

# Curso Diseño de Puentes - AASHTO

Prof. Dr. Matías A. Valenzuela

# Agradecimientos

- Dr. Rafael Foinquinos Mera
- Dr. Carlos G. Matos Flores-Guerra
- Dr. Sergio F. Breña
- Dr. Hernán Pinto Arancet

# Tópicos del Curso

- 1. Filosofía del Código LRFD
- 2. Cargas de Servicio en Subestructuras
- 3. Cargas Extremas en Puentes
- **4. Análisis Estructural Caso 1**

# Cargas usadas en el diseño de vigas presforzadas

Cargas permanentes ( "cargas muertas" ) :

- **Cargas DC** - Componentes y elementos cuyos pesos pueden determinarse con una exactitud razonable

Viga

Losa, formaletas permanentes

Diafragmas

Barandillas ( "parapeto" ) / barreras

actúan en viga

actúan en sección  
compuesta

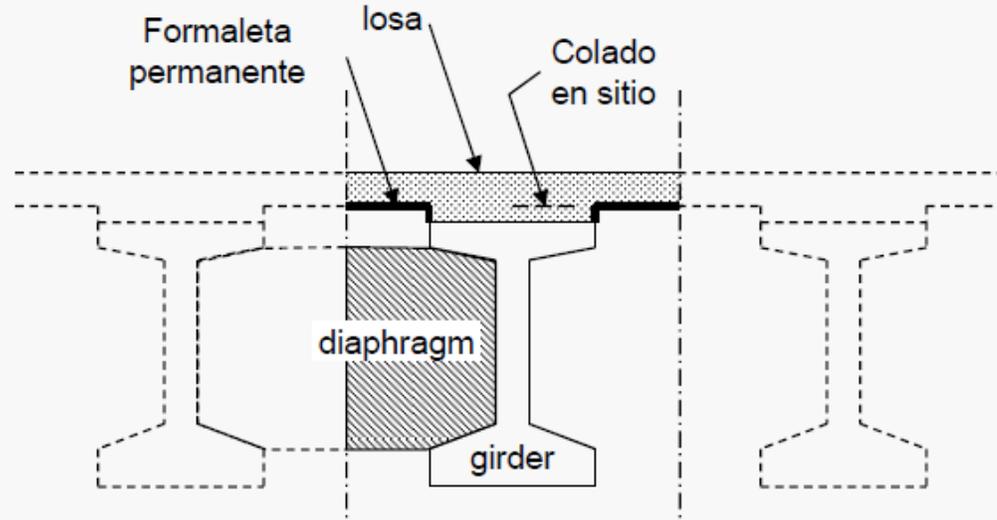
- **Cargas DW** - Componentes y elementos cuyos pesos no son tan fácilmente determinados como las cargas DC

Carpeta asfáltica

tuberías y otras cargas futuras

actúan en sección  
compuesta

# Cargas Permanentes DC / DW

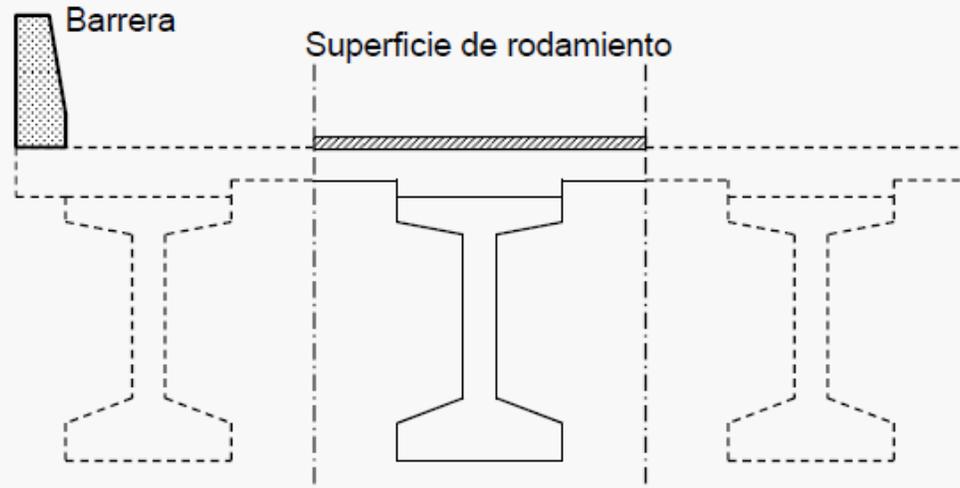


## Servicio I, III (análisis elástico)

Calcular esfuerzos (módulo de sección) en viga bajo la acción de estas cargas mas los efectos del presfuerzo

## Resistencia I – Cargas DC

Usar factor de carga = 1.25



## Servicio I, III (análisis elástico)

Usar propiedades de la sección compuesta en el cálculo de esfuerzos en la viga y losa

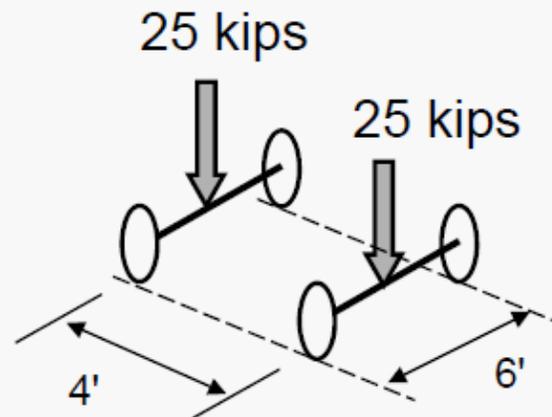
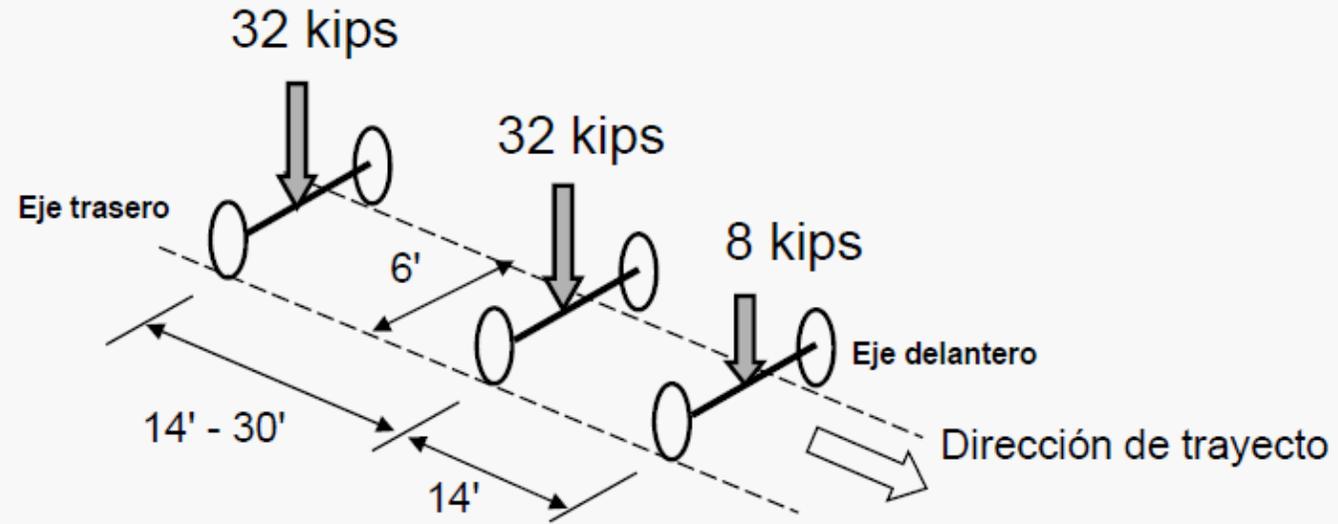
## Resistencia I – Cargas DW

Usar factor de carga = 1.50

# Distribución de Carga Viva Vehicular

# Pesos de los Ejes del Camión de Diseño y el Tandem

**Camión de diseño**



**Tandem**

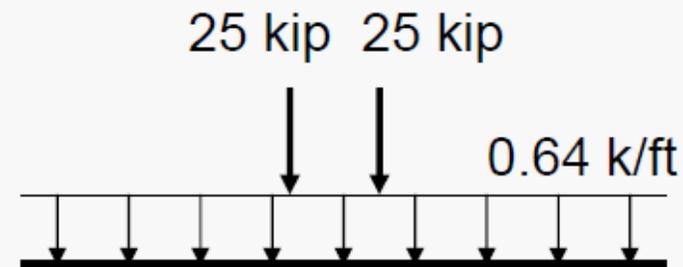
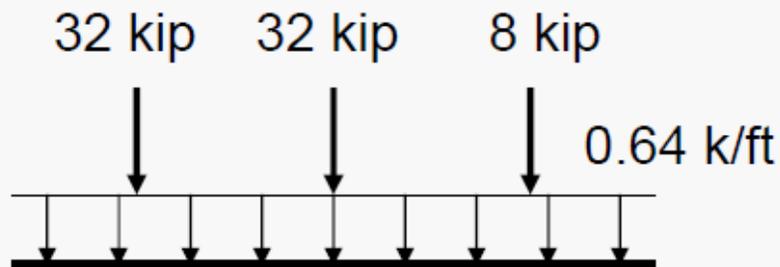
# Aplicación de Carga Viva: Estados límite de falla y de servicio

**Camión de Diseño Mas Carga en Carril**

**O**

**Tandem de Diseño Mas Carga en Carril**

*Use whichever causes greater load effect*

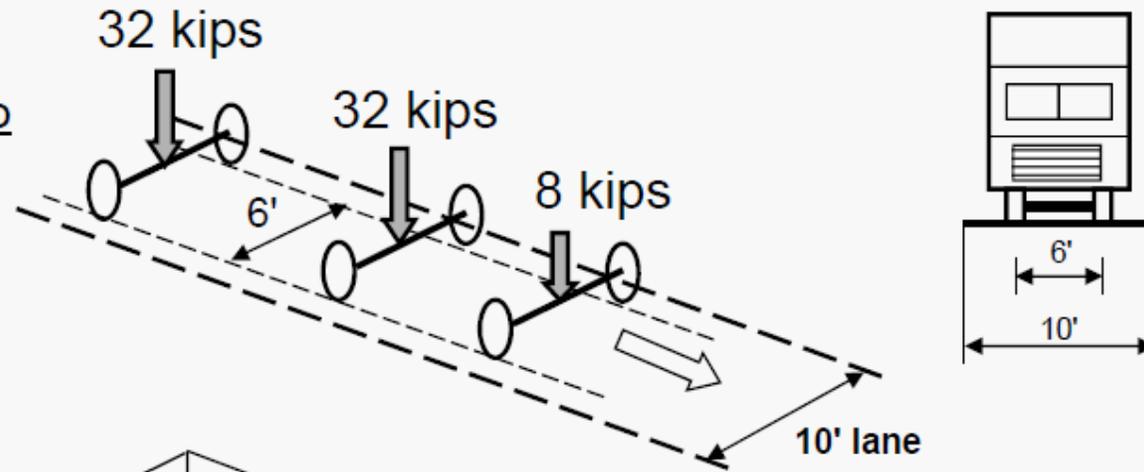


*La carga en el carril de diseño no se interrumpe para dejar espacio a los ejes de los vehículos de diseño*

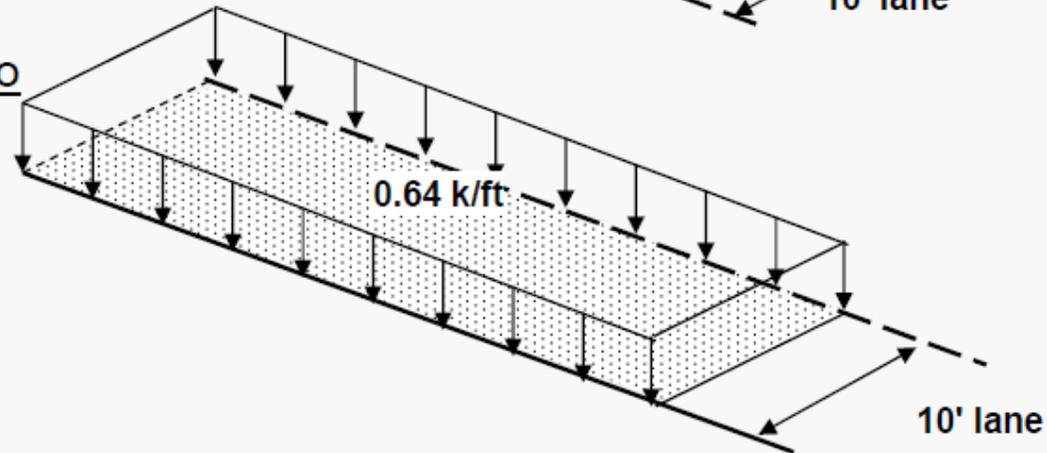
# Ancho del Carril de Diseño

El camión de diseño, *el tandem* y la carga en carril de diseño se aplican en un ancho de 10 ft . Cualquier neumático no puede colocarse a menos de 2 ft del borde del ancho de diseño:

