



# METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE TABLEROS EN PUENTES CARRETEROS DE CONCRETO ARMADO SEGÚN LA NORMA LRFD BRIDGES DESIGN SPECIFICATIONS

■ Matheus, Xavier.

email: xaviermath@gmail.com

Mérida, Venezuela.

■ Asesor: Torres, Rafael.

email: rafaeltorres@ula.ve

Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida,  
Venezuela

Fecha de Recepción: 21 de Marzo 2013  
Fecha de Aceptación: 24 de Octubre de 2013

---

## RESUMEN

Este trabajo plantea una metodología de cálculo para la elaboración de tableros de puentes carreteros con vigas de concreto armado en puentes ubicados en vías principales y en vías secundarias o de penetración agrícola, aplicando la norma AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>. Durante el desarrollo del tema, se anexa a cada ecuación el artículo correspondiente enunciado en la norma.

La separación entre vigas y la longitud de los volados de la losa, se seleccionan para condiciones óptimas; la hipótesis de diseño se fundamenta en criterios de economía. Todas las vigas de los puentes deben tener igual resistencia, en consecuencia, igual cantidad de acero de refuerzo, en tal sentido, se seleccionan separaciones entre vigas y volados, de manera tal que, la diferencia entre el acero de refuerzo máximo (As mayor) y mínimo

(As menor) requerido para las diferentes vigas no exceda el 10%, es decir:

$$\varepsilon = \left( \frac{A_s \text{ mayor} - A_s \text{ menor}}{A_s \text{ menor}} \right) * 100 \leq 10\% \quad (00-01)$$

La separación definitiva entre vigas se redondea a múltiplos de cinco centímetros, por facilidades constructivas, esta condición implica no tener valores de  $\varepsilon = 0\%$  (condición óptima).

Con las cargas permanentes y variables se determinan las solicitaciones de corte y de momento las cuales se combinan, mayoran y factoran según la norma AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>, por la teoría del estado límite de agotamiento resistente, obteniéndose aceros de refuerzo por corte y por flexión.

**Palabras Claves:** Puentes, Concreto armado, Norma AASHTO LRFD

# METHODOLOGY FOR THE DESIGN OF HIGHWAY BRIDGES PANELS IN REINFORCED CONCRETE BRIDGES ACCORDING TO EN LRFD DESIGN SPECIFICATIONS

## SUMMARY

This paper proposes a calculation methodology for the development of highway bridge decks reinforced concrete beams in bridges located on main roads and secondary roads or agricultural penetration, using the AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>. During development of the subject, is appended to each equation the article stated in the rule.

The separation between beams and the length of the flights of the slab, are selected for optimum con-

ditions, the design hypothesis is based on economic criteria. All beams of the bridges must be of equal resistance, therefore equal amount of reinforcing steel, as such, are selected separation between beams and flown, such that the difference between the maximum reinforcing steel ( $A_s$  mayor) and minimum ( $A_s$  menor) required for the different beams will not exceed 10%, ie:

$$\varepsilon = \left( \frac{A_s \text{ mayor} - A_s \text{ menor}}{A_s \text{ menor}} \right) * 100 \leq 10\% \quad (00-01)$$

The final separation between beams is rounded to multiples of five centimeters, facilities construction, this condition implies not have values of  $\varepsilon = 0\%$  (optimum condition).

With the permanent loads and variable determining the shear stress and moment which are combined HTO LRFD (1), by the theory of limit state of fatigue resistant reinforcing steels obtained by cutting and flexion.

**Keywords:** Bridges, Reinforced concrete, AASHTO LRFD norm

## 1. DESARROLLO TEORICO

### 1.1 Clasificación de las vías

Clasificación funcional: de acuerdo a la cantidad de movilidad y de accesibilidad provistas, las vías se clasifican en:

- **Vías urbanas:** Autopistas, vías expresas, vías arteriales, vías colectoras y vías locales.
- **Vías rurales:** Autopistas, vías expresas, vías arteriales principales, vías arteriales secundarias, vías colectoras, vías locales.

Según la clasificación oficial, en Venezuela clasifican las carreteras rurales en: Troncales, locales, ramales, subramales y caminos carreteros. Según la importancia, las vías rurales se clasifican en carreteras principales y carreteras secundarias.

Como medida de protección tanto del tránsito como de los peatones, todos los puentes tendrán barandas de seguridad de concreto armado a ambos lados de la estructura. En el análisis de los tableros las barandas se consideran como cargas equivalentes debido a la complejidad real que representa el volumen de la baranda.

### 1.2 Tipo de camión

Se darán dos opciones; camión de diseño de dos ejes tipo H20 para puentes en carreteras secundarias y de tres ejes tipo HS20 para carreteras principales. Las cargas H15 y HS15 son respectivamente el 75% de las cargas H20 y HS20. (AASHTO<sup>(4)</sup> Art. 3.7).

**El Tren de Carga H** consiste en un camión de dos ejes separados 14 pies (4.27 m), donde el eje delantero tiene una carga P/4 de 8000 lbs y el eje trasero una carga P de 32000 lbs (P = 7258 kg). Las cargas H son designadas por la letra H de Highway seguido por un número que indica el peso bruto en toneladas inglesas del camión estándar. (AASHTO<sup>(4)</sup> Art. 3.7.5).

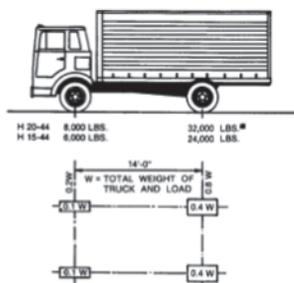


FIGURA 0101. Carga Viva H de la norma AASHTO

**El Tren de Carga HS** consiste en un camión tractor con Semi Tráiler de tres ejes separados 14 pies (4.27 m), donde el eje delantero tiene una carga P/4 de 8000 lbs y los ejes central y trasero tienen una carga P de 32000 lbs (P = 7258 kg). Las cargas HS son designadas por las letras H de Highway y S de Semi Tráiler, seguidas por un número indicando el peso bruto en toneladas inglesas del tractor. (AASHTO<sup>(1)</sup> Art. 3.6.1.2).

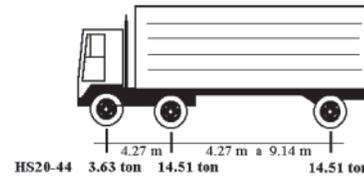


FIGURA 0102 Carga Viva HS de la norma AASHTO

La construcción de cada uno de estos tipos de puente depende de la carretera para la cual su uso se justifique o el tipo de vehículo a cuya carga va a ser sometido.

Para el cálculo de los tableros de puentes de concreto armado en vías principales se utiliza la sobrecarga vehicular HL-93 de la norma AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>, conformada por el camión de diseño HS20 mas la carga variable equivalente y para puentes ubicados en vías secundarias se utiliza la sobrecarga vehicular HL-93 conformada por el camión de diseño H20 mas la carga variable equivalente.

### 1.3 Ecuaciones para la Envolvente de Momento

Para camión H 20:

$$M(x) = 1,25 \frac{P}{Lc} (Lc - 0,854 - X) X \quad (1.1)$$

Para  $(0 \leq X \leq (Lc-4,27))$

$$M(x) = 1,25 \frac{P}{Lc} (Lc + 0,854 - X) X - 1,07P \quad (1.2)$$

Para  $((Lc-4,27) \leq X \leq Lc)$

Para camión HS 20:

$$M(x) = 2,25 \frac{P}{Lc} (Lc - X + 1,42) X - 4,27P \quad (1.3)$$

Para  $(4,27 \leq X \leq (Lc-4,27))$

$$M(x) = 2,25 \frac{P}{Lc} (Lc - X - 2,85) X \quad (1.4)$$

Para  $(0 \leq X \leq (Lc-8,54))$

$$M(x) = 2,25 \frac{P}{Lc} (Lc - X - 1,42) X - \frac{P}{4} (4,27) \quad (1.5)$$

Para  $(4,27 < X < (Lc-4,27))$

$$M(x) = 2,25 \frac{P}{Lc} (Lc - X + 2,85) X - 6,41P \quad (1.6)$$

Para  $(8,54 < X \leq Lc)$

1.4 Ecuaciones para la Envolvente de Corte

Para camión H 20:

$$V(x) = 1,25 \frac{P}{Lc} (Lc - 0,854 - X) \quad (1.7)$$

Para  $(0 \leq X \leq (Lc-4,27))$

$$V(x) = \frac{P}{Lc} (Lc - X) \quad (1.8)$$

Para  $((Lc-4,27) < X < Lc)$

Para camión HS 20:

$$V(x) = 2,25 \frac{P}{Lc} (Lc - 2,854 - X) \quad (1.9)$$

Para  $(0 \leq X \leq (Lc-8,54))$

$$V(x) = 2 \frac{P}{Lc} (Lc - 2,135 - X) \quad (1.10)$$

Para  $((Lc-8,54) \leq X \leq (Lc-4,27))$

$$V(x) = \frac{P}{Lc} (Lc - X) \quad (1.11)$$

Para  $((Lc-4,27) \leq X \leq Lc)$

1.5 Momento Máximo – Maximorum

Para camión H 20:

$$M(x) = 1,25 \frac{P}{Lc} \left( \frac{Lc}{2} - \frac{e}{2} \right)^2 \quad (1.12)$$

Para camión HS 20

$$M(x) = 2,25 \frac{P}{Lc} (Lc - X + 1,42) X - 4,27P \quad (1.13)$$

## 2. PREDIMENSIONADO

El criterio en el predimensionado es colocar igual cantidad de acero de refuerzo en las vigas externas e internas, para ello se seleccionan separaciones entre vigas y dimensiones de los volados, de tal manera que la diferencia entre el acero de refuerzo calculado máximo (As mayor) y mínimo (As menor) requerido para las diferentes vigas, no exceda del 10 %, determinado según la ecuación (00-01).

Las áreas de acero se obtienen hallando los momentos últimos tanto para las vigas externas como para las vigas internas, luego los valores son afectados por los factores y combinaciones de carga establecidos por la norma AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>.

### 2.1 Solicitaciones Últimas de Momento flector

$$Q = \sum ni * \gamma_i * Qi \quad (2-1)$$

AASHTO LRFD <sup>(1)</sup> Art. 3.4.1-1

$$Mu = 1,25Mcp1 + 1,5Mcp2 + 1,75(Mcv_{camion} * FD * FI * Mcv_{camion} * FD) \quad (2-2)$$

(TABLA 3.4.1-1 AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>)

**Mcp1** = Momento por carga permanente obtenido del peso de la losa, vigas, separadores y defensas.

**Mcp2** = Momento por carga permanente obtenido por el peso del pavimento

**Mcv camión** = Momento por carga variable obtenido de las envolventes de momento del camión H20 o HS20

**Mcv equiv** = Momento por carga variable equivalente obtenido del carril de diseño

**FD** = Factor de distribución

**FI** = Factor de impacto

Cada termino de la ecuación, se explica en el desarrollo del presente capítulo y en el capítulo IV.

### 2.2 Ancho del Tablero (AT)

Para puentes en vías principales se usa frecuentemente las siguientes dimensiones con ancho total de calzada de 10.40 m:

- 2 Canales de circulación vehicular de 3.60 m
- 2 Hombrillos de 1.20 m
- 2 Barandas de 0.40 m

Y para puentes en vías secundarias las siguientes dimensiones con ancho total de calzada de 8 m:

- 2 Canales de circulación vehicular de 3.60 m
- 2 Barandas de 0.40 m

### 2.3 Luz de cálculo (Lc)

Longitud medida desde el centro de cada separador externo del tablero.

