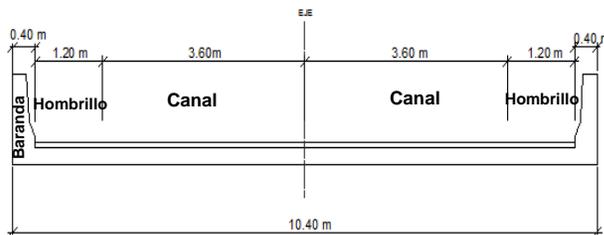


Fig. 9. Sección transversal del puente.

3.1.3 Cálculo del número de vigas a colocar

Estadísticamente la separación entre vigas S_v y volados V oscilan entre:

$$2,50m \leq S_v \leq 3,50m \quad (3)$$

$$0,25 S_v \leq V \leq 0,35 S_v \quad (4)$$

El ancho total del tablero A_t en función de la separación entre vigas, los volados y el número de vigas n:

$$A_t = (n-1) S_v + 2V \quad (5)$$

En ningún caso las vigas exteriores tendrán menor capacidad de carga que las vigas interiores, en este sentido, el acero de refuerzo por flexión y corte se coloca igual en todas las vigas. Se considera la separación entre vigas y longitud de volados de manera tal que, la diferencia entre las áreas de aceros requeridas por flexión en las vigas extremas e internas sea menor del 10%, como criterio de economía, dado que todas las vigas en definitiva llevan igual refuerzo (el mayor requerido). Es decir:

$$e = \frac{A_{s \text{ mayor}} - A_{s \text{ menor}}}{A_{s \text{ menor}}} \times 100 \quad (6)$$

3.1.4 Ancho de la viga b_w

El ancho de la viga b_w oscilará entre:

$$\frac{H_v}{3} \leq b_w \leq \frac{H_v}{2} \quad (7)$$

3.1.5 Espesor de la losa e_L

$$e_L = \left(\frac{S + 2,75}{30} \right) > 16,5 \text{ cm} \quad (8)$$

Donde S es la separación libre entre vigas:

$$S = S_v - b_w \quad (9)$$

3.1.6 Determinación del número de separadores a colocar

Los separadores, serán colocados entre las vigas, en los extremos y a lo largo del puente, a una separación que no exceda los 12 m entre separadores. En todo caso, todos los tableros tendrán dos separadores extremos, y tantos internos como sean necesarios. Dependiendo de la luz de cálculo L_c se requieren de:

$L_c < 12 \text{ m}$ No requiere separador interno

$12 \leq L_c < 24 \text{ m}$ Requiere un separador interno

$24 \text{ m} \leq L_c < 36 \text{ m}$ Requiere dos separadores internos

$L_c \geq 36 \text{ m}$ Requiere tres separadores internos

3.1.7 Altura de los separadores H_s

$$\frac{3}{4}H_v \leq H_s \leq H_v \quad (10)$$

Es recomendable colocar separador extremo de menor altura que las vigas para permitir la colocación de gatos hidráulicos requeridos durante la etapa de mantenimiento.

3.1.8 Ancho del separador b_s

$$\frac{H_s}{3} \leq b_s \leq \frac{H_s}{2} \quad (11)$$

3.1.9 Ancho efectivo de la viga B_e

Representa el máximo ancho del ala que trabaja a compresión en las vigas de sección T.

Para las vigas internas, se toma el menor valor entre:

$$B_e \leq S_v \quad (12)$$

$$B_e \leq \frac{L_c}{4} \quad (13)$$

$$B_e \leq 12e_L + b_w \quad (14)$$

Para las vigas extremas, se toma el menor valor entre:

$$B_e \leq \frac{S_v}{2} + V \quad (15)$$

$$B_e \leq \frac{L_c}{4} \quad (16)$$

$$B_e \leq 6e_L + \frac{b_w}{2} + V \quad (17)$$

3.2 Comparación entre la Norma AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges y la Norma AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

Los cambios incorporados en la nueva norma son sustanciales, desde el punto de vista de las cargas y su forma de aplicación, de los factores de mayoración de cargas y de minoración de resistencias. A continuación se detallan los parámetros que difieren desde el punto de vista conceptual y tienen mayor relevancia en el estudio y comparación de las normas.

3.2.1 Cargas

- STANDARD: Considera un camión HS20 en solitario.
- LRFD: Considera el sistema de cargas HL93.