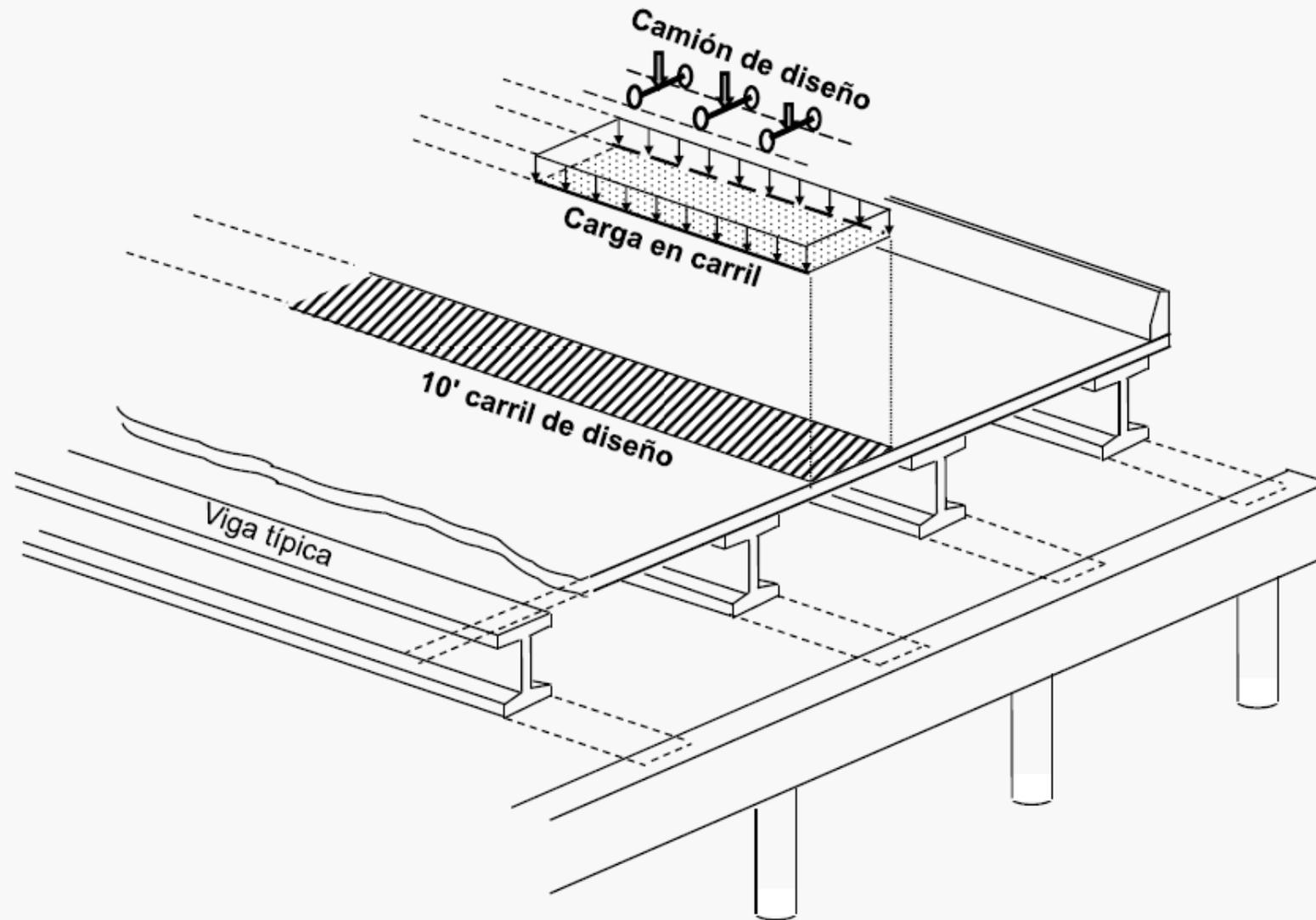
Carga del Camión de Diseño



Carga en Carril de Diseño



# Uso de la Carga HL-93 para Obtener Valores de Cortante y Momento en una Viga



# Cortante y Momento en Vigas Individuales bajo Acción de Carga Viva Vehicular

**El proceso consiste en dos pasos:**

Paso 1 - Construir el diagrama de momentos y cortantes de una viga imaginaria que tiene un ancho de 10 ft (ancho de diseño):

- Diagrama de momentos de la carga en el carril:  $M_{\text{Carril}}$
- Envolverte de cortantes de la carga en el carril :  $V_{\text{Carril}}$
- Envolverte de momentos/cortantes del camión de diseño:  $M_{\text{Camión}}, V_{\text{Camión}}$   
(Similar si la carga del Tandem gobierna)
- Aplicar el factor de impacto (IM) a los momentos/cortantes del camión y combinar los efectos para el modelo HL-93:

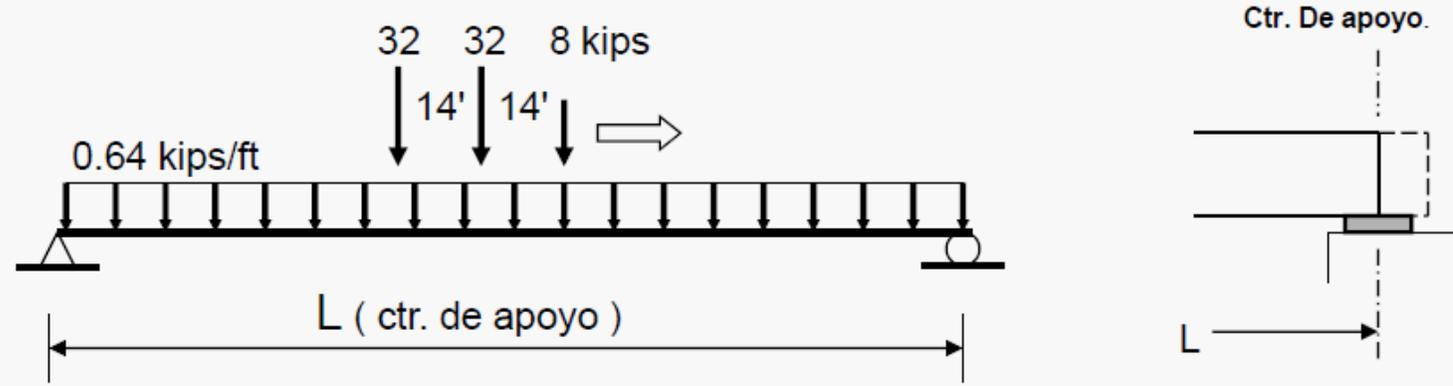
$$M_{LL} = M_{\text{Carril}} + IM \cdot M_{\text{Camión}}$$

$$V_{LL} = V_{\text{Carril}} + IM \cdot V_{\text{Camión}}$$

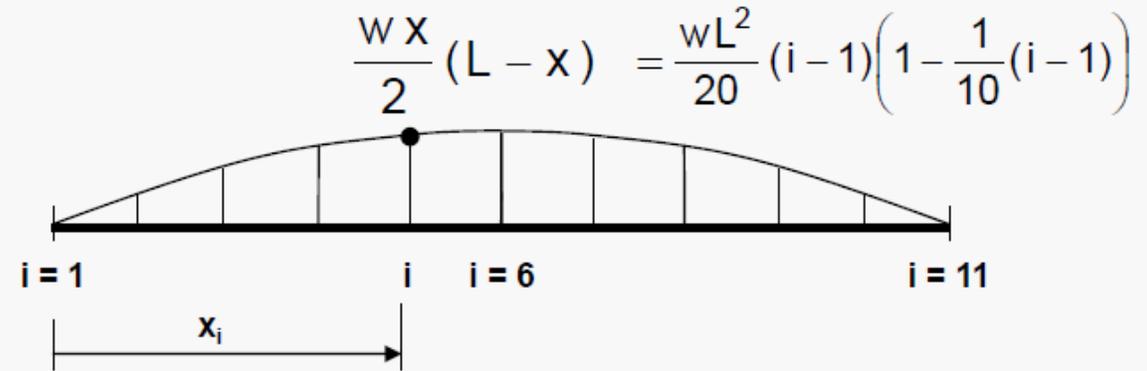
Paso 2 - *Método Simplificado AASHTO* : Usar valores de factores de distribución de momento y cortante para obtener momentos y cortantes en vigas individuales.

# Paso 1: Diagramas y Envolventes de Momento

Puente simplemente apoyado de un claro



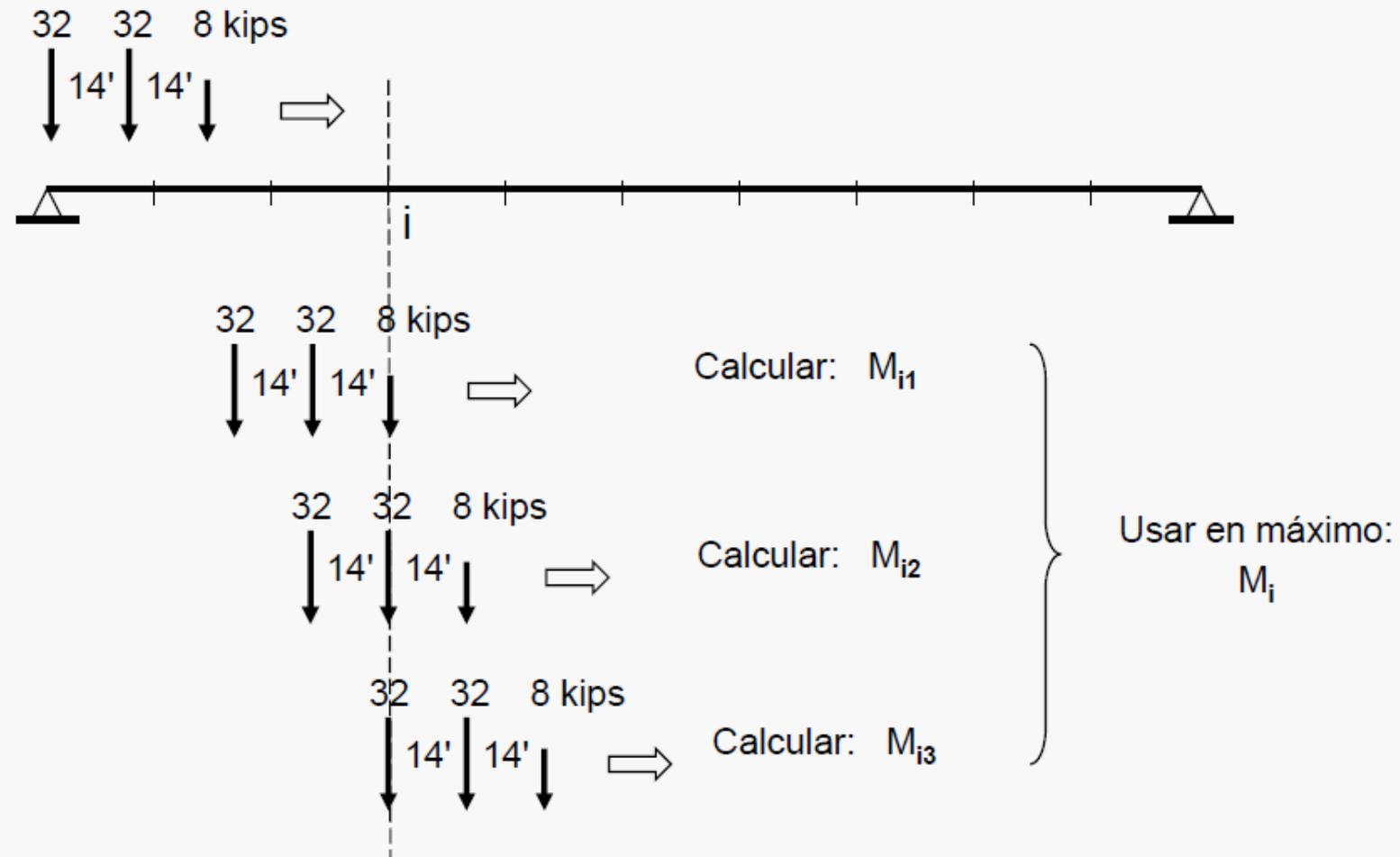
Momentos de la carga de carril – Calcular a cada 1/10th del claro (  $1 \leq i \leq 11$  ):