### 2.4 Dimensiones de las Vigas

Altura de la viga (Hv):

$$Hv \leq 0,07 * Lc \quad (2-3)$$

(Tabla 2.5.2.6.3-1 AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>)

Base de la viga (bv):

$$\frac{Hv}{3} < bv < \frac{Hv}{2} \quad (02-04)$$

### 2.5 Dimensiones de los Separadores

Altura del separador:

$$Hs = 0,75 * Hv \quad (2-5)$$

Base del separador (bs):

$$\frac{Hs}{3} < bs < \frac{Hs}{2} \quad (02-06)$$

El numero de separadores por tablero, depende de la longitud de cálculo del puente (Lc).

- Para  $Lc < 12$  m, deberá llevar 2 separadores externos.
- Para  $12 \text{ m} \leq Lc < 24$  m, deberá llevar 2 separadores externos y 1 separador interno
- Para  $24 \text{ m} \leq Lc \leq 36$  m, deberá llevar 2 separadores externos y 2 separadores internos
- Para  $Lc > 36$  m, deberá llevar 2 separadores externos y 3 separadores internos

### 2.6 Separación entre vigas (Sv)

$$2,5 \text{ m} < Sv < 3,5 \text{ m} \quad (\text{Valores estadísticos})$$

### 2.7 Volados (V)

Mínimo ancho de vuelo total igual a 530 mm medido a partir del centro de la viga exterior y máximo ancho de vuelo total igual al menor valor entre 0,625 veces la separación de las vigas y 1800 mm. (APENDICE A4 LRFD<sup>(1)</sup>)

### 2.8 Numero de vigas (n)

Teniendo Sv, V y AT, obtenemos N° de vigas de:

$$AT = 2V + (n-1) Sv \quad (2-7)$$

### 2.9 Losa

El espesor (el) de la losa del tablero, deberá ser mayor o igual a 175 mm. (AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 9.7.1.1)

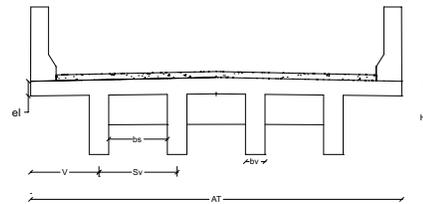


FIGURA 2-1. Esquema transversal de un tablero para puentes

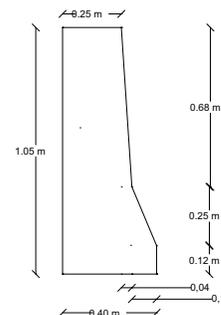


FIGURA 2-2. Dimensiones de la baranda de concreto armado

### 2.10 Determinación del centroide (X) y peso de la baranda por (ml).

Centroide (X) medido desde el extremo izquierdo:

$$X = 0.16 \text{ m}$$

Peso de la baranda:

$$W \text{ baranda} = 768 \text{ Kg/m}$$

### 2.11 Análisis de Carga Permanente

Se consideran pesos o cargas permanentes a todas aquellas cargas que pueden considerarse fijas y/o permanentes durante la vida útil del puente. Entre ellas están: peso propio de vigas, losa, separadores, carpeta de asfalto o rodamiento, aceras, brocales y barandas. Sistemas de iluminación y señalamiento. Servicios públicos (acueductos, oleoductos, etc.). No se debe repavimentar los tableros de los puentes sin antes remover la carpeta deteriorada y pavimentar con el espesor de diseño.

Para determinar las cargas permanentes de los elementos de concreto armado se consideró como peso unitario 2.500 Kg/m<sup>3</sup>, y para la carpeta asfáltica de rodamiento 2.400 Kg/m<sup>3</sup>.

Se considera el análisis de las cargas permanentes por separado, determinándose los **Mcp1** y **Mcp2**.

El desarrollo comienza con un análisis estructural de una franja de un metro de ancho con el peso de la losa más las barandas (defensas) y otro análisis de una franja de un metro de ancho con el peso del pavimento, obteniendo así los valores de las reacciones para viga externa e interna.

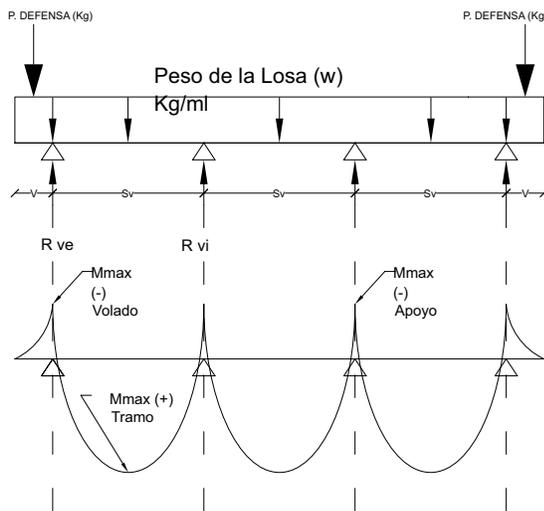


FIGURA 2-3. Modelo estructural de la losa.

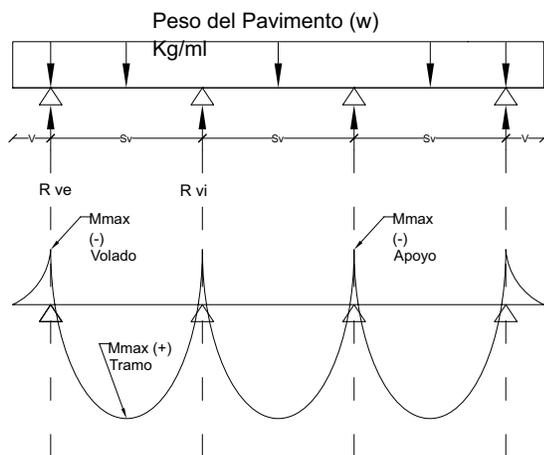


FIGURA 2-4. Modelo estructural del pavimento.

### 2.12 Cargas y momentos sobre viga externa obtenidas por peso propio, peso de la losa, defensas y separadores

Para  $L_c < 12$  m

$$W_{ve} = R_{ve} + (H_v - e_l) * b_v * 2500 \quad (2-8)$$

$$M_{max\ ve} = W_{ve} * \frac{(L_c)^2}{8} \quad (2-9)$$

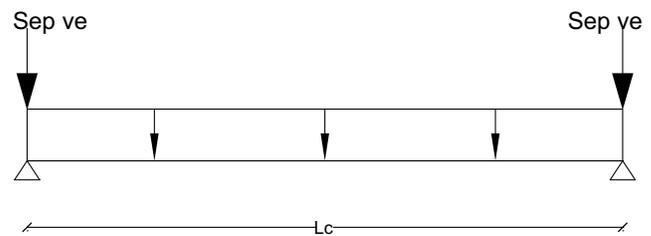


FIGURA 2-5. Carga Sobre Viga Externa

Para  $12\text{ m} \leq L_c < 24\text{ m}$

$$W_{ve} = R_{ve} + (H_v - e_l) * b_v * 2500 \quad (2-10)$$

$$P_{sve} = (H_s - e_l) * \frac{(S_v - b_v)}{2} * b_s * 2500 * 2 \quad (2-11)$$

$$M_{max\ ve} = \frac{W_{ve} * (L_c)^2}{8} + \frac{P_{sve} * L_c}{3} \quad (2-12)$$

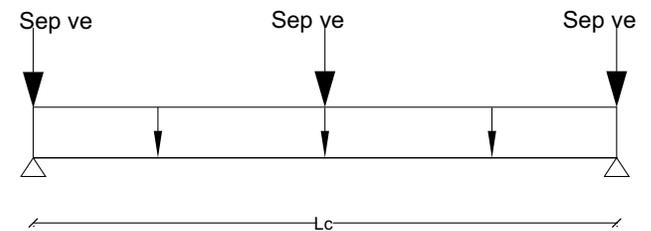


FIGURA 2-6. Carga Sobre Viga Externa

Para  $24\text{ m} \leq L_c \leq 30\text{ m}$

$$W_{ve} = R_{ve} + (H_v - e_l) * b_v * 2500 \quad (2-13)$$

$$P_{sve} = (H_s - e_l) * \frac{(S_v - b_v)}{2} * b_s * 2500 * 2 \quad (2-14)$$

$$M_{max\ ve} = \frac{W_{ve} * (L_c)^2}{8} + \frac{P_{sve} * L_c}{3} \quad (2-15)$$

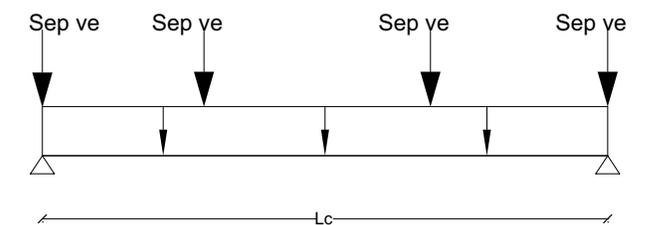


FIGURA 2-7. Carga Sobre Viga Externa

### 2.13 Cargas y momentos sobre viga interna obtenidas por peso propio, peso de la losa, defensas y separadores

Para  $L_c < 12$  m

$$W_{vi} = R_{vi} + (H_v - e_l) * b_v * 2500 \quad (2-16)$$

$$M_{\max vi} = W_{vi} * \frac{(L_c)^2}{8} \quad (2-17)$$

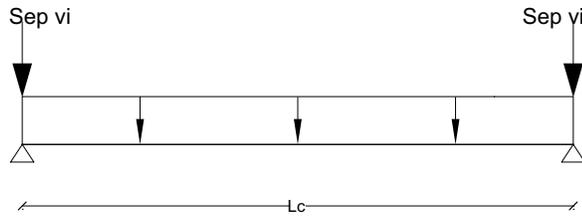


FIGURA 2-8. Carga Sobre Viga Interna

Para  $12 \text{ m} \leq L_c < 24 \text{ m}$   
 $W_{vi} = R_{vi} + (H_v - e_l) * b_v * 2500 \quad (2-18)$

$$P_{svi} = (H_s - e_l) * (S_v - b_v) * b_s * 2500 \quad (2-19)$$

$$M_{\max vi} = \frac{W_{vi} * (L_c)^2}{8} + \frac{P_{svi} * L_c}{4} \quad (2-20)$$

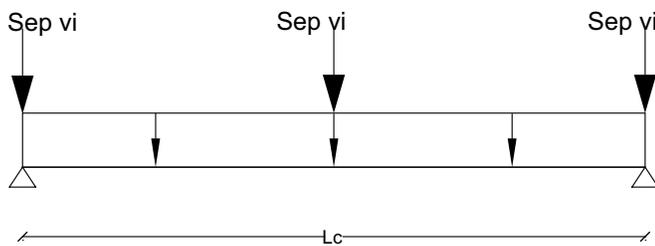


FIGURA 2-9. Carga Sobre Viga Interna

Para  $24 \text{ m} \leq L_c \leq 30 \text{ m}$   
 $W_{vi} = R_{vi} + (H_v - e_l) * b_v * 2500 \quad (2-21)$

$$P_{svi} = (H_s - e_l) * (S_v - b_v) * b_v * 2500 * 2 \quad (2-22)$$

$$M_{\max vi} = \frac{W_{vi} * (L_c)^2}{8} + \frac{(P_{svi} * L_c)}{3} \quad (2-23)$$