3.2.2 Factor Impacto F.I.

Los momentos originados por la carga viva, son incrementados por el efecto dinámico de los vehículos en circulación, el cual usualmente se denomina Impacto **I**, viene expresado como una adición en porcentaje a la carga viva, el cual se denomina Factor de Impacto F.I. Este factor puede ser evaluado de manera más precisa mediante simulación del comportamiento dinámico de un vehículo de carga utilizando el método de los elementos finitos (Matamoras 2007).

- AASHTO STANDARD:

$$I = \left(\frac{15,24}{L_c + 38,1} \right) \leq 30 \% \quad (18)$$

$$F.I. = 1 + I \quad (19)$$

- AASHTO LRFD:

Para el sistema de cargas HL93, el F.I. Se toma constante e igual a 1,33 aplicado solo al camión HS20, a la carga distribuida equivalente no se le aplica el F.I.

3.2.3 Factor Rueda F.R.

Representa la distribución transversal de la carga viva, dado que el análisis se realiza frecuentemente con una línea de rueda, el F.R. representa cuantas líneas de rueda transversalmente pueden actuar sobre una viga. Es un factor aplicable a las fuerzas cortante y momentos flectores. La carga viva no se distribuye en el sentido longitudinal.

- AASHTO STANDARD: Aplicable a líneas de rueda. Se considera medio vehículo longitudinalmente, el peso de una rueda $P = 7.258 \text{ Kg}$.

- Para vigas extremas:

Por líneas de influencia. Se determina hallando la reacción producida por las cargas del camión normativo sobre las vigas transversalmente, considerando que la losa entre las vigas se comporta como una viga simplemente apoyada.

- Para vigas internas con $S_v \leq 3,05\text{m}$

Para Vigas T de concreto y puente de más de una trocha de circulación.

$$F.R = \frac{S_v}{1,83} \quad (20)$$

Para puentes con $S_v > 3,05$ m se determina el F.R. con el procedimiento de líneas de influencia descrito anteriormente.

- AASHTO LRFD: es un factor de distribución **F.D** de cargas aplicables a las solicitaciones de corte y de momento, se calcula con el peso total del vehículo, empleando cargas totales por ejes. El peso por eje del camión HS20 es de $P = 14.516$ Kg. El F.D. representa como se distribuye transversalmente el camión HS20 en las vigas que conforman el tablero del puente.

Factor de Distribución para momento en vigas internas $F.D_{M(VI)}$:

$$F.D_{M(VI)} = 0,075 + \left(\frac{S}{9,5}\right)^{0,6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0,2} \left(\frac{K_g}{12Le_L^3}\right)^{0,1} \quad (21)$$

Para aplicar la ecuación (21) los valores de diseño se deben encontrar en los siguientes rangos:

- $3,5 \text{ ft} \leq S \leq 16,0 \text{ ft}$ ($S =$ Separación entre vigas).
- $4,5 \text{ in.} \leq e_L \leq 12,0 \text{ in.}$ ($e_L =$ Espesor de losa).
- $20 \text{ ft} \leq L \leq 240 \text{ ft}$ ($L =$ Longitud de cálculo).
- $N_b \geq 4$ ($N_b =$ Número de vigas).
- $1 \times 10^4 \text{ in}^4 \leq K_g \leq 7 \times 10^6 \text{ in}^4$ ($K_g =$ Rigidez).

$$\left(\frac{K_g}{12Le_L^3}\right)^{0,1} \quad (22)$$

Por norma el término anterior se puede tomar igual a 1,0 en el diseño preliminar.

Factor de Distribución para corte en vigas internas $F.D_{V(VI)}$:

$$F.D_{V(VI)} = 0,2 + \frac{S}{12} - \left(\frac{S}{35}\right)^{2,0} \quad (23)$$

Para aplicar la ecuación (23) los valores de diseño se deben encontrar en los mismos rangos indicados anteriormente en la ecuación (21).

Factor de Distribución para momento en vigas extremas **F.D_{M(VE)}**:

$$F.D_{M(VE)} = e \cdot F.D_{M(VI)} \quad (24)$$

$$e = 0,77 + \frac{d_e}{9,1} \quad (25)$$

Nota: $-1,0 \leq d_e \leq 5,5$ (Distancia horizontal desde el eje de la viga extrema hasta el borde interior de la baranda (ft)).

Factor de Distribución para corte en vigas extremas **F.D_{V(VE)}**:

$$F.D_{V(VE)} = e \cdot g_{interior} \quad (26)$$

$$e = 0,6 + \frac{d_e}{10} \quad (27)$$

Nota: $-1,0 \leq d_e \leq 5,5$ (Distancia horizontal desde el eje de la viga extrema hasta el borde interior de la baranda (ft)).