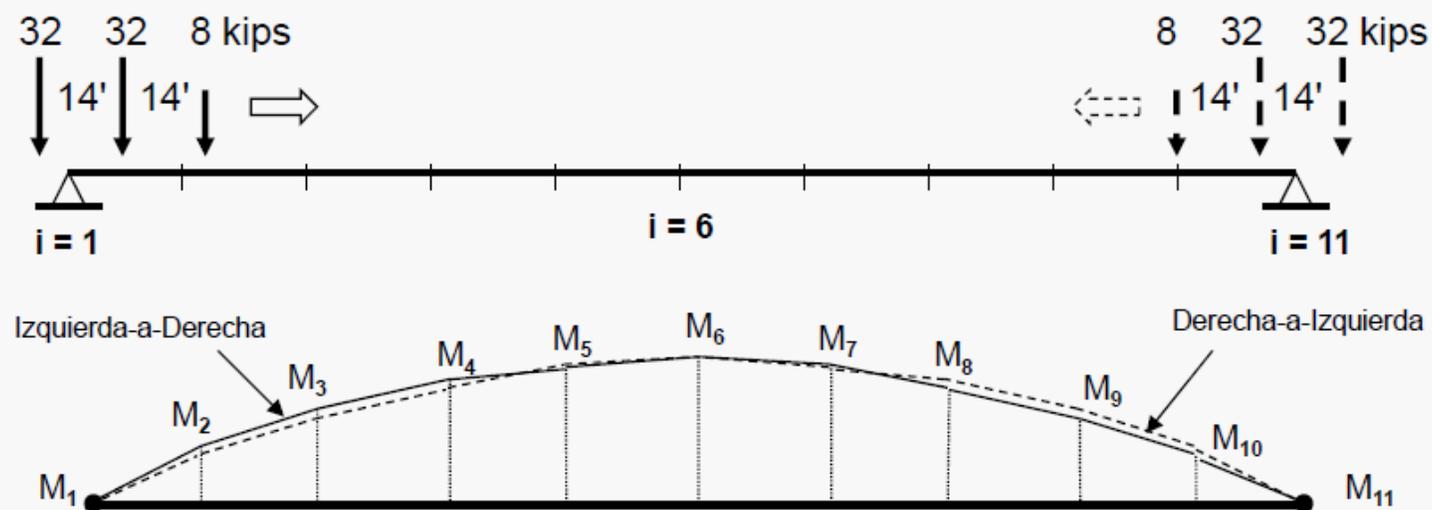
## Puente simplemente apoyado de un claro (cont.):

Envolvente de momento del camión de diseño ( *Similar para el Tandem* ):

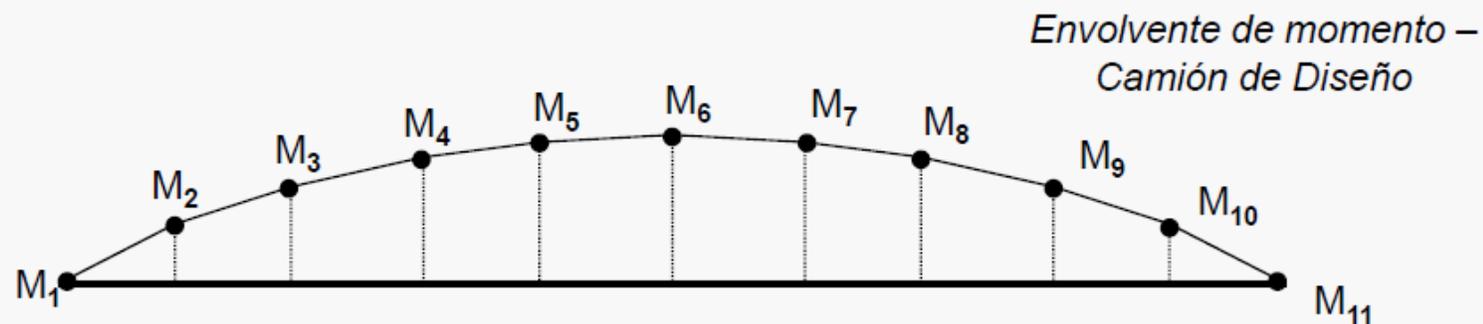
Obtener la envolvente de momento calculando el momento causado en cada 1/10 del claro por las cargas en cada eje del camión, conforme marchan (se desplazan) por el punto en cuestión (punto  $i$  en la figura). Usar simetría para calcular el caso de que el trayecto del camión fuera de derecha a izquierda.



## Puente simplemente apoyado de un claro (cont.):

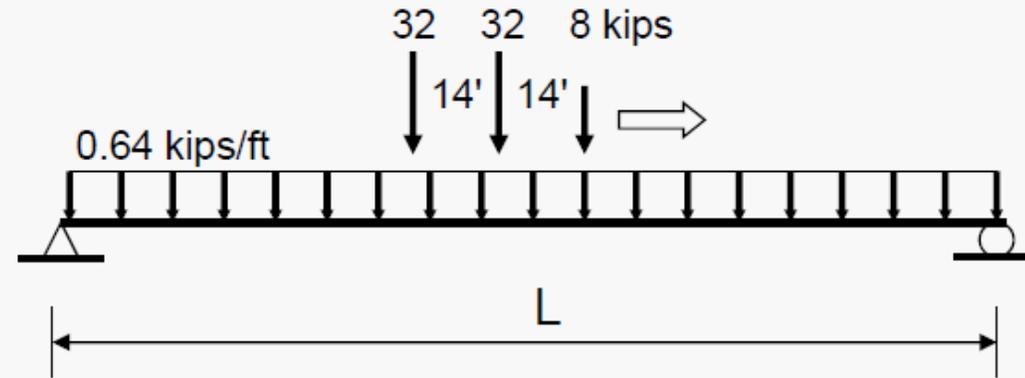


Usando el trayecto de izquierda-a-derecha:  $M_{2(env)} = M_{10(env)} = \text{máximo} (M_2, M_{10})$ , etc.



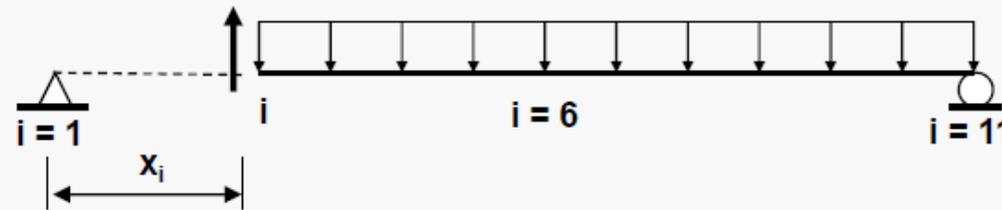
La envolvente semeja un diagrama de momento (y se usa como tal). El momento en el centro del claro  $M_6$  está dentro del 1% del “momento máximo absoluto” determinado usando líneas de influencia; mientras más largo es el claro, menor es la diferencia.

Puente simplemente apoyado de un claro (cont.):

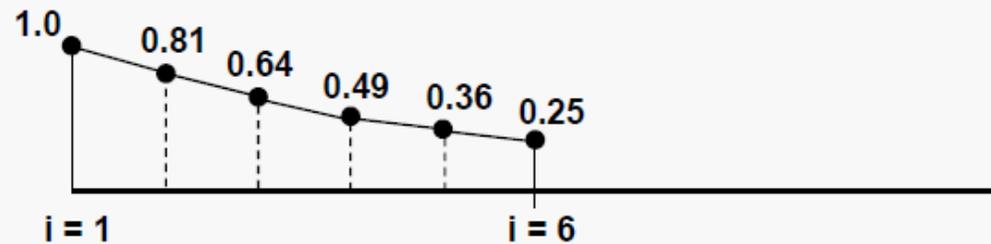


Envolvente de cortante para la carga en carril - Calcular en cada 1/10th del claro ( $1 \leq i \leq 6$ ):

$$V_i = \frac{wL}{2} \left( 1 - \left( \frac{i-1}{10} \right) \right)^2$$



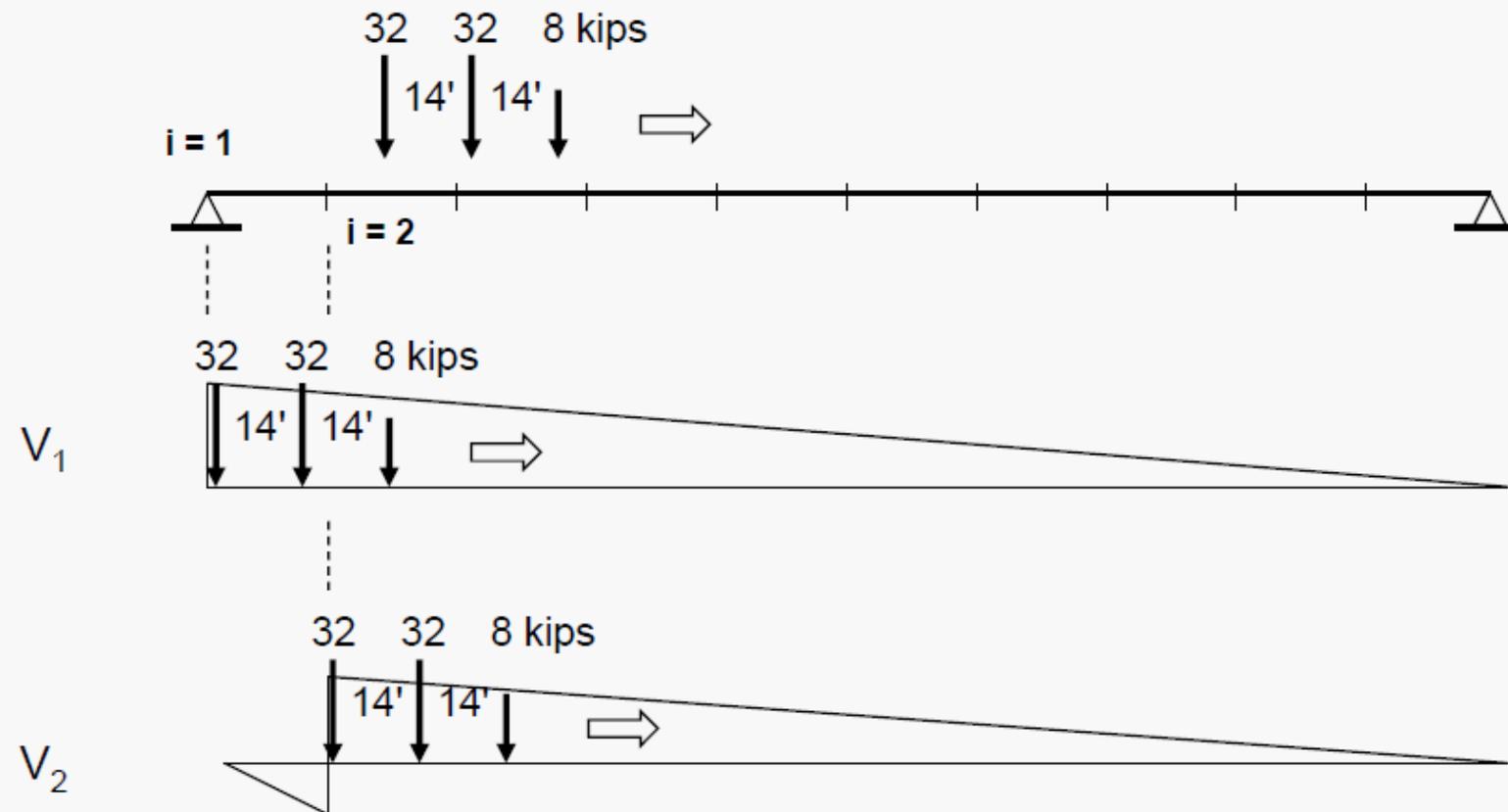
$$\frac{V_{i(\text{env})}}{\left( \frac{wL}{2} \right)}$$