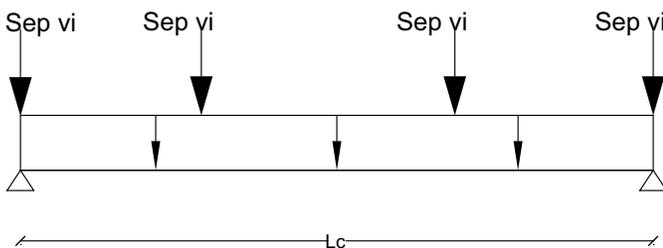


FIGURA 2-10. Carga Sobre Viga Interna

### 2.14 Cargas y momentos sobre viga interna y externa obtenida por el peso del pavimento

$$W_{wv pav} = R_{v pav} \quad (2-24)$$

$$M_{\max v epav} = W_{v epav} * \frac{(L_c)^2}{8} \quad (2-25)$$

$$W_{v ipav} = R_{v ipav} \quad (2-26)$$

$$M_{\max v ipav} = W_{v ipav} * \frac{(L_c)^2}{8} \quad (2-27)$$

En conclusión se obtienen los siguientes términos para la ecuación:

- $M_{cp1}$  y  $M_{cp2}$  para la viga externa
- $M_{cp1}$  y  $M_{cp2}$  para la viga interna
- $P_{sep}$  = Peso del separador, Kgf
- $P_{sve}$  = Peso del separador en la viga externa, Kgf
- $P_{svi}$  = Peso del separador en la viga interna, Kgf
- $R_g$  = Reacción en los gatos hidráulicos, Kgf
- $R_{ve}$  = Reacción que produce el peso de la losa y defensa sobre la viga externa, Kgf
- $R_{vi}$  = Reacción que produce el peso de la losa y defensa sobre la viga externa, Kgf
- $R_{ve pav}$  = Reacción que produce el peso del pavimento sobre la viga externa, Kgf
- $R_{vi pav}$  = Reacción que produce el peso del pavimento sobre la viga interna, Kgf
- $Sep_{ve}$  = Separador en la viga externa
- $Sep_{vi}$  = Separador en la viga interna
- $W_{baranda}$  = Peso de la baranda o defensa, Kgf/ml
- $W_v$  = Peso de la viga, Kgf/m
- $W_{ve}$  = Peso de la viga externa con las cargas de la losa y defensa, Kgf
- $W_{vi}$  = Peso de la viga interna con la losa y defensa, Kgf
- $W_{ve pav}$  = Peso de la viga externa con las cargas del pavimento, Kgf
- $W_{vi pav}$  = Peso de la viga interna con las cargas del pavimento, Kgf

### 2.15 Análisis para cargas variables

Sobre las calzadas de puentes, se coloca una sobrecarga vehicular de diseño designada como **HL-93**, que consiste en una combinación de:

- Camión de diseño o tándem de diseño, y
- Carga de carril de diseño.

En el predimensionado para hallar el Momento por carga variable del camión (**Mcv camión**) se colocará el camión de diseño en el centro del tramo, originando así una envolvente de momento llamada momento máximo maximorum ilustrada en el subtítulo 1.5.

Carga del carril de diseño.

Consistirá en una carga de 9,3 N/mm o 952 kgf/ml uniformemente distribuida en dirección longitudinal. Transversalmente la carga del carril de diseño se supondrá uniformemente distribuida en un ancho de 3 m. (AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 3.6.1.4)

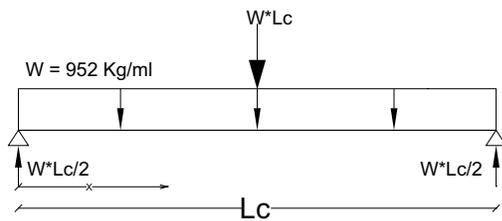


FIGURA 2-11. Representación de la carga distribuida equivalente

$$M_{max} = \frac{W * Lc^2}{8} \quad (2-28)$$

Se obtiene:

Momento por carga variable equivalente, (**Mcv equiv**).

### 2.16 Análisis de los Factores

Método de los factores de distribución para momento y corte. (AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 4.6.2.2.2).

El factor de distribución para corte se analiza en el capítulo IV, este factor es aplicado a las solicitaciones obtenidas por carga viva con el camión completo.

**Vigas Interiores:** El momento flector por sobrecarga para vigas interiores con tableros de concreto, se puede determinar aplicando la fracción por carril, según la ecuación:

$$F.D.Mvi = 0,075 + \left(\frac{s}{2900}\right)^{0,6} * \left(\frac{s}{L}\right)^{0,2} * \left(\frac{Kg}{Lt \frac{3}{s}}\right)^{0,1} = G_{interior} \quad (2-29)$$

(Tabla 4.6.2.2.2b-1 LRFD<sup>(1)</sup>)

El término  $\left(\frac{Kg}{Lt \frac{3}{s}}\right)^{0,1}$  en la etapa de diseño preliminar, se puede tomar igual a 1.

**Vigas Exteriores:** El momento flector por sobrecarga para vigas exteriores se determina aplicando la fracción por carril, g, especificada en: (Tabla 4.6.2.2.2d-1 LRFD<sup>(1)</sup>)

$$G = e * G_{interior} \quad (2-30)$$

$$e = 0,77 + \frac{de}{2800} \quad (2-31)$$

**Factor de impacto (F.I)** Las solicitaciones resultantes de las cargas vivas deben ser afectadas por un factor que considere las vibraciones y el impacto que produce el camión en movimiento sobre los elementos estructurales que componen el tablero.

Los efectos estáticos del camión o Tándem de diseño, a excepción de las fuerzas centrífugas y de frenado se deberán mayorar aplicando un incremento por carga dinámica (factor de impacto). El factor a aplicar a la carga estática se deberá tomar como:

$$F.I. = 1 + \frac{IM}{100} \quad (2-32)$$

$$F.I. = 33\% \quad (2-33)$$

(Tabla 3.6.2.1-1 LRFD'05)

### 2.17 Momentos últimos para vigas exteriores e interiores

$$Mu = 1,25Mcp1 + 1,5Mcp2 + 1,75(Mcv_{camion} * FD * FI * Mcv_{equiv} * FD) \quad (2-34)$$

(TABLA 3.4.1-1 AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>)

### 2.18 Ancho efectivo (Be)

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 4.6.2.6)

**Caso viga interna:**

El menor valor entre:

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{Lc}{4} \quad (2-35) \\ 12 * el + bv \quad (2-36) \\ Sv \quad (2-37) \end{array} \right.$$

**Caso viga externa:** el ancho de ala efectivo se puede tomar como la mitad de la separación entre vigas más el menor valor entre:

$$Be \leq \begin{cases} \frac{Lc}{8} & (2-38) \\ 6 * el + \text{Semiancho del alma de la viga} & (02-39) \end{cases}$$

Volado (2-40)

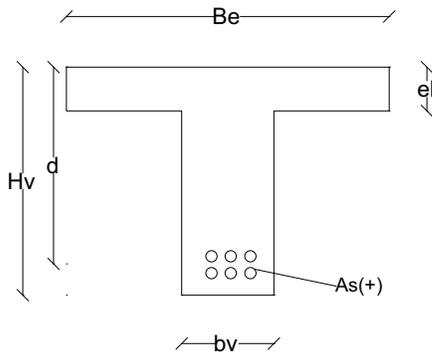


FIGURA 2-12. Detalle del ancho efectivo

### 2.19 Calculo de los aceros

Se calculan las áreas de acero (As), para vigas exteriores e interiores, empleando el método del Estado Limite de Agotamiento Resistente, aplicando la ecuación:

$$As = \frac{d - \sqrt{d^2 - \left( \frac{2 * Mu}{0,85 * \phi * f'c * Be} \right)}}{fy} \quad (2-41)$$

$f'c$  = resistencia del concreto a los 28 días (kgf/cm<sup>2</sup>)

$fy$  = Límite de cedencia del acero de refuerzo (kgf/cm<sup>2</sup>)

$d$  = altura útil (cm)

$Be$  = ancho efectivo para viga externa o interna, según el caso (cm)

$Mu$  = momento último obtenido para viga externa o interna, según el caso (kgf-cm)

$\phi = 0.90$  (factor de minoración de la resistencia teórica para flexión)

Se determina luego la diferencia porcentual entre el acero máximo (As mayor) y acero mínimo (As menor) calculados en las vigas del tablero del puente empleando la ecuación (00-01), ésta por criterios económicos debe ser menor al 10%, de resultar mayor se realiza de nuevo el predimensionado, variando la separación entre vigas y la longitud de los volados.

## 3. DISEÑO DE LA LOSA DEL TABLERO

El diseño de la losa del tablero consiste en calcular las solicitaciones últimas de momentos tanto para las cargas permanentes como para las cargas variables, analizándolas para la sección transversal del tablero en una franja de 1 m de ancho, en este modelo la losa se apoya transversalmente sobre las vigas.

Siguiendo las figuras 2-3 y 2-4, se obtienen los valores de máximo momento por cargas permanentes  $Mcp1$  (losa + defensas) y máximo momento por cargas permanentes  $Mcp2$  (pavimento), en los apoyos, en el tramo y en los volados por metro de ancho. Los momentos por carga variable  $Mcv$  se determinan en el punto 3.2

$$Mu_{(+)} = 1,25Mcp1 + 1,5Mcp2 + 1,75(Mcv * F.1) \quad (3-1)$$

$$Mu_{(-)} = 1,25Mcp1 + 1,5Mcp2 + 1,75(Mcv * F.1) \quad (3-2)$$

$$Mu_{(-)vol} = 1,25Mcp1 + 1,5Mcp2 + 1,75(Mcv * F.1) \quad (3-3)$$

(TABLA 3.4.1-1 AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>)

$Mu (+)$  = solicitación ultima por momento flector en el tramo.

$Mu (-)$  = solicitación ultima por momento flector en el apoyo interior.

$Mu (-) vol$  = solicitación ultima por momento flector en el apoyo extremo.

### 3.1 Análisis para las solicitaciones de momento por cargas permanentes.

Se considera el análisis de las cargas permanentes por separado, determinándose los **Mcp1** y **Mcp2**. (Ver figuras 2-3 y 2-4)

### 3.2 Ecuaciones de Momento por Carga Variable (Mcv):

$Mcv$  camión, Momentos en el tablero debido a las sobrecargas.

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 4.6.2.1.8)

Los momentos en el tablero debidos a la sobrecargas en N-mm/mm se determinan como:

- Barras principales perpendiculares a la dirección del tráfico:

Para  $L \leq 3000$  mm

$$Mcv = 1290 * D^{0,197} * L^{0,459} * C \quad (3-4)$$

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> 4.6.2.1.8-1)

Para  $L > 3000$  mm

$$M_{cv} = \frac{5300 * D^{0,188} * (L^{1,35} - 20400)}{L} (C) \quad (3-5)$$

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> 4.6.2.1.8-2)

- Barras principales paralelas a la dirección del tráfico:

Para  $L \leq 3000$  mm

$$M_{cv} = 408 * D^{0,123} * L^{0,64} * C \quad (3-6)$$

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> 4.6.2.1.8-3)

Para  $L > 3000$  mm

$$M_{cv} = \frac{3405 * D^{0,138} * (L^{1,429} - 34900)}{L} (C) \quad (3-7)$$

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> 4.6.2.1.8-4)

Donde:

$L$  = longitud de tramo entre centros de los apoyos (mm)

$C$  = factor de continuidad igual a 1,0 para tramos simplemente apoyados y 0,8 para tramos continuos

$D = D_x/D_y$

$D_x$  = rigidez flexional del tablero en la dirección de las barras principales (N-mm<sup>2</sup>/mm)

$D_y$  = rigidez flexional del tablero perpendicular a la dirección de las barras principales (N-mm<sup>2</sup>/mm)

Para los tableros emparillados,  $D_x$  y  $D_y$  se deben calcular como  $E \cdot I_x$  y  $E \cdot I_y$  siendo  $E$  el módulo de elasticidad e  $I_x$ ,  $I_y$  el momento de inercia por unidad de ancho del tablero, considerando la sección fisurada y utilizando el método de las áreas transformadas para la dirección de las barras principales y perpendicular a la dirección de las barras principales, respectivamente.