3.2.4 Combinación de solicitaciones

- AASHTO STANDARD:

- Combinación para Momento último:

$$M_u = 1,3 [M_{cm} + \frac{2}{3} M_{cv} \cdot FR \cdot FI \cdot FNV] \quad (28)$$

M_{cm} = Momento máximo de carga permanente
 M_{cv} = Momento máximo por carga variable determinado con el teorema de Barré, originado por una línea de rueda del camión HS20 ($P = 7.258$ kgf).

$$M_{cv} = \frac{2,25 P}{Lc} \times \left(\frac{Lc}{2} + \frac{e_r}{2}\right)^2 - 4,27 P \quad (29)$$

e_r = Distancia horizontal medida desde la resultante del tren de cargas hasta el eje de carga más próximo

- AASHTO LRFD:

- Combinación para Momento último:

$$M_u = 1,25 M_{cm1} + 1,50 M_{cm2} + 1,75 (M_{cv1} \cdot F.D \cdot FI + M_{cv2}) \quad (30)$$

M_{cm1} = Momento máximo de carga permanente: peso propio de viga + losa + baranda + separadores

M_{cm2} = Momento máximo de carga permanente originado por el pavimento

M_{cv1} = Momento máximo por carga variable determinado con el teorema de Barré, utilizando el camión HS20 completo ($P=14.516$ kgf).

$$M_{cv1} = \frac{2,25P}{Lc} \left(\frac{Lc}{2} + \frac{e_r}{2} \right)^2 - 4,27 P \quad (31)$$

M_{cv2} = Momento máximo de carga variable originado por la carga distribuida equivalente

$$M_{cvequiv} = \frac{952 \cdot Lc^2}{8} \quad (32)$$

3.3 Cálculo del acero de refuerzo en las vigas

Conocida la geometría de las vigas, la resistencia de los materiales y las solicitaciones últimas máximas de flexión: B_e , d , F_y , f'_c y M_u , se determina la cantidad de acero de refuerzo requeridas para secciones T de concreto reforzado, diseñadas utilizando el método del estado límite de agotamiento resistente de la norma AASHTO LRFD, basados en el criterio de armadura sencilla, donde los momentos últimos son menores que los momentos máximos resistentes minorados ($M_u < \phi M_{max}$).

$\phi = 0,90$ (Factor de minoración de resistencia para flexión)

3.4 Comparación del acero de las vigas internas y extremas

Se determina las áreas de aceros requeridas por flexión en las vigas extremas e internas y se emplea el criterio de economía calculado con la expresión (6), obteniéndose para diferentes separaciones entre vigas S_v los correspondientes valores de “ ϵ ”, de esta manera se pudo determinar la separación óptima entre vigas. Se considera aceptable cuando la diferencia porcentual $\epsilon < 10\%$ y óptimo en su menor valor posible.

4 Análisis de resultados

4.1 Estudio de diferencias porcentuales del acero de refuerzo requerido en vigas extremas y vigas internas empleando

la Norma AASHTO LRFD y la Norma AASHTO Standard.

Se realizó un estudio comparativo entre tableros de puentes de concreto reforzado diseñados con la norma AASHTO Standard y la más reciente norma AASHTO LRFD, con el objeto de determinar la incidencia de esta última en el diseño de los tableros de puentes. El estudio se basó en la comparación de tableros de puentes con longitudes de 10 m, 18 m y 30 m, para las tres longitudes de puentes estudiadas se varió la separación entre vigas: 2,40 m; 2,70 m; 2,80 m; 2,90 m; 3,00 m; 3,20m y 3,30 m.

En las Fig.10, 11 y 12, se muestra los resultados obtenidos en el estudio de los tableros de puentes de concreto para las longitudes y separación entre vigas indicadas. Se observa que para las diferentes longitudes de puentes, existen tendencias claras que definen la separación óptima entre las vigas. Al emplear la norma AASHTO STANDARD, la separación óptima entre vigas tiende a 2,80 m, mientras que al emplear la norma AASHTO LRFD, la separación óptima entre vigas tiende a 3,00 m.

La diferencia porcentual ϵ entre el acero de refuerzo requerido en vigas extremas y el requerido por las vigas internas, resulta ser menor y con menor dispersión cuando se utilizó la norma AASHTO LRFD.