## Puente simplemente apoyado de un claro (cont.):

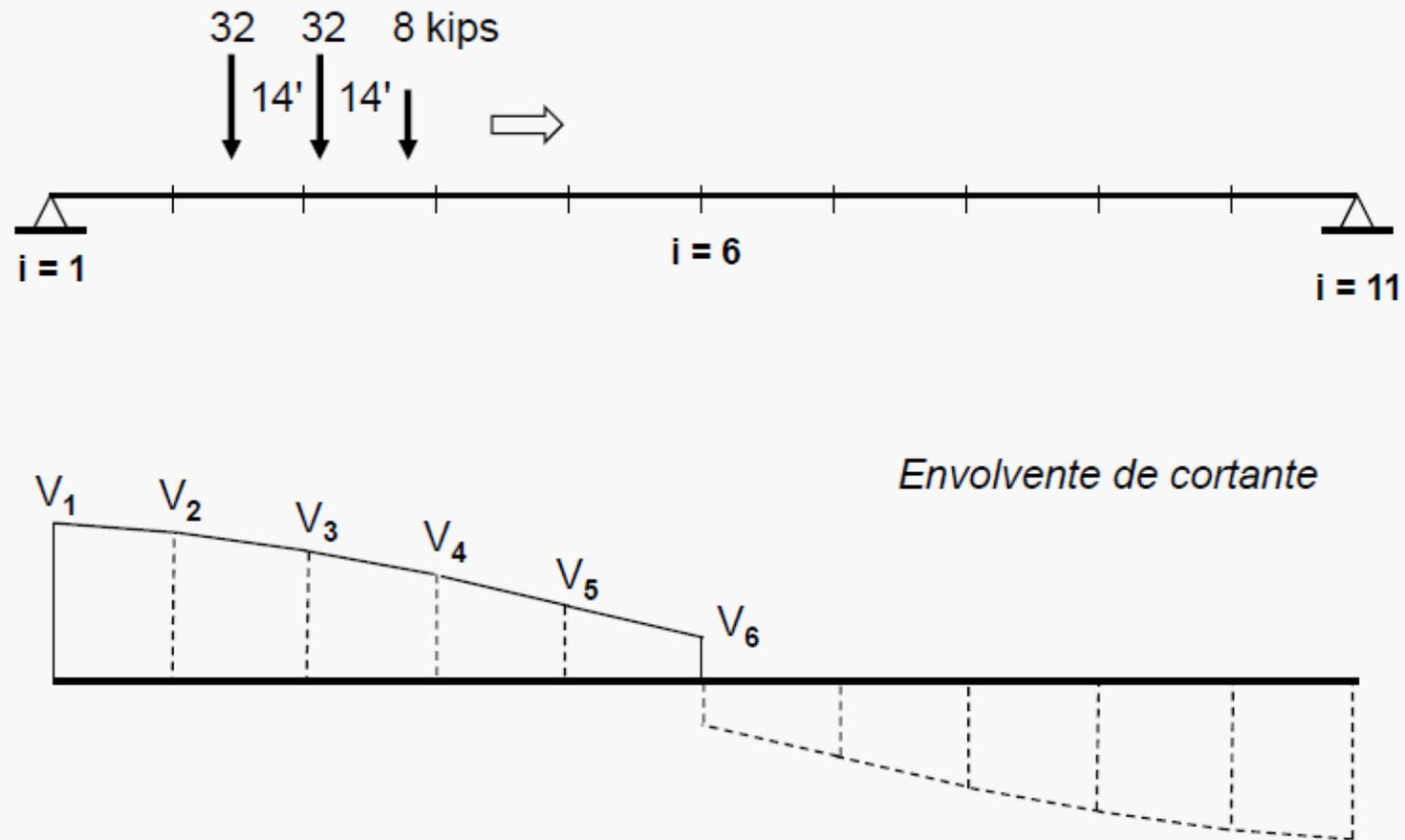
Envolvente de cortante para el camión de diseño ( *Similar para el Tandem*):

Usar líneas de influencia de cortante para calcular el cortante máximo en cada 1/10th del claro



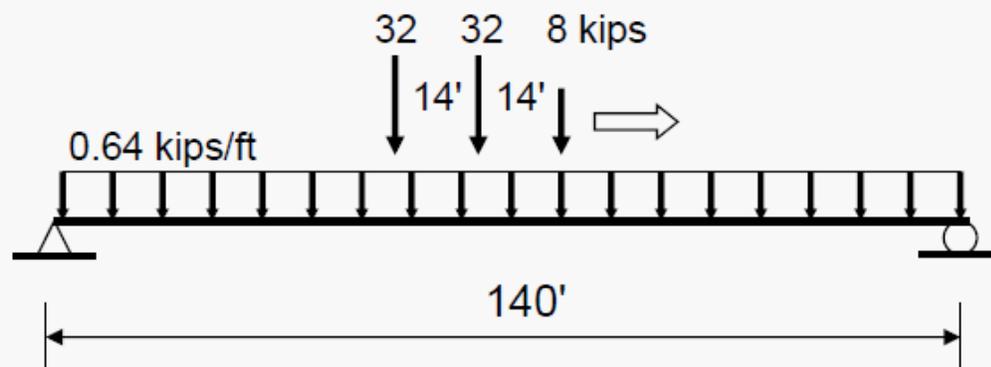
Puente simplemente apoyado de un claro (cont.):

Envolvente de cortante para el camión de diseño ( *Similar para el Tandem*):

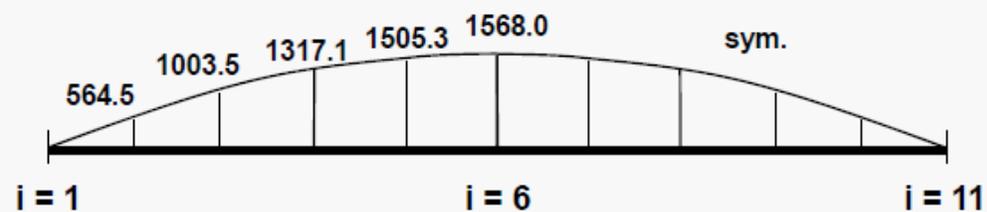


## Puente simplemente apoyado de un claro – Ejemplo numérico:

Momentos de la carga del  
vehículo de diseño (HL-93)

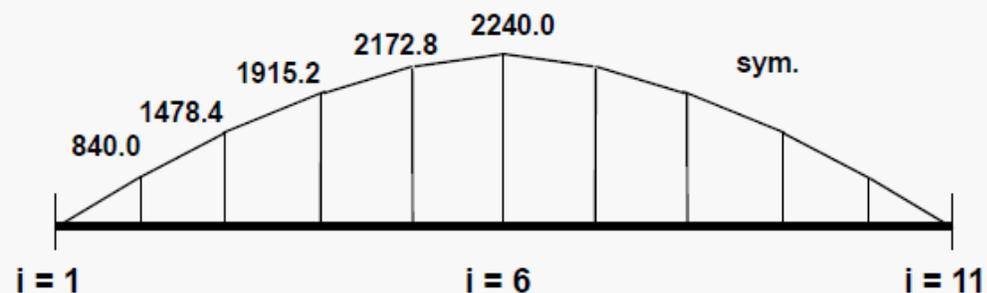


Momentos por la carga de carril:  $M_{Carril}$



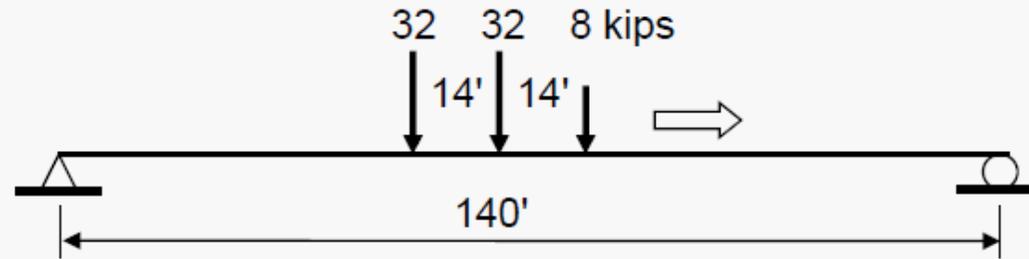
Envolvente de momentos del camión de  
diseño:  $M_{Camión}$

( Similar para la carga Tandem)



## Puente simplemente apoyado de un claro – Ejemplo numérico (cont.):

Cálculo de la envolvente de momentos del camión de diseño

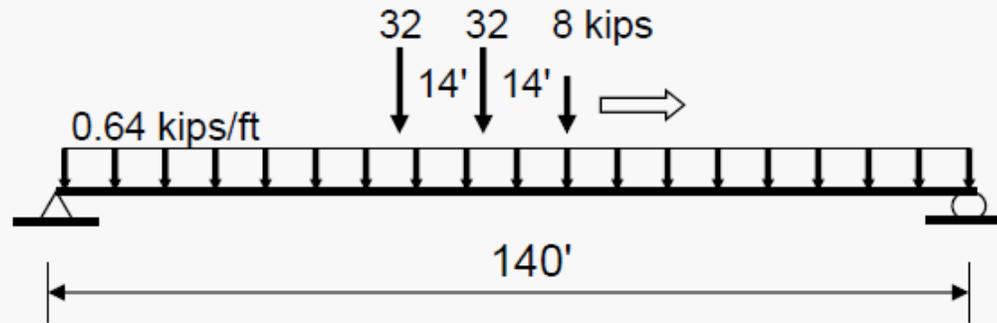


Trayecto de izquierda a derecha

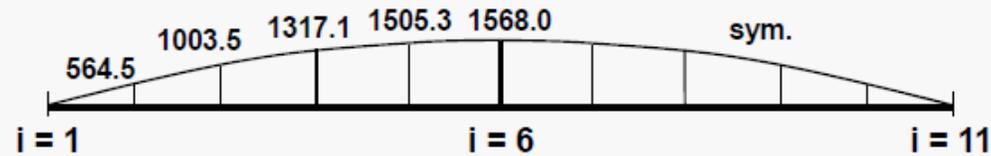
<u>i</u>	<u>x</u>	<u>Posición 1</u>	<u>Posición 2</u>	<u>Posición 3</u>	<u>Máximo</u>	<u>Envolvente</u> ft-k
1	0.00	M1 = 0.00	M2 = 0.0	M3 = 0.0	MM = 0.0	0.0
2	14.00	M1 = 100.80	M2 = 492.8	M3 = 840.0	MM = 840.0	840.0
3	28.00	M1 = 537.60	M2 = 1232.0	M3 = 1478.4	MM = 1478.4	1478.4
4	42.00	M1 = 1176.00	M2 = 1769.6	M3 = 1915.2	MM = 1915.2	1915.2
5	56.00	M1 = 1612.80	M2 = 2105.6	M3 = 2150.4	MM = 2150.4	2172.8
6	70.00	M1 = 1848.00	M2 = 2240.0	M3 = 2184.0	MM = 2240.0	2240.0
7	84.00	M1 = 1881.60	M2 = 2172.8	M3 = 2016.0	MM = 2172.8	2172.8
8	98.00	M1 = 1713.60	M2 = 1904.0	M3 = 1646.4	MM = 1904.0	1915.2
9	112.00	M1 = 1344.00	M2 = 1433.6	M3 = 1075.2	MM = 1433.6	1478.4
10	126.00	M1 = 772.80	M2 = 761.6	M3 = 403.2	MM = 772.8	840.0
11	140.00	M1 = 0.00	M2 = 0.0	M3 = 0.0	MM = 0.0	0.0

Puente simplemente apoyado de un claro – Ejemplo numérico (cont.):