Para hallar el valor de  $I_x$ , la sección transversal del tablero corresponde a una figura compuesta y por lo tanto se deben utilizar las siguientes ecuaciones:

$$I_x = \bar{I}_x + A * d^2 \quad (3-8)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i * A_i}{\sum A_i} \quad (3-9)$$

$$\bar{I}_x = \frac{b * h^3}{12} \quad (3-10)$$

**Momento por carga variable en el volado**

(AASHTO<sup>(4)</sup> Art. 2.7)

Se analiza el efecto que causaría el impacto de un camión contra la defensa, en la figura 03-01 se muestra el esquema de impacto indicado por la norma.

$$b = 0,8 + \text{espesor del pavimento} + \frac{\text{espesor de la losa}}{2} \quad (3-11)$$

$b$  = brazo de impacto

$$M_{cv \text{ volado}} = 4536 \text{ kgf} * b \quad (3-12)$$

$M_{cv \text{ volado}}$  = Momento por carga viva en volados originado por impacto de camión

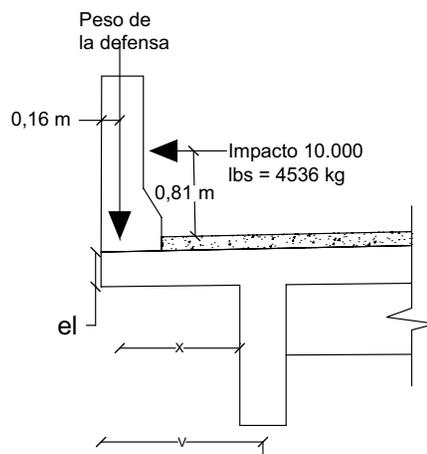


FIGURA 3-1. Esquema que muestra la fuerza del impacto indicado por la norma AASHTO Standard

El ancho de distribución del impacto  $e$  en metros (m) se determina de la siguiente manera:

$$e = 0,80 * X + 1,514 \quad (3-13)$$

(AASHTO<sup>(4)</sup> Art. 3.24.5.2)

$X$  es la distancia horizontal de distribución de la carga de impacto en metros (m)

$$x = v - \left( \frac{bv}{2} \right) - 0,16m \quad (3-14)$$

Donde,  $V$  es volado del tablero,  $bv$  el ancho de la viga y a 0.16 m se encuentra el centroide de la baranda.

El momento por carga viva en el volado originado por el impacto de camiones se distribuye en un ancho  $e$ , en la figura 03-02 se esquematiza el ancho de distribución del impacto en los volados del tablero:

$$M_{cv \text{ volado}} = \frac{M_{cv \text{ volado}}}{e} \quad (3-15)$$

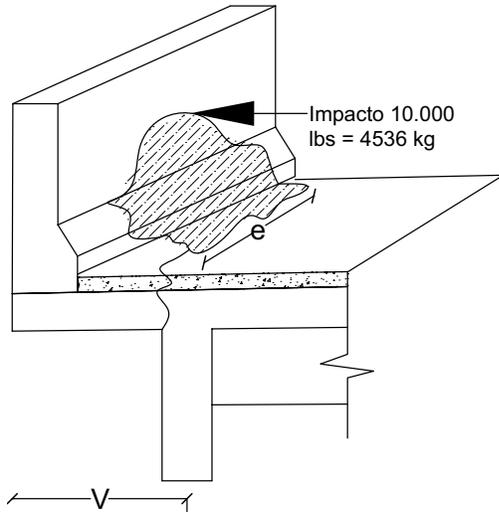


FIGURA 3-2. Distribución del impacto en volados del tablero.

### 3.3 Análisis de los factores

#### Factor impacto (F.I)

Las solicitaciones resultantes de las cargas vivas deben ser afectadas por un factor que considere las vibraciones y el impacto que se produce en el elemento al entrar un camión en la vía.

Ver Subcapítulo 2.16, ecuaciones (2-32) y (2-33)

Sección transversal de la losa (despieces):

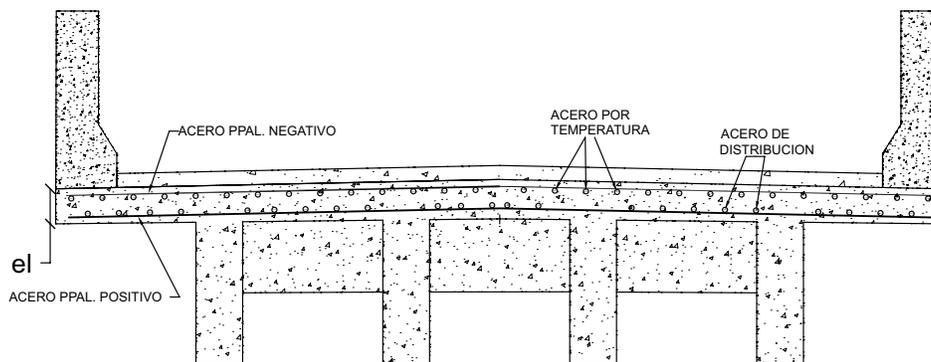


FIGURA 3-3. Aceros en la Sección transversal de la losa.

Sección longitudinal de la losa (despieces):

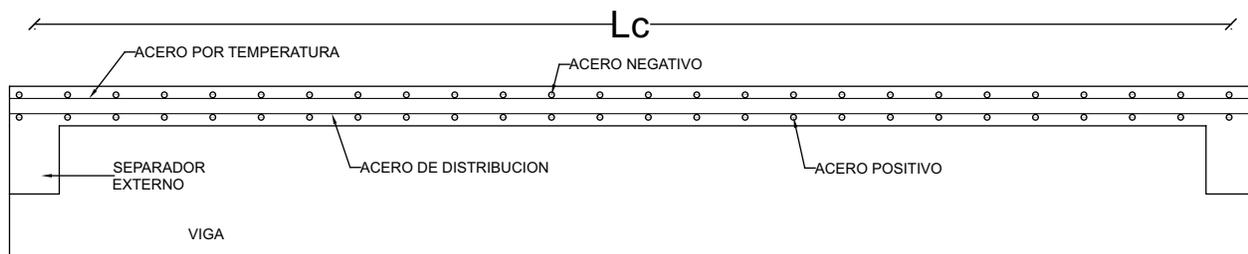


FIGURA 3-4. Aceros en la sección longitudinal de la losa.

### 3.4 Calculo de aceros

#### • Aceros principales

Se calculan las áreas de acero ( $A_s$ ), para los momentos últimos perpendicular a la dirección del tráfico, tanto positivo (tramos), negativo (apoyos internos) y negativo en volados, con la expresión (2-41).

#### • Armadura de distribución

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 9.7.3.2)

Para la armadura principal perpendicular a la dirección del tráfico:

$$\frac{3840}{\sqrt{S}} \leq 67\% \quad (3-16)$$

$S$  = Longitud libre entre vigas (mm)

#### • Armadura por retracción y temperatura

$$A_s (\text{temperatura}) = 2/1000 * b * e \quad (3-17)$$

(COVENIN<sup>(6)</sup> 7.7)

Se considera una faja de 1m ancho de losa,  $b = 100$  cm. En las figuras 03-03 y 03-04 se indica la disposición de los aceros de refuerzo de la losa del tablero indicados anteriormente.

## 4. DISEÑO DE VIGAS

Una vez definido el pre-diseño de las vigas, en la siguiente etapa se procede a realizar el diseño de los elementos que conforman el tablero (losa, vigas y separadores).

Para el diseño de las vigas se procede a calcular las solicitaciones últimas de Corte y Momento en diferentes secciones de las mismas, variando la posición de la sobrecarga vehicular de diseño (HL-93) en la luz de cálculo correspondiente.

El corte último se determina según la combinación:

$$Vu = 1,25Vcp1 + 1,5Vcp2 + 1,75(Vcv_{camion} * F.D. * F.I + Vcv_{equiv} * F.D.) \quad (4-1)$$

Y el momento último según la combinación:

$$Mu = 1,25Vcp1 + 1,5Vcp2 + 1,75(Vcv_{camion} * F.D. * F.I + Vcv_{equiv} * F.D.) \quad (4-2)$$

(TABLA 3.4.1-1 AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>)

### 4.1 Ecuaciones de Corte y Momento por Carga Permanente.

Vcp 1 y Mcp 1: (solicitaciones de corte y momento con el peso de la losa, vigas, separadores y defensas).

Vcp 2 y Mcp 2: (solicitaciones de corte y momento producidas por el peso del pavimento).

- Wv: cargas distribuidas sobre las vigas internas y externas originadas por el peso propio de los elementos las cuales se han analizado por separado en el Capítulo II, obteniendo:
- Wv, obtenido por los pesos de la losa, vigas y separadores. (ver ecuaciones para vigas externas 2-08, 2-10, 2-13 y para vigas internas 2-16, 2-18, 2-21).

Wvpav, obtenido por el peso del pavimento. (ver ecuaciones para vigas externas 2-24 y para vigas internas 2-26).

Para  $L_c < 12 \text{ m}$

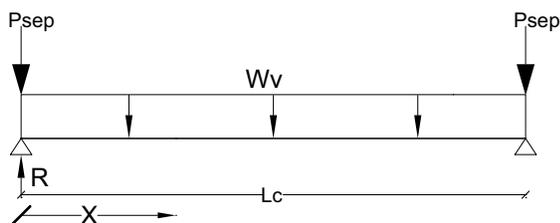


FIGURA 4-1. Esquema de Carga en viga sin separador interno

**Ecuaciones de fuerza cortante y momento flector para cargas permanentes debido a peso propio de la viga, losa y separadores:**

$$Vcp\ 1(x) = R - Psep - Wv * X \quad (0 \leq X < Lc) \quad (4-3)$$

$$Mcp\ 1(x) = (R - Psep) * X - \frac{Wv * X^2}{2} \quad (0 \leq X < Lc) \quad (4-4)$$

**Ecuaciones de fuerza cortante y momento flector para carga permanente debido a pavimento:**

$$Vcp\ 2(x) = R - Wv\ pav * X \quad (0 \leq X < Lc) \quad (4-5)$$

$$Mcp\ 2(x) = R * X - \frac{Wv\ pav * X^2}{2} \quad (0 \leq X < Lc) \quad (4-6)$$

Para  $12 \text{ m} \leq L_c < 24 \text{ m}$

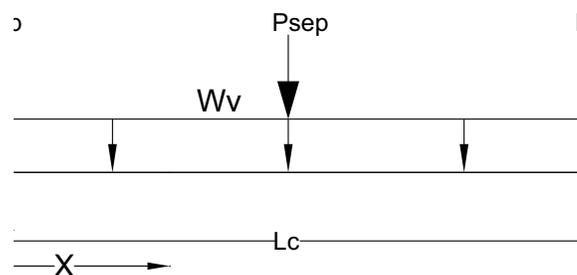


FIGURA 04-02. Esquema de Carga en viga con un separador interno

**Ecuaciones de fuerza cortante y momento flector para cargas permanentes debido a peso propio de la viga, losa y separadores:**

$$Vcp\ 1(x) = R - Psep - Wv * X \quad (0 \leq X < Lc/2) \quad (4-7)$$

$$Mcp\ 1(x) = (R - Psep) * X - \frac{Wv * X^2}{2} \quad (0 \leq X < Lc/2) \quad (4-8)$$

**Ecuaciones de fuerza cortante y momento flector para carga permanente debido a pavimento:**

$$Vcp\ 2(x) = R - Wv\ pav * X \quad (0 \leq X < Lc) \quad (4-09)$$

$$Mcp\ 2(x) = R * X - \frac{Wv\ pav * X^2}{2} \quad (0 \leq X < Lc) \quad (4-10)$$