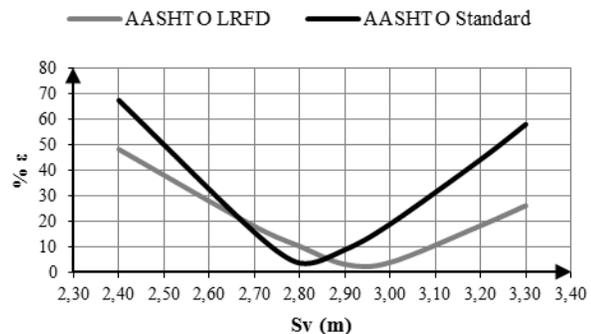


Fig. 10. Diferencias porcentuales Lc=10m.

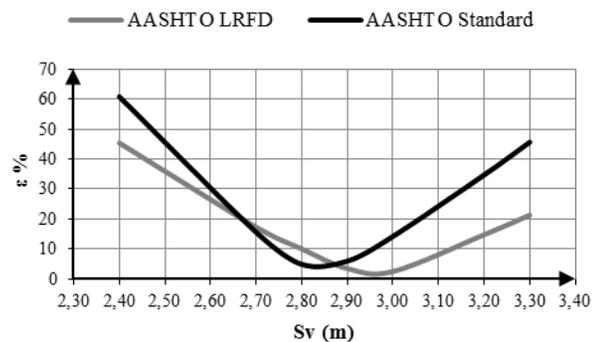


Fig. 11. Diferencias porcentuales Lc=18m.

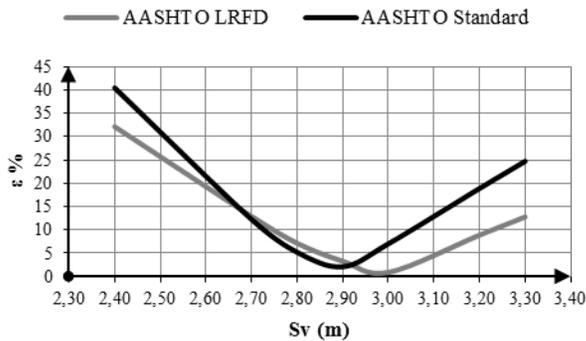


Fig. 12. Diferencias porcentuales Lc=30m.

4.2 Incidencia de la Norma AASHTO LRFD en el diseño de tableros de puentes de concreto reforzado.

Para determinar la incidencia de la nueva Norma AASHTO LRFD en comparación con la Norma AASHTO Standard, se calculó el incremento porcentual I (%) entre el acero de refuerzo máximo requerido empleando ambas normas, para las diferentes longitudes y separaciones entre vigas propuestas. En la Tabla 1, se presentan los resultados obtenidos.

$$I \% = \frac{As \text{ max AASHTO LRFD} - As \text{ max AASHTO Standard}}{As \text{ max AASHTO Standard}} \cdot 100 \quad (33)$$

Tabla 1. Luz de Cálculo 10m

Sv (m)	AASHTO Standard As max (cm ²)	AASHTO LRFD As max (cm ²)	Incidencia de la nueva Norma
2,40	60,88	62,14	2,08%
2,70	50,36	57,50	14,19%
2,80	47,44	56,01	18,07%
2,90	47,92	54,37	13,46%
3,00	50,03	54,77	9,48%
3,20	54,03	58,45	8,17%
3,30	56,00	60,23	7,57%

Tabla 2. Luz de Cálculo 18 m

Sv (m)	AASHTO Standard As max (cm ²)	AASHTO LRFD As max (cm ²)	Incidencia de la nueva Norma
2,40	109,32	109,31	0,00%
2,70	92,88	101,99	9,81%
2,80	88,27	99,68	12,92%
2,90	87,88	97,35	10,79%
3,00	91,14	97,13	6,57%
3,20	97,97	103,48	5,63%
3,30	100,93	106,18	5,20%

Tabla 3. Luz de Cálculo 30 m

Sv (m)	AASHTO Standard As max (cm ²)	AASHTO LRFD As max (cm ²)	Incidencia de la nueva Norma
2,40	216,20	217,38	0,55%
2,70	193,97	206,80	6,61%
2,80	187,74	202,22	7,71%
2,90	183,89	200,49	9,03%
3,00	189,21	199,38	5,38%
3,20	199,50	209,52	5,02%
3,30	204,41	214,33	4,85%

Considerando el parámetro acero de refuerzo requerido, y basados en los resultados mostrados en las Tablas 1, 2 y 3, se pudo observar que la incidencia de la norma AASHTO LRFD respecto de la norma AASHTO STANDARD, resultó ser más mayor en los tableros de puentes de menor longitud, disminuyendo ésta en los tableros de los puentes de mayor longitud. Así, en el tablero de 10 m, la incidencia máxima en el acero de refuerzo requerido resultó de 18,07% para una separación entre vigas de 2,80 m, mientras que para el tablero de 30 m, ésta resultó ser de 9,03% para una separación entre vigas de 2,90m.