$M_{LL}$  = moment por carga viva

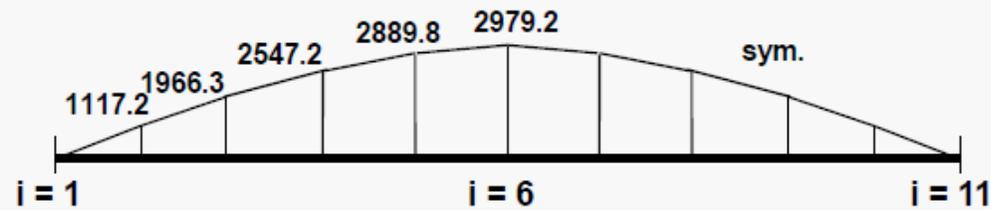


$M_{Carril}$



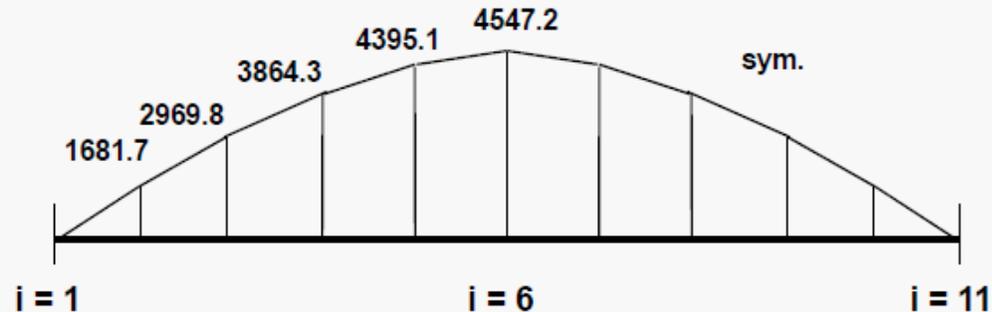
+

$$IM \cdot M_{Camión} = 1.33 \cdot M_{Camión}$$



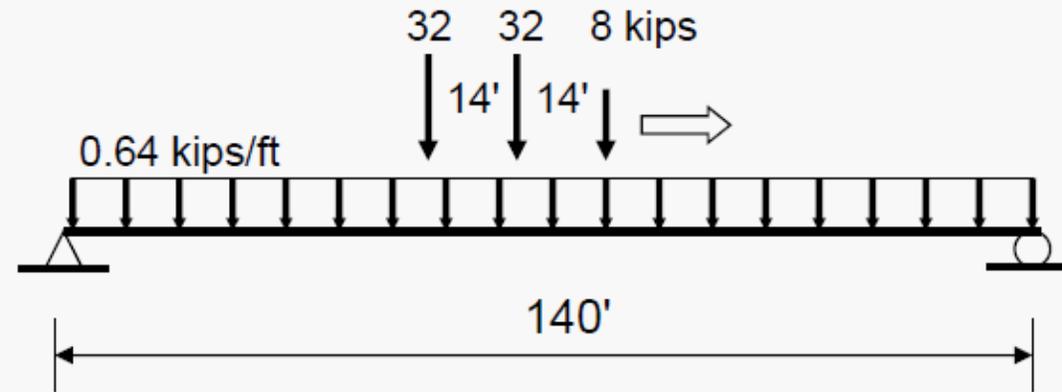
=

$$M_{LL} = M_{Carril} + 1.33 \cdot M_{Camión}$$

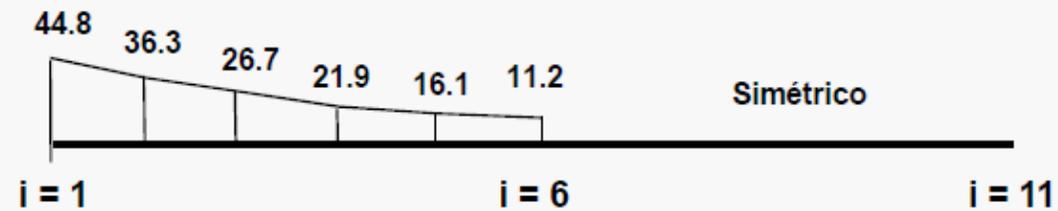


## Puente simplemente apoyado de un claro – Ejemplo numérico (cont.):

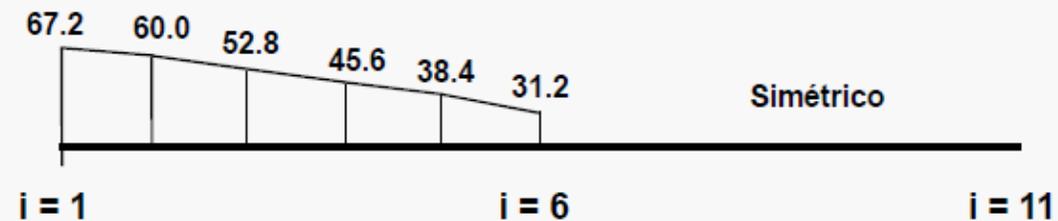
Cortantes de la carga del vehículo de diseño (HL-93):



Envolvente de cortante de la carga de carril:  $V_{Carril}$

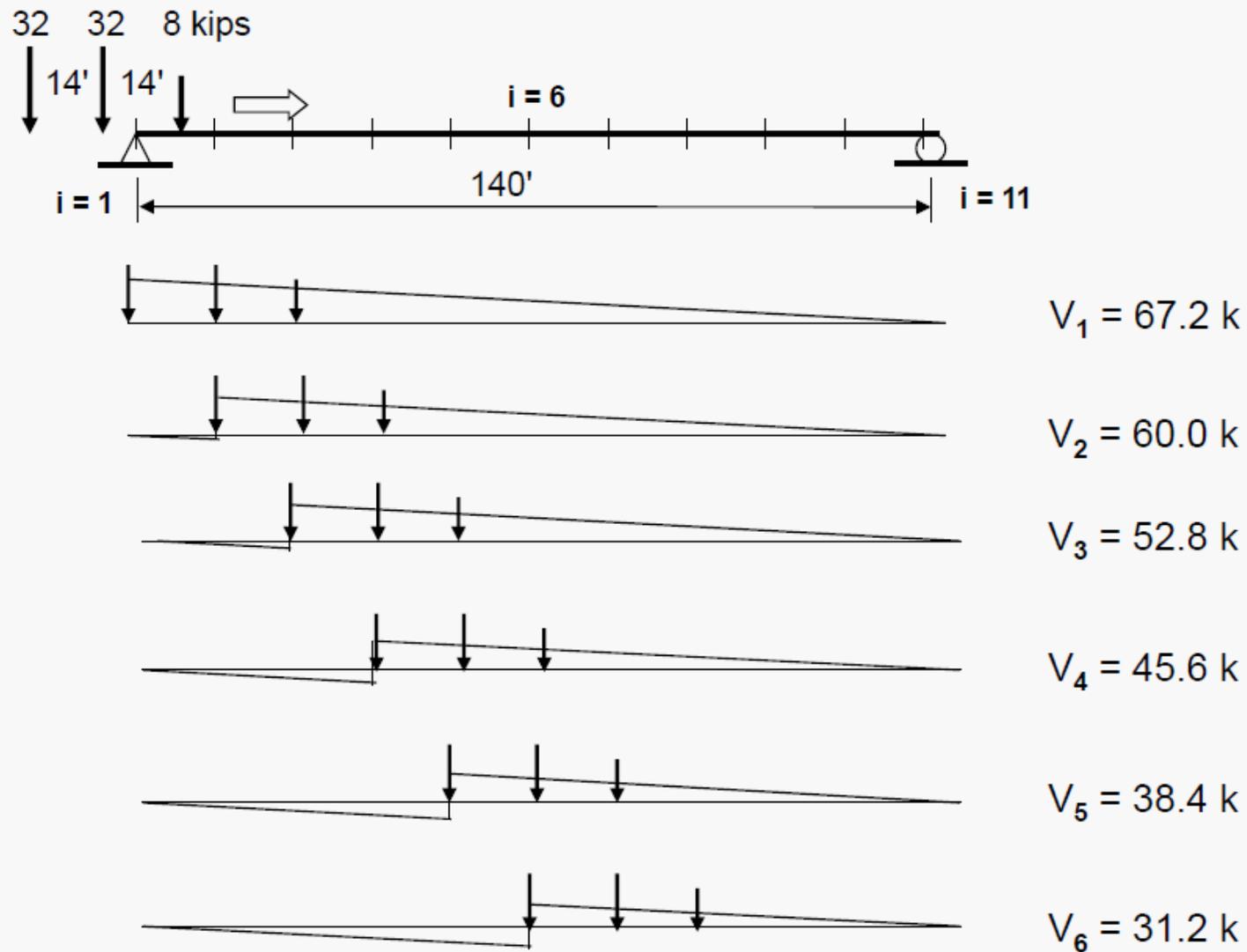


Envolvente de cortantes del camión de diseño:  $V_{Camión}$



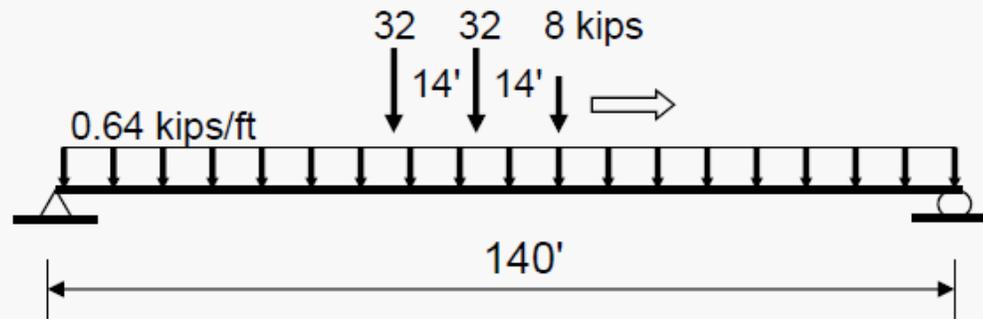
## Puente simplemente apoyado de un claro – Ejemplo numérico (cont.):

Envolvente de cortantes del camión de diseño



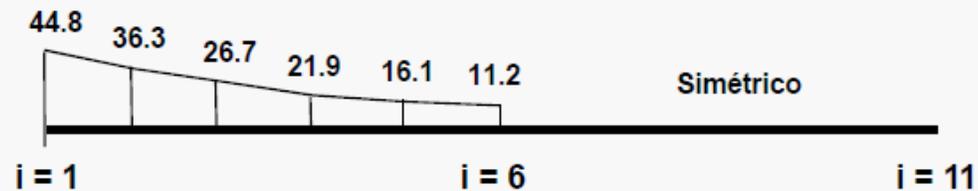
Puente simplemente apoyado de un claro – Ejemplo numérico (cont.):