Para  $24 \text{ m} \leq L_c < 30 \text{ m}$

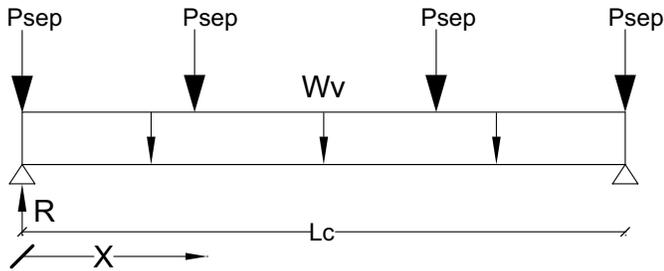


FIGURA 4-3. Esquema de Carga en viga con dos separadores internos

**Ecuaciones de fuerza cortante y momento flector para cargas permanentes debido a peso propio de la viga, losa y separadores:**

$$V_{cp1}(x) = R - P_{sep} - W_v * X \quad (0 \leq X \leq L_c/3) \quad (4-11)$$

$$V_{cp1}(x) = R - 2P_{sep} - W_v * X \quad (L_c/3 < X \leq L_c/2) \quad (4-12)$$

$$M_{cp1}(x) = (R - P_{sep}) * X - \frac{W_v * X^2}{2} \quad (0 \leq X \leq L_c/3) \quad (4-13)$$

$$M_{cp1}(x) = R * X - P_{sep} * X - P_{sep} \left( X - \frac{L_c}{3} \right) - \frac{W_v * X^2}{2} \quad (L_c/3 \leq X \leq L_c/2) \quad (4-14)$$

**Ecuaciones de fuerza cortante y momento flector para carga permanente debido a pavimento:**

$$V_{cp2}(x) = R - W_v p_{av} * X \quad (0 \leq X < L_c) \quad (4-15)$$

$$M_{cp2}(x) = R * X - \frac{W_v p_{av} * X^2}{2} \quad (0 \leq X < L_c) \quad (4-16)$$

#### 4.2 Ecuaciones de Corte y Momento por Cargas Variables.

La norma AASHTO LRFD, estudia las cargas variables sobre un puente, colocando una sobrecarga vehicular de diseño denominada **HL-93**, el cual consiste en una combinación de:

**Camión de diseño** o tándem de diseño y se obtienen los valores de  $V_{cv}$  camión y  $M_{cv}$  camión con las envolventes de corte y de momento cuyas ecuaciones son presentadas en el Capítulo I.

**Carga de trocha o carril de diseño.** Consiste en una carga uniformemente distribuida en la dirección longitudinal equivalente 952 Kg/m aplicada en un ancho de trocha de 3.05m.

Las ecuaciones con las envolventes de Corte y Momento por carga de camión de diseño (H20 o HS20) están descritas en el CAPITULO I.

**Ecuaciones de diseño por carga equivalente de trocha o carril de diseño.**

$$W_{cv\ equiv} = 952 \text{ kgf/ml} \quad (4-17)$$

$$V(x)_{cv\ equiv} = W_{cv\ equiv} * \frac{L_c}{2} - W_{cv\ equiv} * X \quad (04-18)$$

$$M(x)_{cv\ equiv} = W_{cv\ equiv} * \frac{L_c}{2} * X - \frac{W_{cv\ equiv} * X^2}{2} \quad (4-19)$$

#### 4.3 Factores

En este capítulo se describen los factores de distribución (F.D.) de corte y momento y el factor de impacto F.I. de la norma AASHTO LRFD.

**Factor de distribución para Corte y Momento.** (AASHTO LRFD '05 Art. 4.6.2.2.2).

Se calculan los factores de distribución para Corte y Momento de vigas exteriores e interiores, obteniendo los siguientes valores: F.D.  $V_{vi}$  y F.D.  $M_{vi}$ .

**Factor de Distribución para Momento en Vigas Interiores:** El momento flector por sobrecarga para vigas interiores con tableros de concreto, se puede determinar aplicando la fracción por carril, según la ecuación: (AASHTO LRFD '05 Art. 4.6.2.2.2b)

$$F.D.M_{vi} = 0,075 + \left( \frac{s}{2900} \right)^{0,6} * \left( \frac{s}{L} \right)^{0,2} * \left( \frac{Kg}{L_t \frac{3}{s}} \right)^{0,1} =$$

$$g_{interior} \quad (4-20)$$

(Tabla 4.6.2.2.2b-1 LRFD<sup>(1)</sup>)

En el diseño de la viga, se desarrolla el término

$$\left( \frac{Kg}{L_t \frac{3}{s}} \right)^{0,1} \text{ donde Kg es un parámetro de rigidez longitudinal}$$

y se toma como:

$$Kg = n(I + Ae_g^2) \quad (4-21)$$

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Ecu. 4.6.2.2.1-1).

$$n = \frac{E_B}{E_D}, \text{ donde:} \quad (4-22)$$

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Ecu. 4.6.2.2.1-2)

S = separación entre vigas o almas (mm)

$L$  = longitud de tramo de la viga (mm)

$t_s$  = profundidad de la losa de hormigón (mm)

$E_B$  = módulo de elasticidad del material de la viga (MPa)

$E_D$  = módulo de elasticidad del material del tablero (MPa)

$I$  = momento de inercia de la viga (mm<sup>4</sup>)

$A$  = área de la viga (mm<sup>2</sup>)

$e_g$  = distancia entre los centros de gravedad entre la viga de base y el tablero (mm)

**Factor de Distribución para Momento Vigas Exteriores:** El momento flector por sobrecarga para vigas exteriores se determina aplicando la fracción por carril,  $g$ , especificada en:

$$g = e * g_{interior} \quad (4-23)$$

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 4.6.2.2.2d)

$$e = 0,77 + \frac{de}{2800} \quad (04-24)$$

(Tabla 4.6.2.2.2d-1 LRFD<sup>(1)</sup>)

**Factor de distribución para corte** (AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 4.6.2.2.3)

**Factor de Distribución para Corte en Vigas Exteriores:** (AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 4.6.2.2.3a)

$$F.D.Vvi = 0,2 + \frac{S}{3600} - \left( \frac{S}{10700} \right)^{2,0} \quad (4-25)$$

**Factor de Distribución para corte en Vigas Exteriores:**

$$g = e * g_{interior} \quad (4-26)$$

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 4.6.2.2.3b)

$$e = 0,6 + \frac{de}{3000} \quad (4-27)$$

(Tabla 4.6.2.2.3b-1 LRFD<sup>(1)</sup>)

**Factor impacto (F.I.)** Las solicitaciones resultantes de las cargas vivas deben ser afectadas por un factor que considere las vibraciones y el impacto que se produce en el elemento al entrar un camión en la vía.

Ver Subcapítulo 2.16, ecuaciones (2-32) y (2-33)

#### 4.4 Solicitaciones de Corte y Momentos últimos

$$Vu = 1,25 Vcp1 + 1,5Vcp2 + 1,75 (Vcv_{camion} * F.D. * F.1. + Vcv_{equiv} * F.D.) \quad (4-28)$$

$$Mu = 1,25 Vcp1 + 1,5Vcp2 + 1,75 (Vcv_{camion} * F.D. * F.1. + Mcv_{equiv} * F.D.) \quad (4-29)$$

(TABLA 3.4.1-1 AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>)

A partir del máximo valor de momento en el tramo de la viga, se calcula el área de acero total positivo y el área de acero mínimo. Con el área de acero total se distribuyen los aceros según los criterios de la norma AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> y se halla la altura útil real correspondiente al arreglo realizado en esa sección.

Con la altura útil se calcula el momento resistente y se debe cumplir que:

$$\Phi Mr \geq Mu \quad (4-30)$$

Luego se procede a construir la envolvente de acero, eliminando parte de las capas de acero colocado, al acero restante se le calcula el Momento resistente ( $Mr$ ) y estos valores se grafican en la envolvente de momento con una línea horizontal interceptando la parábola de momentos últimos. La longitud horizontal resultante entre la intercepción de la parábola y la línea horizontal representa la longitud de cada capa de acero eliminada, de esta manera se obtiene la longitud correspondiente de cada capa de acero para el despiece de la viga, las capas se eliminan hasta cumplir con el área de acero mínimo que debe llegar hasta los apoyos, esta cantidad mínima no debe ser inferior a un tercio del acero máximo colocado.

#### 4.5 Ancho efectivo

(Ver sub capítulo 2-18)

#### 4.6 Calculo de los aceros

- **Aceros inferiores de la viga o aceros positivos**

(Ver sub capítulo 2-19)

- **Acero negativo en vigas o acero superior**

Se calcula el área de acero mínimo (negativo) o superior de la viga con la ecuación:

$$AS_{min} = \frac{14}{fy} * bv * d \quad (4-31)$$

- **Acero de paramento**

Se calcula el área de acero de paramento de la viga tomando el 10 % del área de acero principal y se distribuye en ambas caras de la viga.

$$AS_{(p)} = 10\% * AS_{(+)} \quad (4-32)$$

#### 4.7 Diagrama de WHITNEY

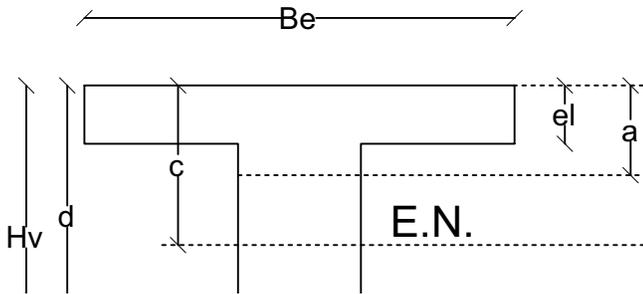


FIGURA 4-4. Diagrama de Whitney para Elementos de Concreto.

Si  $a < el$  se comporta como sección rectangular y:

$$C = 0,85 * f'c * Be * a \quad (4-33)$$

$$T = As * fy \quad (4-34)$$

Equilibrio:  $C = T$

$$0,85 * f'c * Be * a = As * fy \quad (4-35)$$

$$a = \frac{As * fy}{0,85 * f'c * Be} = \frac{As}{\tilde{n}} \quad (4-36)$$

$$\tilde{n} = \frac{0,85 * f'c * Be}{fy} \quad (4-37)$$

$$Mr = T * z = As * fy * \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (4-38)$$

$$Mr = As * fy * \left(d - \frac{As * fy}{2 * 0,85 * f'c * Be}\right) \quad (4-39)$$

$d'$  = centro de gravedad del acero distribuido en el arreglo

$$d = Hv - d'$$

$$\Phi = 0,90$$

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.5.4.2)

$Mr$  = Momento nominal resistente

**Debe cumplirse:  $\Phi Mr \geq Mu$**

$$AS_{min} = \frac{AS_{(+)}}{3} \quad (4-40)$$

#### 4.8 Diseño por flexión

##### Prolongación de la armadura

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.1.2.1)

$$Pa \geq \begin{cases} d & (4-41) \\ 15\Phi & (4-42) \\ 1/20 \text{ (de la luz libre del tramo)} & (4-43) \end{cases}$$

##### Anclaje de las armaduras

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.2)

##### Longitud de anclaje en tracción (ldb)

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.2.1.1)

$$ldb \geq \begin{cases} \frac{0,02 * Ab * fy}{\sqrt{f'c}} \text{ (para barras N° 36 y menores)} & (4-44) \\ 0,06 * db * fy & (4-45) \\ 30 \text{ cm} & (4-46) \end{cases}$$

$Ab$  = área del acero de corte (mm<sup>2</sup>)

$Fy$  = resistencia cedente especificada del acero de refuerzo (MPa)

$f'c$  = resistencia especificada del concreto en compresión (MPa)

$db$  = diámetro de la barra o alambre (mm)

##### Longitud de anclaje en compresión (ldb)

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.2.2.1)

$$Ldb \geq \begin{cases} \frac{0,24 * db * fy}{\sqrt{f'c}} & (4-47) \\ 0,044 * db * fy & (4-48) \\ >20 \text{ cm} & (4-49) \end{cases}$$

##### Paquetes de barras

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.2.3)

##### Ganchos normales en tracción

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.2.4)

##### Empalme de las barras de armadura

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.5)

##### Empalmes solapados

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.5.2.1)

##### Empalmes solapados solicitados a tracción

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.5.3.1)

La longitud de solape de los empalmes traccionados no deberá ser mayor que 300 mm o los siguientes valores, según se trate de empalmes Clase A, Clase B o Clase C.