5 Conclusiones

La formulación empleada para el diseño de tableros de puentes empleando la reciente norma AASHTO LRFD involucra cambios sustanciales con respecto a la anterior norma AASHTO STANDARD. La norma AASHTO LRFD representa una norma moderna que ha evolucionado, sus planteamientos obedecen a estudios de confiabilidad estructural y están respaldados con investigación reciente en el área de materiales y puentes.

La norma AASHTO LRFD diferencia las cargas permanentes de peso propio respecto a las cargas de pavimento; ya que existe mayor probabilidad de que la carga de pavimento varíe con el tiempo. Los factores de mayoración de cargas son distintos en ambas normas.

La norma AASHTO STANDARD considera como carga variable el camión HS20 en solitario; mientras que la norma AASHTO LRFD considera como carga viva, la carga HL93 conformada por la combinación del camión HS20 más la carga distribuida equivalente.

El factor de impacto en la norma AASHTO STANDARD depende de la luz de cálculo, se determina con una expresión y tiene un tope máximo de 30%. En la norma AASHTO LRFD el factor de impacto es constante para todas las luces e igual al 33%, este se aplica solamente al camión HS20.

El factor rueda en la norma AASHTO STANDARD es el mismo para fuerzas cortantes y para momentos flectores; se determina mediante una sola expresión. Este es aplicable a líneas de rueda, es decir, medio camión longitudinalmente y representa cuantas líneas de rueda afectan o

solicitan una viga. En la norma AASHTO LRFD el factor rueda se denomina factor de distribución de carga, y es diferente para las solicitaciones de fuerza cortante y de momento flector, determinándose con expresiones distintas. Este factor representa la distribución de las cargas en el tablero y en cuanto afectan o solicitan estas cargas a una viga. El factor rueda en vigas extremas se determina, en la norma AASHTO STANDARD mediante líneas de influencia considerando la losa apoyada. La norma AASHTO LRFD determina el factor de distribución de carga en vigas extremas mediante expresiones explícitas y diferentes para fuerzas cortantes y para momentos flectores.

Se observa que la separación óptima entre vigas, difiere sustancialmente dependiendo de la norma empleada, resultó que la separación óptima entre vigas es mayor cuando se emplea la norma AASHTO LRFD.

En general se observó en diseño de tableros de puentes de concreto reforzado estudiados, que al emplear la norma AASHTO LRFD, se requiere de una cantidad de acero de refuerzo mayor que el demandado por la norma AASHTO STANDARD. La diferencia porcentual ε entre el acero de refuerzo requerido en vigas extremas y vigas internas resultó ser más pequeña y con menor dispersión, cuando se utilizó la norma AASHTO LRFD.

Referencias

- AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS 2012, Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO STANDARD SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES 1996, Adopted by the American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Andueza P, 1999, El diseño geométrico de carreteras, tomo I, Universidad de Los Andes, Mérida, República Bolivariana de Venezuela.
- Arnal E, 2000, Lecciones de Puentes, primera edición, Caracas, República Bolivariana de Venezuela.
- Lobo W, 1987, Propuesta de normas venezolanas para el Diseño Sismo resistente de puentes, Ministerio de transporte y comunicaciones, República Bolivariana de Venezuela.
- Norma Venezolana 1753-2006 Proyecto y Construcción de Obras de Concreto Estructural, 2006, FONDONORMA, Caracas, República Bolivariana de Venezuela.
- Priestley M, Seible F y Calvi G, 1996, Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, United States of America.
- Herrera J, 1991, Puentes, primera edición, Universidad Católica de Colombia, Colombia.
- Matamoros A, 2007, Simulación del comportamiento dinámico de un vehículo de carga utilizando elementos finitos, Ciencia e Ingeniería, Vol. 28, No. 3, pp. 157–164.
- Xanthakos P, 1994, Theory and Design of Bridges, John Wiley & Sons, United States of America.

Recibido: 04 de noviembre de 2014

Aceptado: 15 de mayo de 2015

Pinto, Arnaldo: *Magister Scientiae en Ingeniería Estructural (2014) Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Ingeniero Civil (2010) Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Profesor del Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes.*

Torres, Rafael: *Ingeniero Civil y Magister Scientiae en Ingeniería Estructural de la Universidad de Los Andes, Profesor Titular Jubilado del Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. Correo electrónico: rafaeltorres@ula.ve*