$V_{LL}$  = cortantes por carga viva



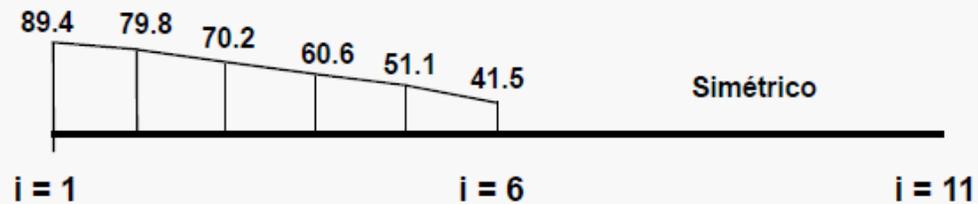
$V_{Carril}$

+

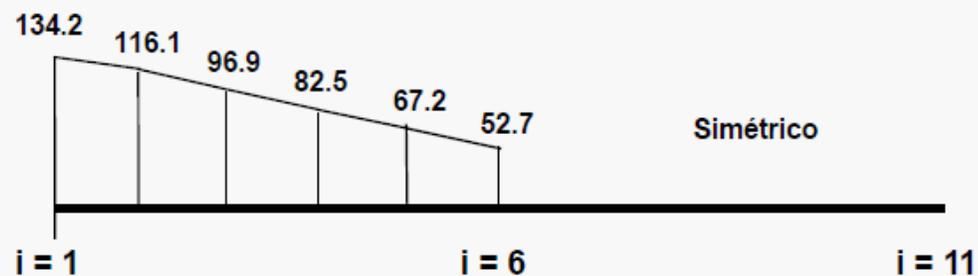


$IM \cdot V_{Camión} = 1.33 \cdot V_{Camión}$

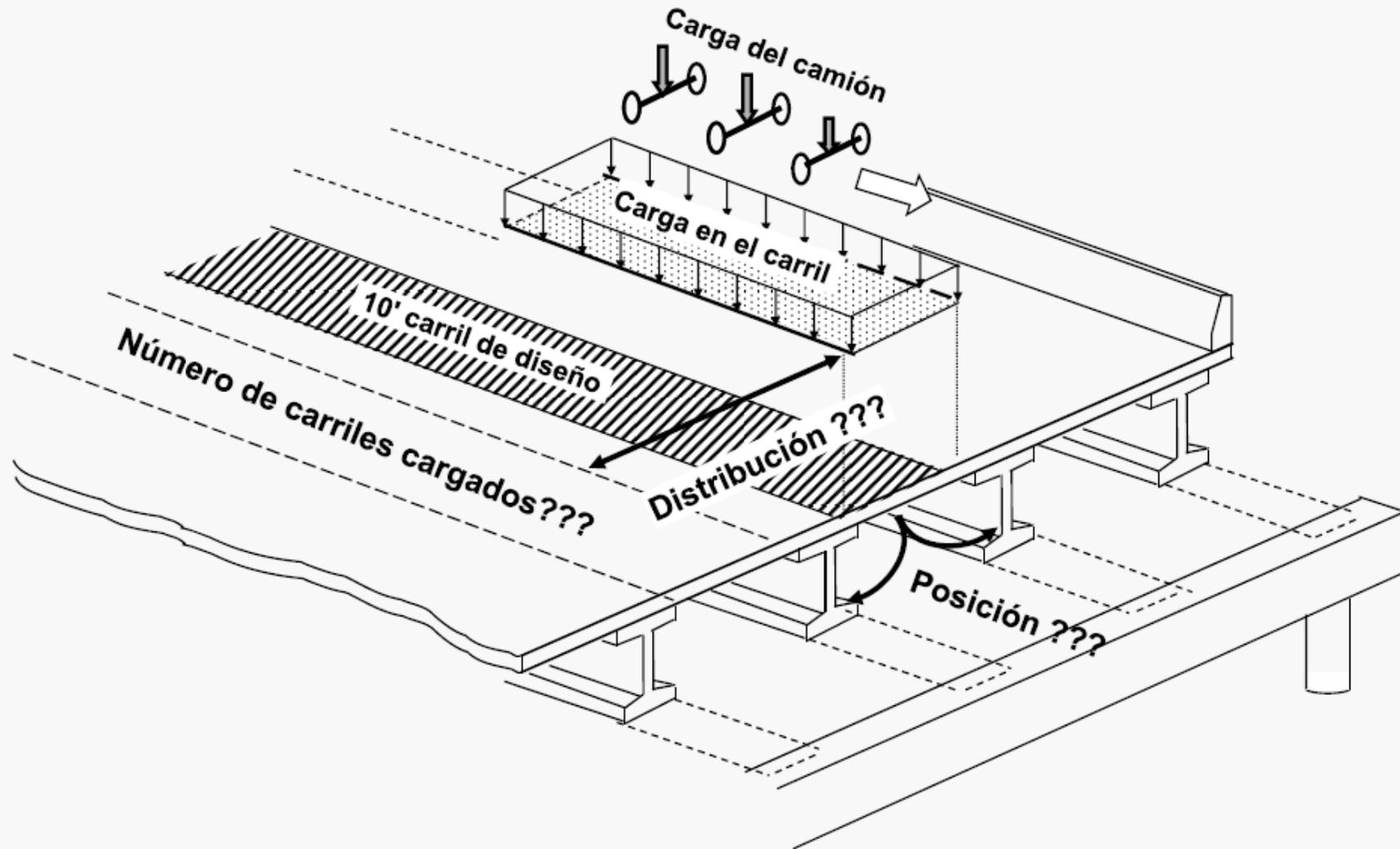
=



$V_{LL} = V_{carril} + 1.33 \cdot V_{Camión}$

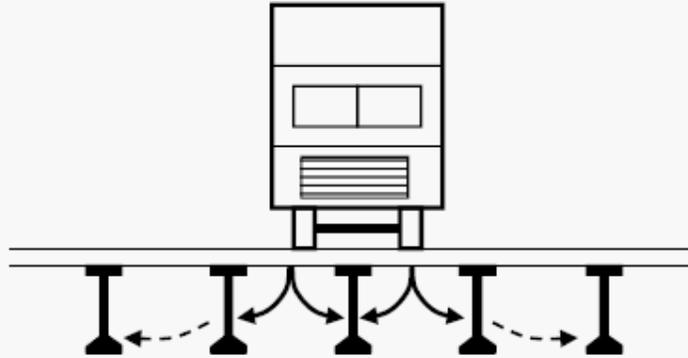


## Paso 2: Momentos y Cortantes en Vigas



La distribución de carga del carril de diseño a las vigas depende de varios factores:

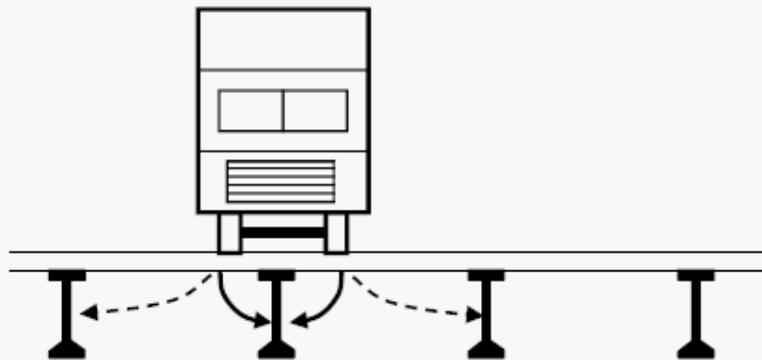
### Espaciamiento entre vigas



#### **Vigas relativamente juntas -**

Más vigas contribuyen a soportar la carga debido a su proximidad.

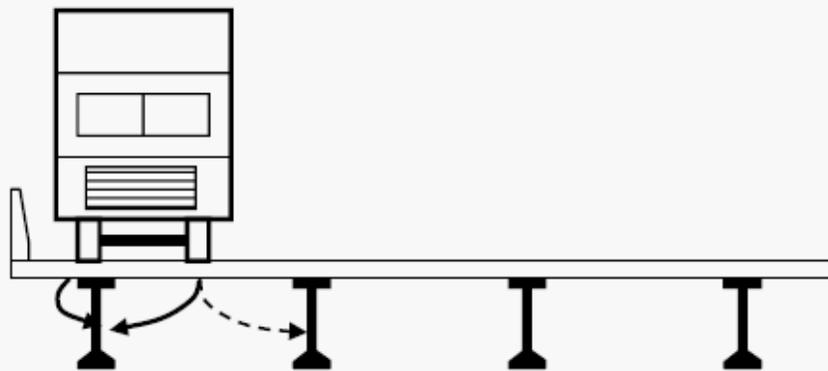
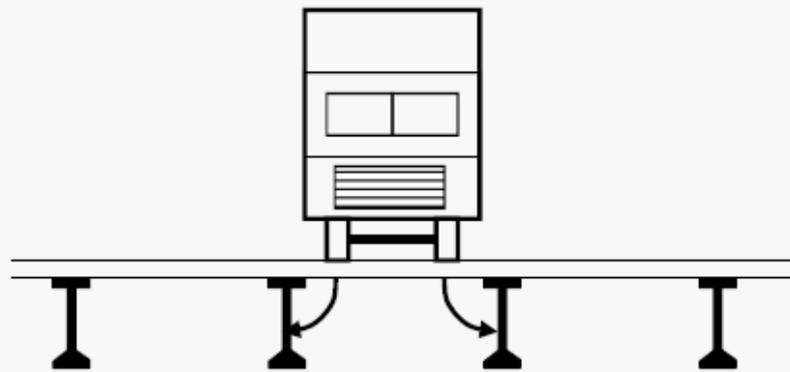
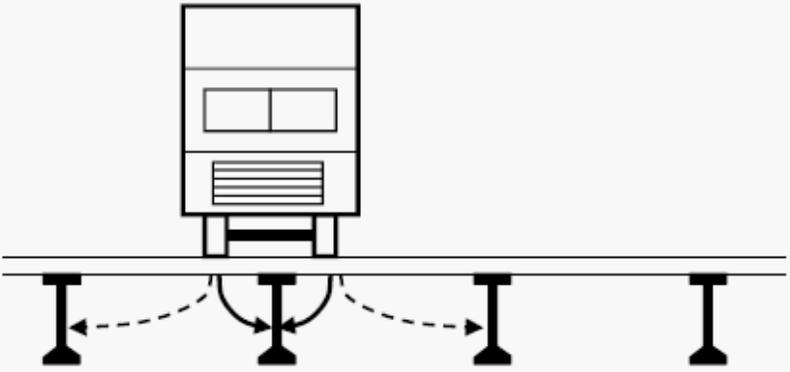
La transferencia de carga es más corta y la losa tiene mayor rigidez debido al claro más corto entre vigas.



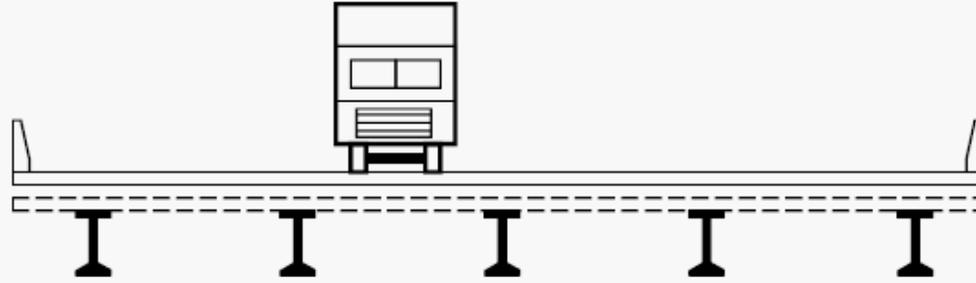
#### **Vigas más espaciadas -**

Transferencia de carga a vigas es más larga; Menos vigas participan debido a la menor rigidez de la losa por el claro más largo.

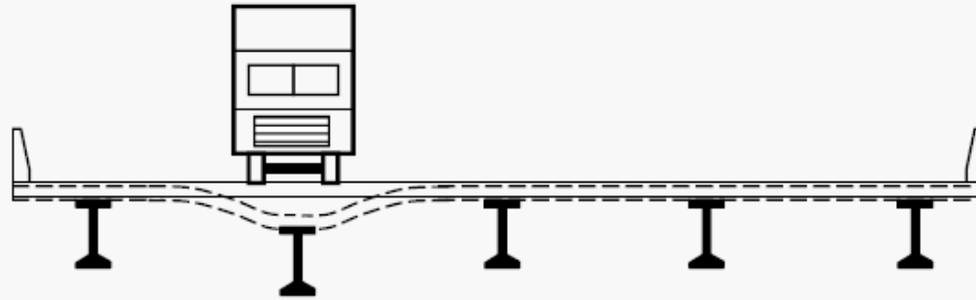
Posición de la carga relativa a las vigas:



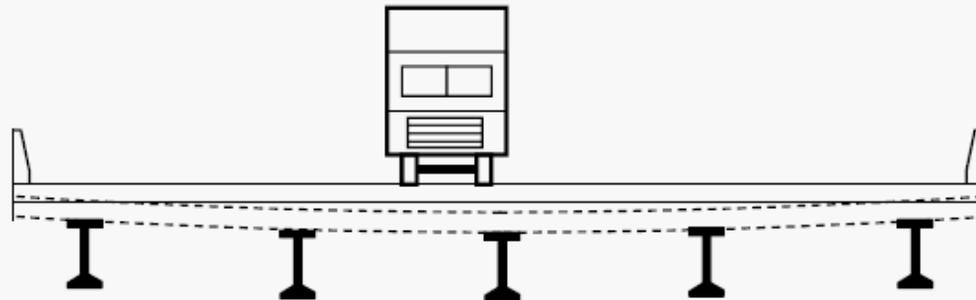
## Rigidez de la losa – afecta la habilidad de transferir carga a vigas adyacentes