- Empalmes clase A.....1,0 ld
- Empalmes clase B.....1,3 ld
- Empalmes clase C.....1,7 ld

La clase de empalme solapado requerido para las barras conformadas y el alambre conformado en tracción será como se especifica en la tabla 1.

Relación ( $A_s$ provista) ( $A_s$ requerida)	Porcentaje de $A_s$ empalmado con la longitud de solape requerida		
	50	75	100
$\geq 2$	A	A	B
$< 2$	B	C	C

Para la elaboración del manual, se calculo con el empalme clase B

### Empalmes solapados solicitados a compresión (AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.5.5.1)

La longitud de solape,  $l_c$ , para los empalmes solapados comprimidos no deberá ser menor que 300 mm o como se especifica a continuación:

- Si  $f_y \leq 420$  MPa entonces:  
 $l_c = 0,073 \text{ m} * f_y * d_b$  (4-50)  
 (AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.5.5.1-1)

- Si  $f_y > 420$  MPa entonces:  
 $l_c = m (0,13 * f_y - 24,0) d_b$  (4-51)  
 (AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.11.5.5.1-2)

$m = 1$   
 $f_y = \text{MPa}$   
 $d_b = \text{mm}$

### Acero de paramento

$A_{s(p)} = 10\% * A_{s(+)}$  (04-52)  
 (AASHTO Art. 8.17.2.1.3)

### Acero negativo o superior de la viga

$A_{s(-)} = \frac{14}{f_y * d * d_v}$  (04-53)  
 (COVENIN 10-1b)

### Recubrimiento de hormigón

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.12.3)

Ver tabla donde se muestran los recubrimientos para armaduras principales no protegidas. (Tabla 5.12.3-1 LRFD<sup>(1)</sup>)

### Separación de la armadura

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.10.3)

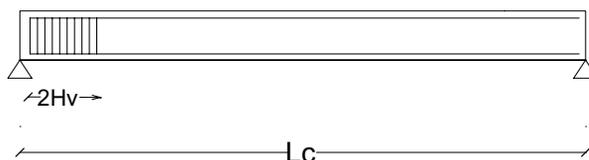
### Mínima Separación de la Armadura

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.10.3.1)

Para el hormigón colado in situ, la distancia libre entre barras paralelas ubicadas en una capa no deberá ser menor que:

- 1,5 veces el diámetro nominal de las barras.
- 1,5 veces el tamaño máximo del agregado grueso o
- 38 mm

### COLOCACION DE LOS ESTRIBOS EN ZONA SISMICA



### Múltiples capas de Armadura

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.10.3.1.3)

Las barras de las capas superiores se deberán ubicar directamente sobre las de la capa inferior, y la distancia libre entre capas deberá ser mayor o igual que 25 mm o el diámetro nominal de las barras.

### 4.9 Diseño por corte

(AASHTO<sup>(4)</sup> Art. 6.16.6, Art. 8.19)

$V_r > \frac{V_u}{\Phi}; \Phi = 0,85$  (04-54)

$\frac{V_u}{\Phi} = V_c + V_s$  (04-55)

$V_s = \frac{V_u}{\Phi} - V_c$  (04-56)

$V_c = 0,53 * \sqrt{f'c} * b_v * d$  (04-57)

$\frac{A_r}{S_{req}} = \frac{V_s}{f_y * d}$  (04-58)

$A_r = A_o * n$  (04-59)

$V_r$  = Corte nominal (Kgf)

$V_u$  = Corte último (kgf)

$V_c$  = Corte del concreto (kgf)

$V_s$  = Corte a soportar por el acero (kgf)

$A_r$  = área de la armadura transversal (cm<sup>2</sup>)

$S_{req}$  = separación requerida (cm)

$A_o$  = área de la barra (cm<sup>2</sup>)

$n$  = N° de ramas

**Mínima armadura transversal**

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.8.2.5)

El área de acero deberá satisfacer la siguiente condición:

$$A_v \geq 0,083 * \sqrt{f'c} * \frac{B_v * S}{f_y} \tag{4-60}$$

(AASHTO LRFD '05 Art. 5.8.2.5-1)

$A_v$  = área de la armadura transversal en una distancia  $S$  (mm<sup>2</sup>)

$b_v$  = ancho del alma (mm)

$S$  = separación de la armadura transversal (mm)

$f_y$  = tensión de fluencia de la armadura transversal (MPa)

**Máxima separación de la armadura transversal**

AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.8.2.7)

La separación de la armadura transversal no deberá ser mayor que la máxima separación admisible,  $S_{max}$ , determinada de la siguiente manera:

Si  $V_u < 125 * f'c$ :

$$S_{max} = 0,8 * d_v \leq 600 \text{ mm} \tag{4-61}$$

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.8.2.7-1)

Si  $V_u \geq 125 * f'c$ :

$$S_{max} = 0,4 * d_v \leq 300 \text{ mm} \tag{4-62}$$

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.8.2.7-2)

Donde:

$V_u$  = tensión de corte (MPa)

$d_v$  = (MPa), altura de corte efectiva de acuerdo con lo definido en el artículo (AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 5.8.2.9)

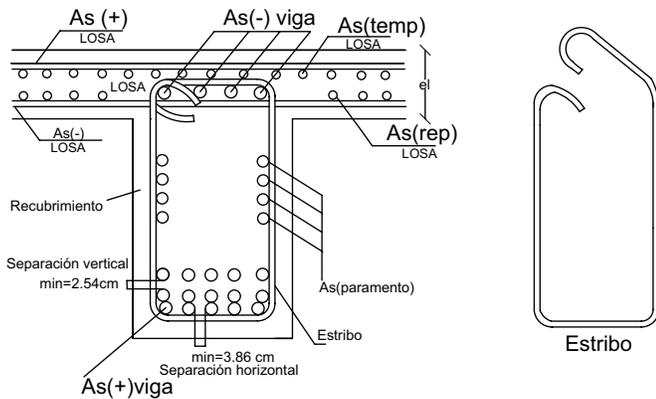


FIGURA 4-5. Detallado de una viga en Sección transversal

**5. DISEÑO DEL SEPARADOR EXTERNO**

Los separadores externos se ubican en los extremos del puente, forman una parrilla junto con las vigas longitudinales del tablero, entre sus funciones más importantes se pueden citar:

- Dan rigidez transversal al tablero.
- Permite realizar el mantenimiento de los aparatos de apoyo dando soporte a gatos hidráulicos empleados para levantar el tablero.

**5.1 Análisis de carga para las solicitaciones ultimas de corte y momento:**

Se procede con el cálculo del peso total del tablero del puente.

*Peso - Losa* =  $el * y_c * At * Lt$

*Peso - barandas* =  $w b * 2 * Lt$

*Peso pavimento* =  $Ap * Lt * ep * y_{asf}$

*Peso - vigas* =  $(Hv - el) * bv + Lt * N^0v * y_c$

*Peso - separador* =  $Psep * N^0 sep$

Donde:

$el$  = Espesor de la losa, m

$c$  = Peso unitario del concreto reforzado, Kg/m<sup>3</sup>

$AT$  = Ancho del tablero, m

$Lt$  = Longitud total, m

$W$  baranda = Peso de la baranda o defensa, Kg/m

$Ap$  = Ancho del pavimento, m

$ep$  = espesor del pavimento, m

$asf$  = Peso unitario del asfalto, Kg/m<sup>3</sup>

$Hv$  = Altura de la viga, m

$bv$  = Base de la viga, m

$N$  = número de vigas

$Psep$  = Peso del separador, Kg

$N^0 sep$  = Numero de separadores

Se obtiene: Peso total del tablero (kgf)

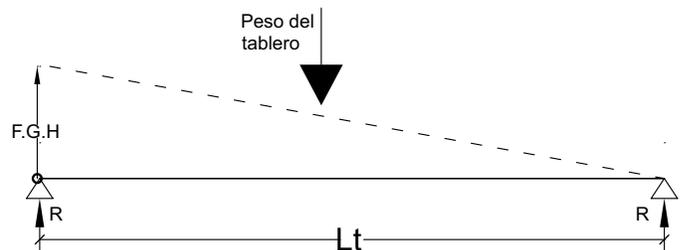


FIGURA 5-1. Esquema que representa el levantamiento del tablero para mantenimiento de aparatos de apoyo

Cada Gato Hidráulico debe levantar =  $R / n^{\circ}$  tramos del separador externo

$R$  = Reacción total en el apoyo izquierdo o derecho del tablero

F.G.H. = Fuerza del Gato Hidráulico

$P_t$  = Peso total del tablero

Reacción en los Gatos Hidráulicos ( $R_g$ ). Ver figura (05-02)

$R_g = P_t / 2 / 3$  (en el caso de que sean 3 tramos de separadores).

Reacción en las vigas ( $R_v$ ). Ver figura (5-2)

$R_v = P_t / 2 / 4$  (en el caso de que sean 4 vigas) =  $V_{max}$

$V_{cp}$  = , fuerza cortante máxima por carga permanente en el separador externo

$M_{cp}$  = , momento flector máximo por carga permanente en el separador externo.

Se procede con el cálculo del peso total del tablero del puente.

Cargas permanentes 1 ( $Cp1$ ): pesos de la losa, barandas, vigas y separadores.

Cargas permanentes 2 ( $Cp2$ ): peso del pavimento.

**Cp1:**

$Peso - Losa = e l * y_c * A t * L t$

$Peso - barandas = w b * 2 * L t$

$Peso pavimento = A p * L t * e p * y_{asf}$

$Peso - vigas = (H v - e l) * b v + L t * N^{\circ} v * y_c$

$Peso - separador = P sep * N^{\circ} sep$

**Cp2:**

$Peso pavimento = A p * L t * e p * y_{asf}$

Se obtiene: Peso total del tablero para  $Cp1$  y  $Cp2$  (kgf)

**Corte Último:** Ver figura (5-2) y/o (5-3)

$V_u = 1,25 * V_{cp1} + 1,5 * V_{cp2}$  (5-1)

**Momento Último:** Ver figura (5-2) y/o (5-3)

$M_{u(+)} = 1,25 * M_{cp1} + 1,5 * M_{cp2}$  (5-2)

$V_{cp}$  = , fuerza cortante máxima por carga permanente en el separador externo

$M_{cp}$  = , flector máximo por carga permanente en el separador externo

**5.2 Diagramas de fuerza cortante y momento flector por Carga Permanente en Carreteras Principales**

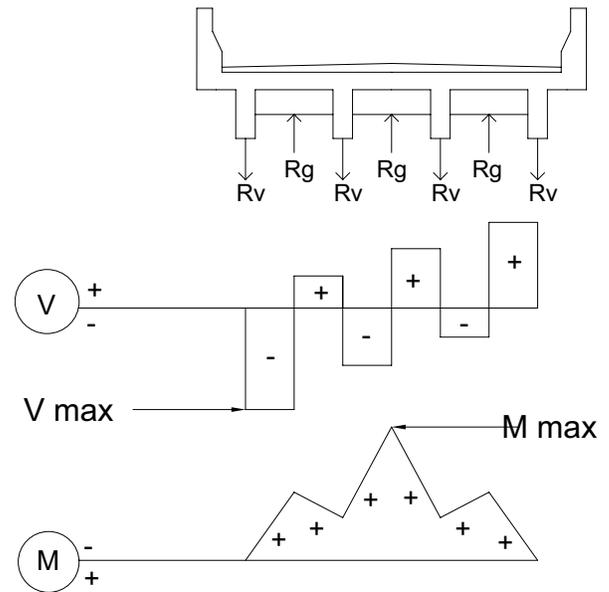


FIGURA 5-2. Diagramas de fuerza cortante y momento flector para puentes carreteros principales.