**Losa muy rígida** – la carga se distribuye a todas las vigas



**Losa muy flexible** – la carga es soportada por sólo una viga

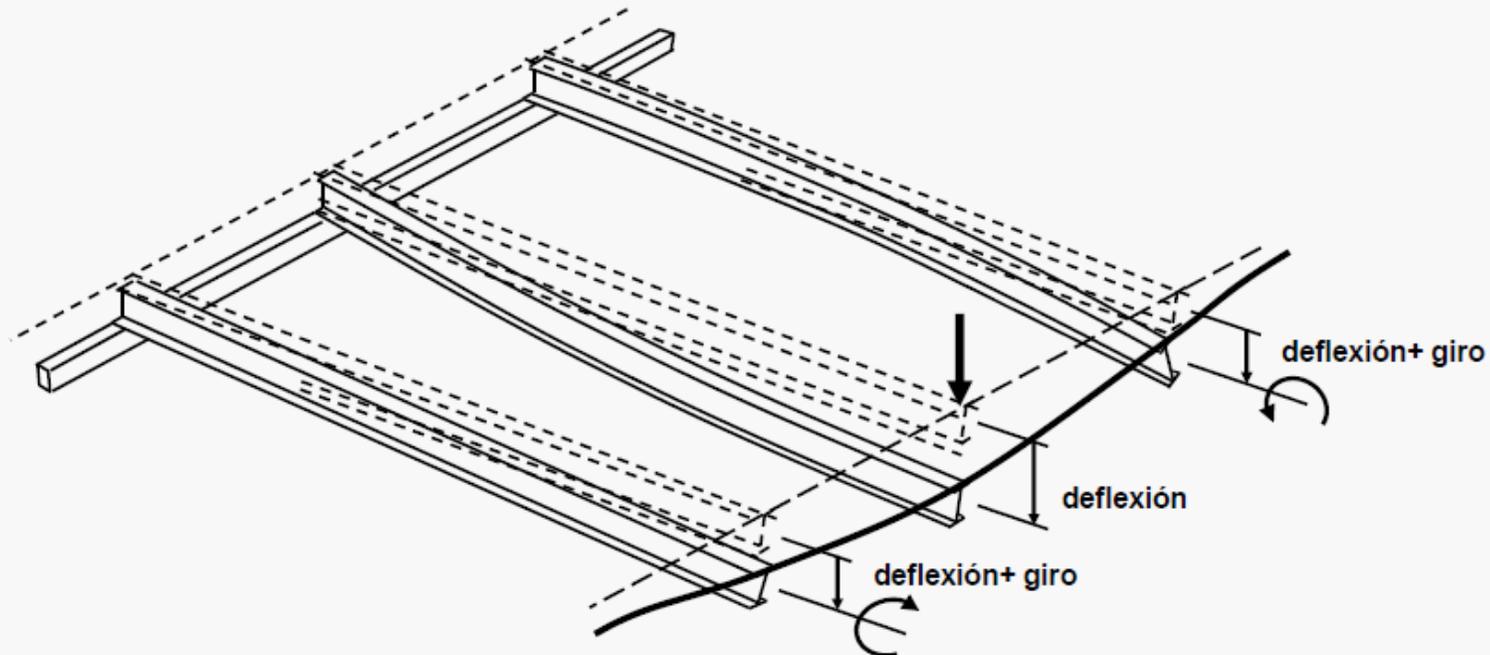


**Caso intermedio** – la carga se distribuye entre vigas, pero las vigas directamente debajo de la carga soportan una mayor fracción de la carga.

La rigidez a flexión y torsión de las vigas – son función de la longitud, momento de inercia (flexión) y área (torsión):

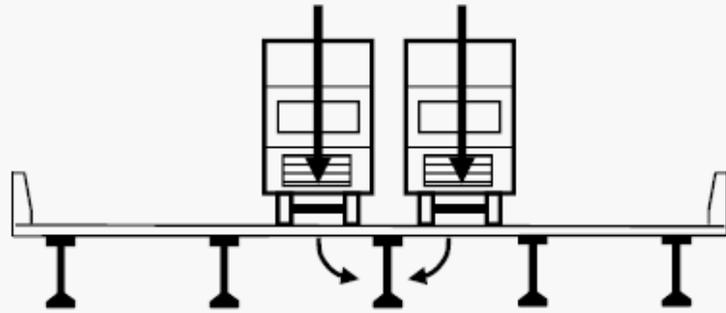
- Vigas largas son mas flexibles que las cortas, lo cual tiende a incrementar la distribución de carga entre vigas
- Vigas con momento de inercia bajo sufren más altas deflexiones que otras con momento de inercia algo, lo cual incrementa la distribución de carga entre vigas
- Vigas con area pequeña sufren giros más altos que vigas con área grande, lo cual tiende a incrementar la distribución de carga en entre vigas

Ejemplo: Una carga concentrada sobre una viga intermedia

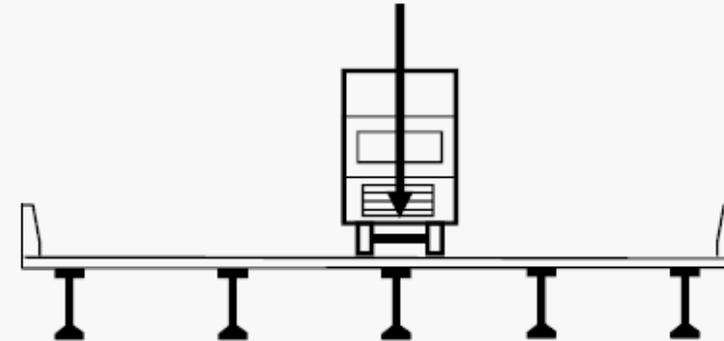


## Carriles Adyacentes Cargados – Modelo de carga AASHTO :

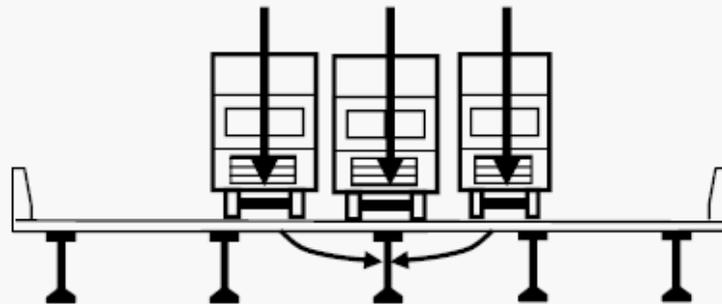
A = Valor de diseño ( *referencia* )



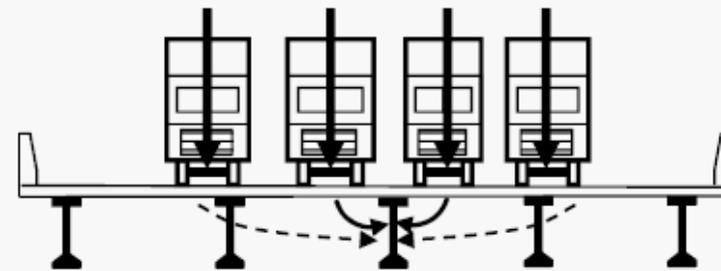
B =  $1.20 \cdot A$



C =  $0.85 \cdot A$



D =  $0.65 \cdot A$



### ***Factores de Presencia Múltiple:***

La especificación AASHTO ( S3.6.1.1.2 ) usa factores de presencia múltiple para tomar en cuenta la probabilidad que vehículos de estas cuatro clases de carga pueden estar presentes en carriles adyacentes.

Tabla 3.6.1.1.2-1 – Factores de presencia múltiple,  $m$

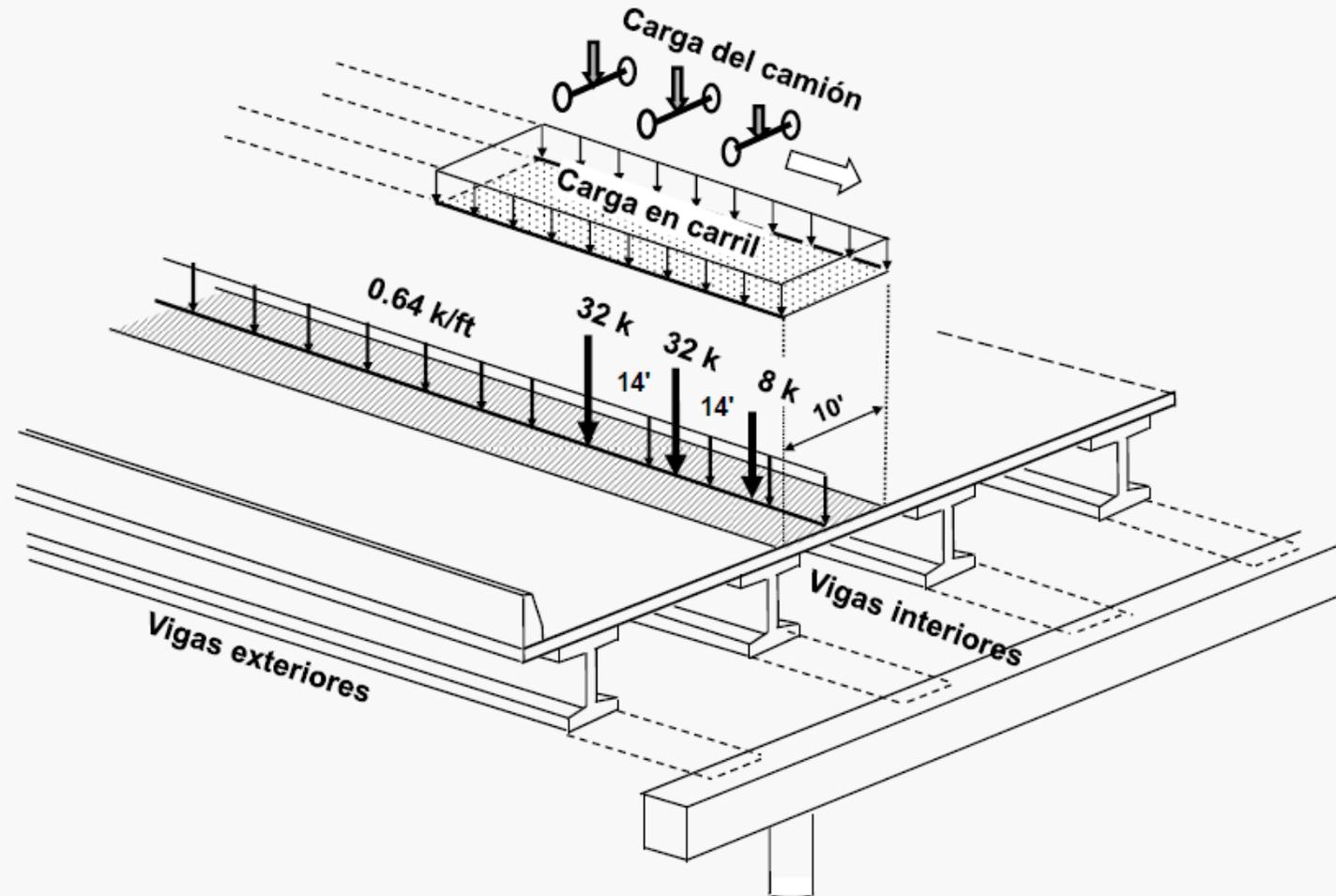
Número de carriles cargados	Factores de presencia múltiple, $m$
1	1.20
2	1.00
3	0.85
> 3	0.65

El modelo AASHTO asume que existe la misma probabilidad que exista:

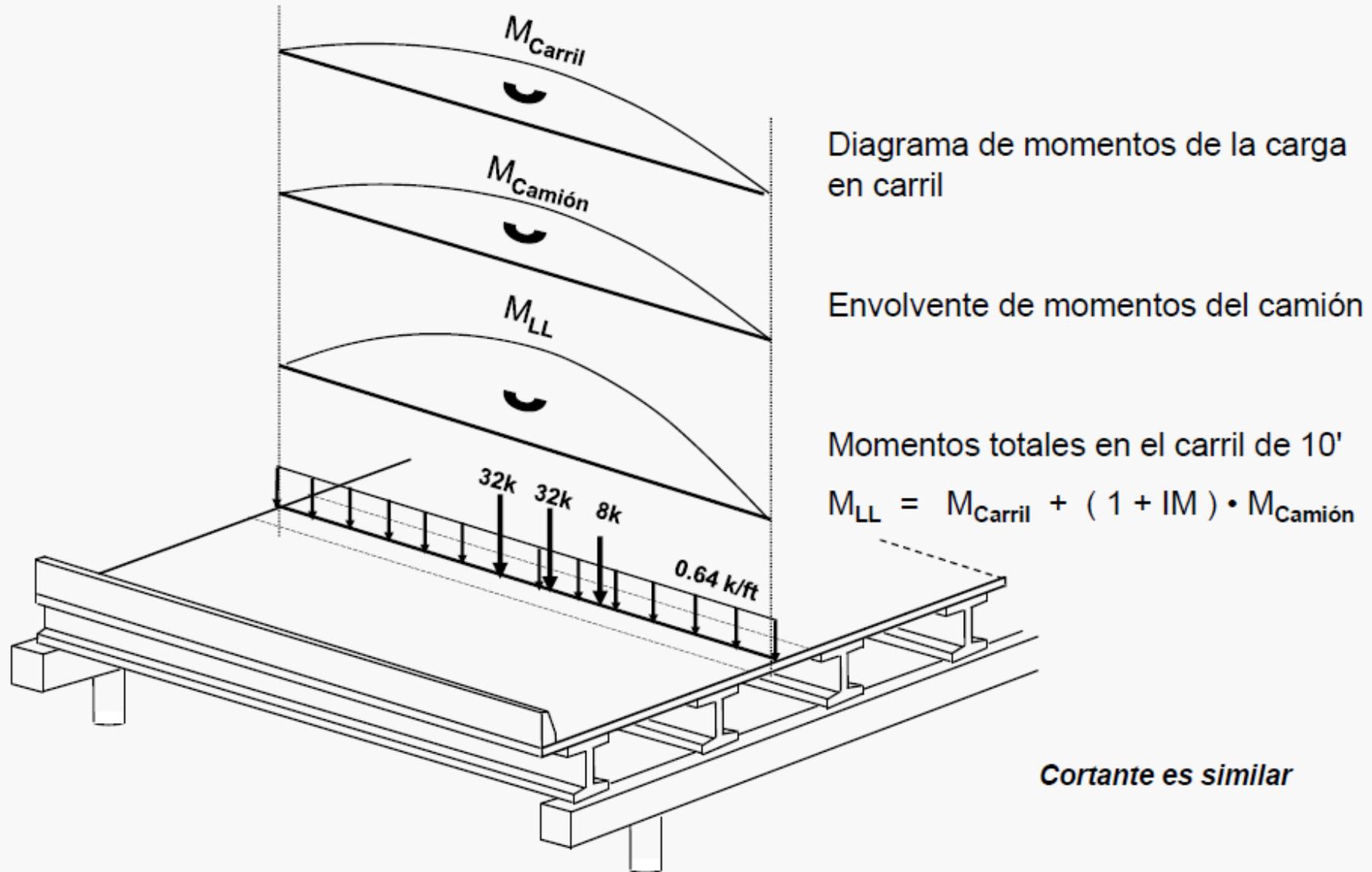
- Un vehículo que es 120% más pesado que el *Vehículo de Diseño* en un carril
- Dos *Vehículos de Diseño* en dos carriles adyacentes
- Tres vehículos que cada uno produce 85% de la carga del *Vehículo de Diseño* en tres carriles adyacentes
- Cuatro ó más vehículos que cada uno produce 65% de la carga del *Vehículo de Diseño* en carriles adyacentes