$R_v$  = reacción del peso del tablero en la viga

$R_g$  = reacción del peso del tablero en el gato hidráulico. Es la capacidad que debe tener un gato hidráulico para levantar el tablero.

**5.3 Diagramas de fuerza cortante y momento flector por Carga Permanente en Carreteras Secundarias**

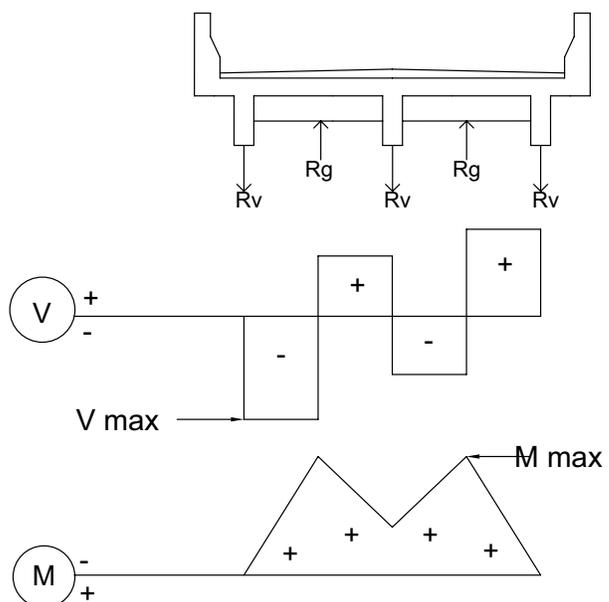


FIGURA 5-3. Diagramas de fuerza cortante y momento flector para puentes carreteros secundarios

### 5.4 Calculo de los aceros

- **Acero principal o superior**  
Ver subtítulo 2.19
- **Acero secundario o inferior**  
Ver ecuación 4-31
- **Acero de paramento**  
Ver ecuación 4-32

### 5.5 Diseño por flexión y Diseño por corte

Ver subtítulos 4.8 y 4.9

#### Sección transversal del separador externo para puentes principales y secundarios

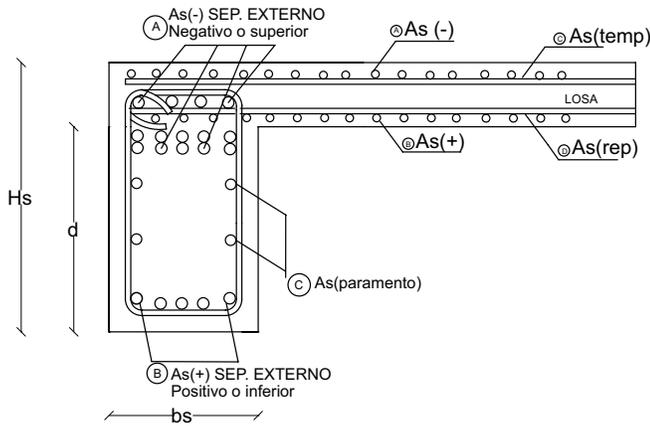


FIGURA 5-4. Sección transversal de un separador externo y posición de los aceros del separador y de la losa.

#### Sección longitudinal del separador externo para puentes principales y secundarios

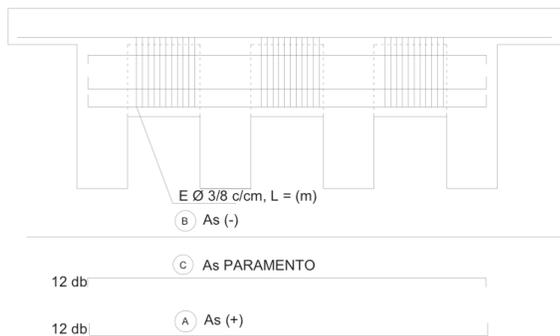


FIGURA 5-5. Sección longitudinal de un separador externo y su despiece.

## 6. DISEÑO DEL SEPARADOR INTERNO

Los separadores internos se colocan en puentes de concreto armado con longitud igual o superior a los 12 m, los separadores aportan rigidez transversal al tablero.

### 6.1 Hipótesis de diseño

- Elementos de rigidez infinita
- Cuerpos rígidos
- Apoyos elásticos

Para el modelado de las cargas variables, se supone el separador interno como un cuerpo rígido, apoyado sobre resortes con rigidez (K) que simulan los apoyos.

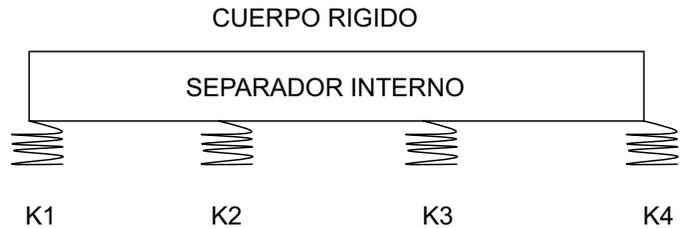


FIGURA 6-1. Modelo estructural del Separador Interno

**Centro elástico:** Punto del elemento estructural sobre el cual al aplicar una carga o fuerza produce las mismas deformaciones en cada uno de los apoyos elásticos. En el ejemplo de la figura 06-01, si la carga se aplica en el centro elástico a cada resorte le corresponde la carga aplicada entre cuatro (F/4).

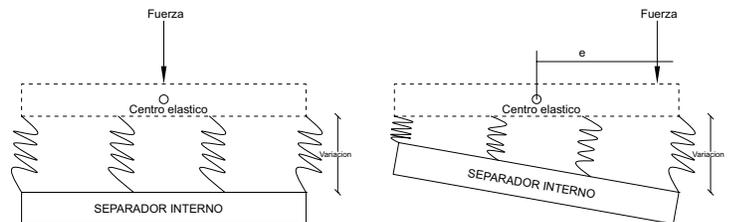


FIGURA 6-2. Cargas en el Centro y Fuera del Centro Elástico

### 6.2 Análisis de carga para las solicitaciones ultimas de corte y momento:

$$Vu = 1,25 * V_{cp1} + 1,75(V_{cv_{vehiculo}} * Fi * fL + V_{cv_{equiv}} * FL) \quad (6-1)$$

$$Mu_+ = 1,25 * V_{cp1} + 1,75(V_{cv_{vehiculo}} * Fi * fL + M_{cv_{equiv}} * FL) \quad (6-2)$$

$$Mu_- = 1,25 * V_{cp1} + 1,75(V_{cv_{vehiculo}} * Fi * fL + M_{cv_{equiv}} * FL) \quad (6-3)$$

(TABLA 3.4.1-1 AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>)

6.3 Análisis para las solicitaciones de corte y momento por cargas permanentes.

**Norma AASHTO LRFD**

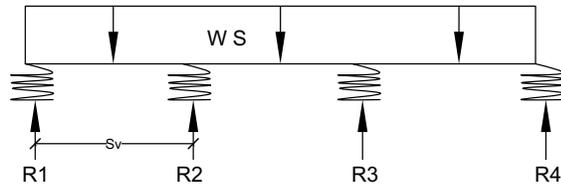


FIGURA 6-3 Reacciones en el Separador Interno en Puentes por Carga Permanente

$W_s$  = peso del separador interno

$S_v$  = separación entre vigas

$$V_{cp} = V_{max} = R \tag{6-4}$$

$$M_{cp} = M_{max} = R \cdot (2S_v) - W_s \cdot \frac{(1,5S_v)^2}{2} \tag{6-5}$$

6.4 Análisis para las solicitaciones de corte y momento por cargas variables.

**Análisis de carga variable para el vehículo (Vcv y Mcv)**

El análisis por carga variable para un separador interno consiste en la colocación de los ejes de vehículos tipo, (HS20 y H20) sobre la sección del separador y moverlos para diferentes posiciones de tal manera que se obtenga las solicitaciones de Fuerza Cortante y Momento Flector, la posición de las cargas sobre el separador puede tener disposición simétrica o no.

El caso a representar corresponde a un tablero para puentes carreteros con 4 vigas.

**Posiciones del vehículo en Simetría**

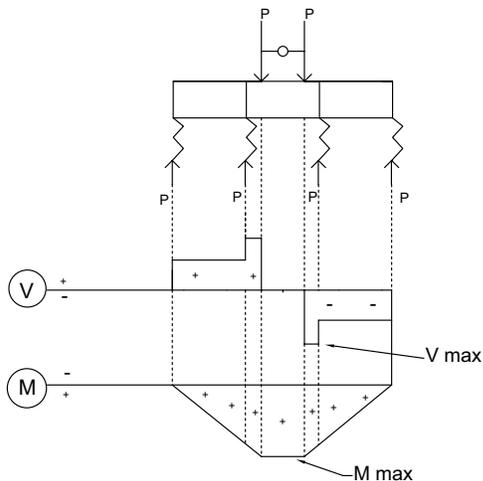


FIGURA. 6-4 Diagramas de corte y momento para un Vehículo posi-

cionado en el medio de la sección transversal

**Posiciones del vehículo en Asimetría**

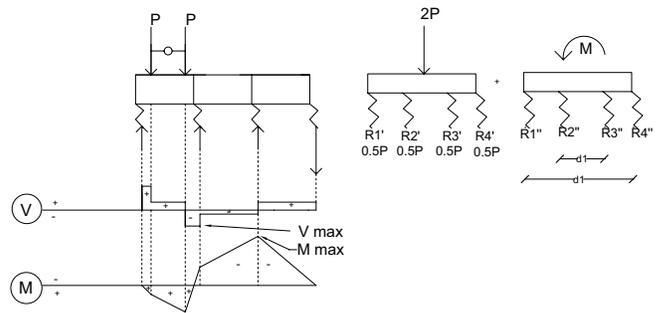


FIGURA. 6-5 Diagramas de corte y momento para un Vehículo posicionado en el extremo de la sección transversal

De los casos de simetría y asimetría obtengo:

$V_{max}$  = corte máximo por carga variable (vehículo)

$M_{max(+)}$  = momento máximo positivo por carga variable (vehículo)

$M_{max(-)}$  = momento máximo negativo por carga variable (vehículo)

**Análisis de carga variable equivalente (Vcv equiv y Mcv equiv)**

(AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> Art. 3.6.1.2.1)

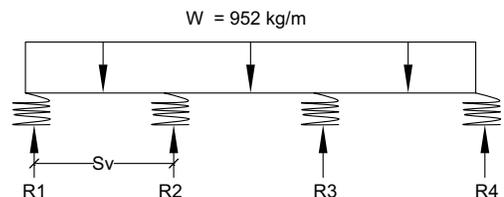


FIGURA. 6-6 Análisis de carga del separador interno por carga variable equivalente

$$R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \tag{6-6}$$

$$V_{cv\ equiv} = R \tag{6-7}$$

$$M_{cvequiv} = R \cdot 2S_v - W \cdot \frac{(1,5S_v)^2}{2} \tag{6-8}$$

6.5 Factores

**Factor Longitudinal (F.L)**

En el cálculo de los separadores debe considerarse la carga del camión tipo, el cual tiene dos o tres ejes. Surge, entonces, el problema de determinar la fracción de la carga de una línea de ruedas que actúa sobre el separador. Un criterio que puede adoptarse es el indicado por el Profesor Abreu "Estudio de las solicitaciones en una viga rígida sobre apoyos elásticos"<sup>(3)</sup>, donde se plantea que la carga única aplicada sobre el separador equivalente a una línea de ruedas, es aquella que produce en el punto de la viga en que ella es interceptada

por el separador, una flecha igual a la flecha máxima que produce en ese punto la línea de ruedas al gravitar sobre la viga.

El procedimiento de cálculo del factor longitudinal consiste en el posicionamiento de una línea de rueda del vehículo de diseño sobre el separador interno y calcular la influencia que tienen cada uno de los neumáticos sobre el separador por el método de deflexiones de vigas, es decir, la deflexión total es igual a la suma de cada una de las deflexiones producidas por cada neumático sobre el separador. Las deflexiones ocurren por el peso (P) que ejerce cada neumático en el separador al mismo tiempo, por lo tanto al final se busca obtener una (P equivalente).

Para el caso de un separador interno ubicado en el medio de la luz de cálculo, el procedimiento es el siguiente:

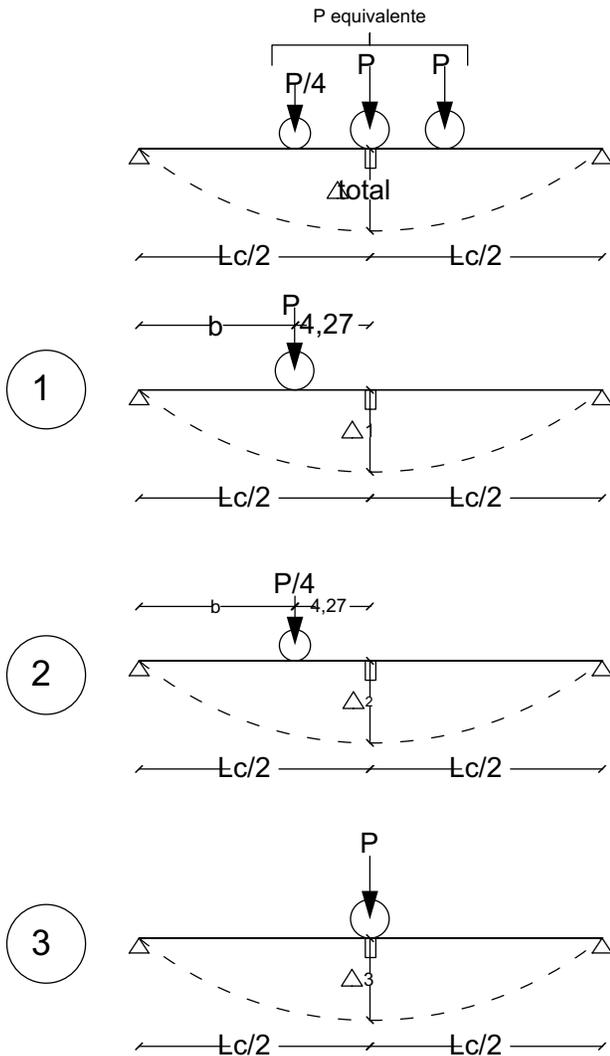


FIGURA 6-7. Análisis del factor longitudinal para el separador Interno por el método de las deflexiones.

$$F.L = \frac{P_{equiv}}{p} \tag{6-9}$$

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \frac{Pb(L^2 - b^2)^{3/2}}{9\sqrt{3LEI}} \tag{6-10}$$

$$\Delta_3 = \frac{Pb^3}{48EI} \tag{6-11}$$

$$b = \frac{L}{2} - 4,27 \tag{6-12}$$

$$\text{Para } \Delta_2, P = P/4 \tag{6-13}$$

$$P = 7258 \text{ Kgf} \tag{6-14}$$

$$\Delta_{total} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 \tag{6-14}$$

$$\Delta t = \frac{P_{equiv}L^3}{48EI} \tag{6-15}$$

$$\frac{P_{equiv}}{P} \tag{6-16}$$

Para el caso de dos separadores internos ubicados a cada un tercio de la luz de cálculo, el procedimiento es el siguiente:

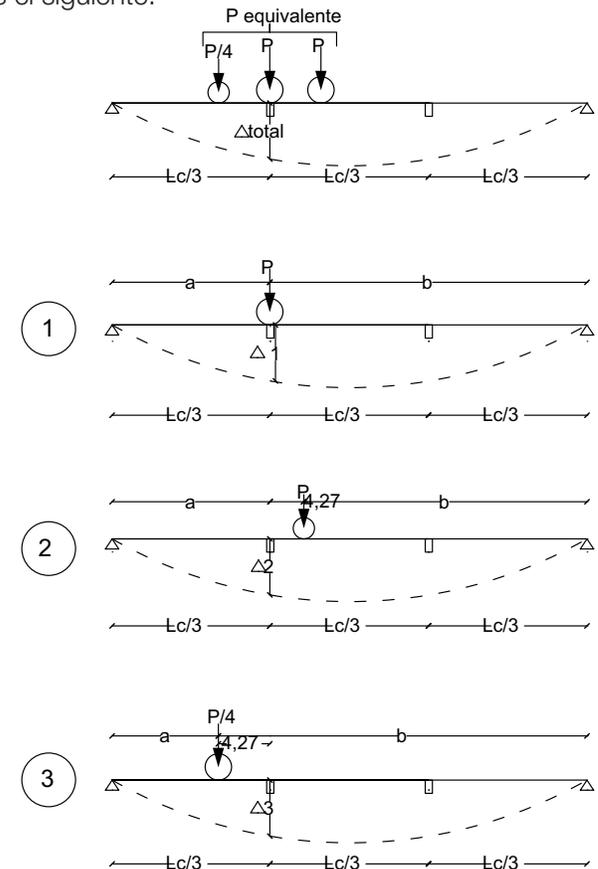


FIGURA 6-8. Análisis del factor longitudinal para el separador Interno por el método de las deflexiones.

$$\Delta_{total} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 \quad (6-17)$$

Para  $(0 \leq X \leq a)$

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \frac{PbX}{6LcEI} (Lc^2 - b^2 - X^2) \quad (6-18)$$

Para  $(a < X < Lc)$

$$\Delta_3 = \frac{Pb}{6LcEI} \left[ \frac{Lc}{b} (X - a)^3 + (Lc^2 - b^2)X - X^3 \right] \quad (6-19)$$

$$\Delta_{total} = \Delta_1 = \Delta_2 = \frac{P \text{ equiv } b X}{6LcEI} (Lc^2 - b^2 - X^2) \quad (6-20)$$

$$F.L. = \frac{P \text{equiv}}{P} \quad (6-21)$$

**Factor de impacto (F.I)** Las solicitaciones resultantes de las cargas vivas deben ser afectadas por un factor que considere las vibraciones y el impacto que se produce en el elemento al entrar un camión en la vía. (Ver ecuaciones 2-32, 2-33)

### 6.6 Calculo de los aceros

- Acero principal o Inferior  
(Ver subtítulo 2.19)
- Acero secundario o superior  
(Ver ecuación 4-31)
- Acero de paramento  
(Ver ecuación 4-32)

### 6.7 Diseño por flexión y el diseño por corte

(Ver subtítulos 4.8 y 4.9)

#### Sección transversal del separador interno

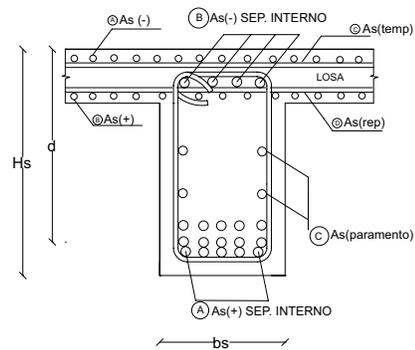


FIGURA 6-9. Sección Transversal del Separador Interno. Posición de los aceros del Separador y de la losa.

#### Sección longitudinal del separador interno

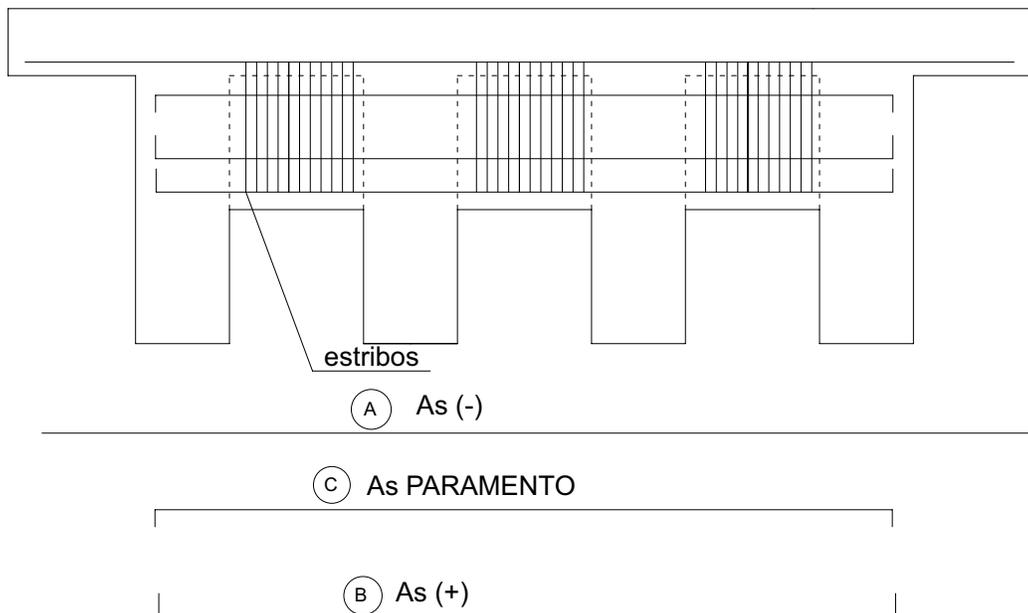


FIGURA 6-10. Sección Longitudinal del Separador Interno y su despiece.

## 7. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

El procedimiento indicado es de gran utilidad para estudiantes y para profesionales, sirve de referencia para la el proyecto de taleros de puentes de concreto armado en todo el país.

Se observó en general que las cargas aplicadas por la nueva norma AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> son más grandes que las aplicadas por la anterior norma AASHTO Standard, originando como es de esperar solicitaciones mayores. Sin embargo, los factores de mayoración de cargas de la norma AASHTO LRFD<sup>(1)</sup> son menores que los de la norma AASHTO Standard. La razón fundamental se debe a los grandes avances en estudios de confiabilidad estructural sobre los cuales se basa la norma AASHTO LRFD<sup>(1)</sup>.

## 8. BIBLIOGRAFICAS

- [1] AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS 2005, Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [2] AASHTO STANDARD SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES 1996, Adopted by the American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [3] Abreu Rafael, Estudio de las solicitaciones en una viga rígida sobre apoyos elásticos, Trabajo de Ascenso a Profesor Asociado, Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. 1980.
- [4] AASHTO: STANDARD SPECIFICATIONS FOR HIGHWAY BRIDGES 1989, Adopted by the American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [5] COVENIN Norma Venezolana 1753-2006. Proyecto y Construcción de Obras de Concreto Estructural, FONDONORMA, Caracas Agosto 2006.