# Método Simplificado AASHTO para Calcular M y V en vigas: Factores de Distribución

Para muchos de los puentes presforzados con vigas, AASHTO permite la "distribución" de la *carga viva en el carril de diseño* a las vigas para determinar momentos y cortantes mediante el uso de *factores de distribución*.



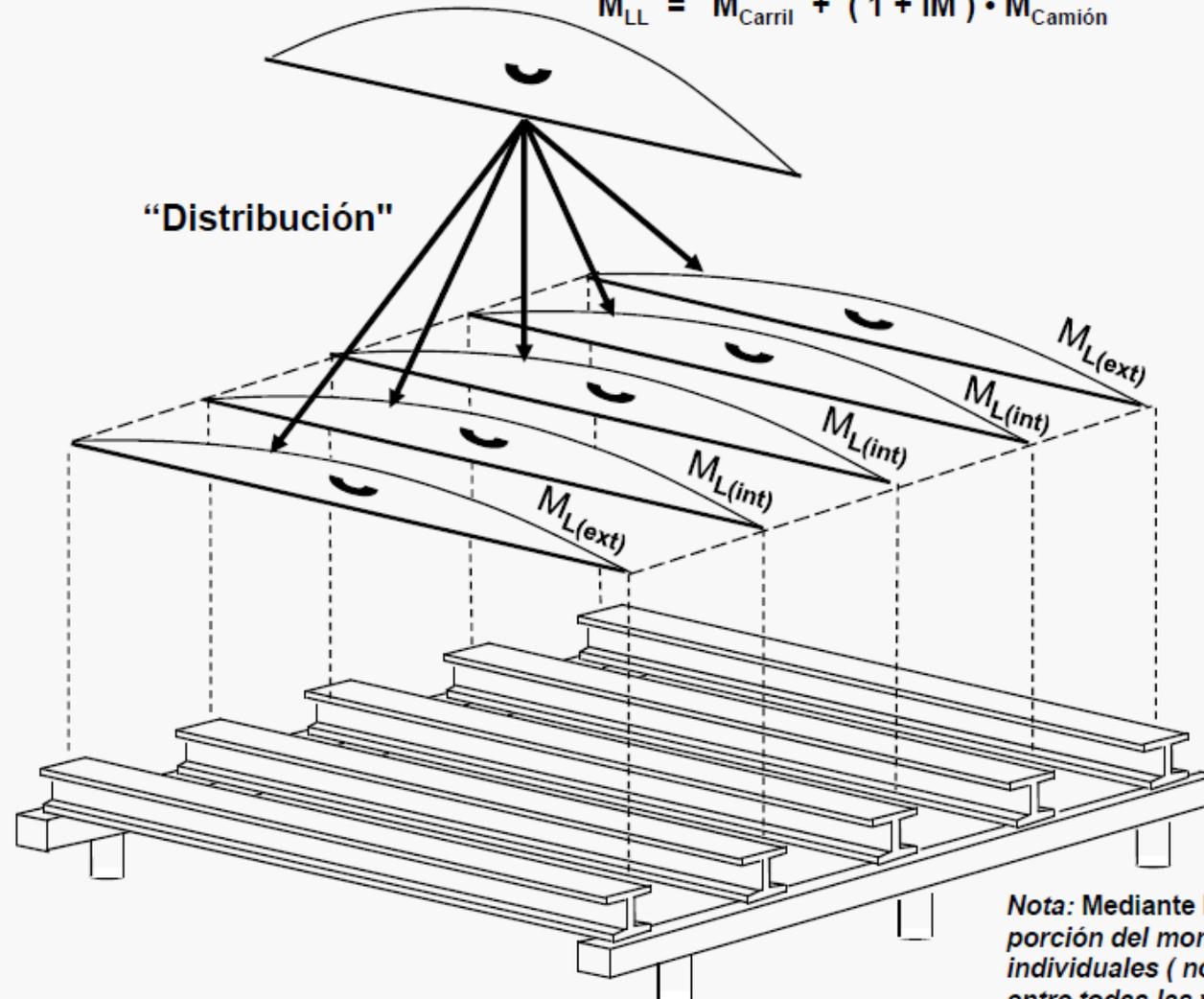
1. Momento total por carga viva en un carril de 10' ( carril de diseño )



2. Usar factores de distribución (DF) de carga viva para obtener los momentos y cortantes de carga viva en vigas individuales

Momentos de carga viva para el carril de 10' :

$$M_{LL} = M_{\text{Carril}} + (1 + IM) \cdot M_{\text{Camión}}$$



$$M_{L(int)} = M_{LL} \cdot DF_{M(int)}$$

$$M_{L(ext)} = M_{LL} \cdot DF_{M(ext)}$$

$M_{L(int)}$  = momento de diseño de carga viva para vigas interiores

$M_{L(ext)}$  = momento de diseño de carga viva para vigas exteriores

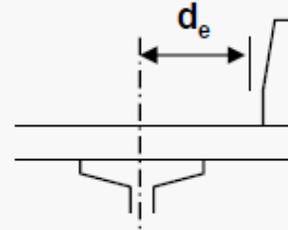
$DF_{M(int)}$ ,  $DF_{M(ext)}$  =  
“factores de distribución” para momento -  
AASHTO Tablas 4.6.2.2.2b-1,  
4.6.2.2.2d-1

( *DF* se simbolizaba "g" in  
la Especificación Estándar de  
AASHTO)

Nota: Mediante la distribución se asigna una porción del momento de carga viva  $M_{LL}$  a vigas individuales ( no se divide el momento de carga viva entre todas las vigas ).

El método simplificado de AASHTO ( factores de distribución ) puede usarse cuando:

- El ancho de la losa es constante
- Al menos existen cuatro vigas
- Las vigas son paralelas y tienen aproximadamente la misma rigidez
- El puente tiene poca curvatura ( menor a 30 grados)
- El voladizo de la losa,  $d_e \leq 3.0$  ft:



- La sección mostrada es una de las secciones que se incluyen en la Tabla 4.6.2.2.1-1 del AASHTO

Supporting Components	Type Of Deck	Typical Cross-Section
Precast Concrete Double Tee Section with Shear Keys and with or without Transverse Post-Tensioning	Integral concrete	<p>(i)</p>

## ***Tablas de factores de distribución aplicables a puentes con vigas presforzadas:***

Tabla 4.6.2.2.2b-1	Momentos en vigas interiores *
Tabla 4.6.2.2.2d-1	Momentos en vigas exteriores *
Tabla 4.6.2.2.3a-1	Cortante en vigas interiores
Tabla 4.6.2.2.3b-1	Cortante en vigas exteriores

### **\* Notas en el uso de *Factores de Distribución* :**

Análisis de estados límite de **Servicio** y **Resistencia** ( momento , cortante ):

- Calcular los factores de distribución para los casos de “Un carril de diseño cargado” y “Dos o más carriles de diseño cargados” "
- Usar el DF mayor para calcular momentos y cortantes en las vigas

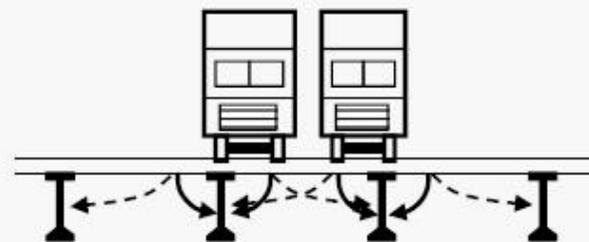
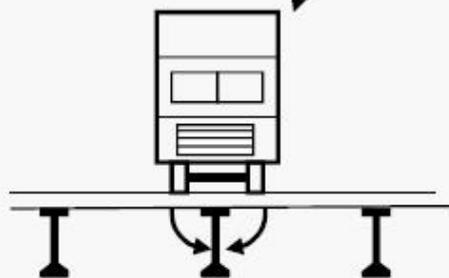
Para el estado límite de **Fatiga** ( momento solamente ) – un solo camión, un carril, *factor de presencia múltiple* = 1

- Obtener momentos de carga viva usando sólo el camión de diseño con un espaciamiento entre ejes medio y trasero de = 30'
- Calcular el *Factor de Distribución* para “Un carril de diseño” solamente
- Dividir el factor de Distribución por 1.20 para eliminar el factor de presencia múltiple implícito en las ecuaciones

## Ejemplo: Factores de distribución para momento en vigas interiores

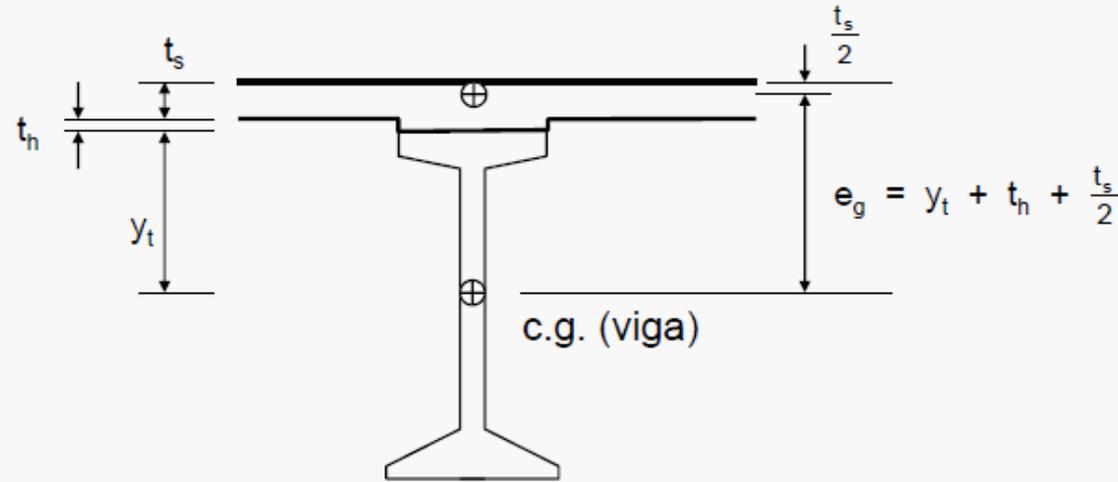
**Table 4.6.2.2b-1—Distribution of Live Loads for Moment in Interior Beams**

Type of Superstructure	Applicable Cross-Section from Table 4.6.2.2.1-1	Distribution Factors	Range of Applicability
Concrete Deck, Filled Grid, Partially Filled Grid, or Unfilled Grid Deck Composite with Reinforced Concrete Slab on Steel or Concrete Beams; Concrete T-Beams, T- and Double T-Sections	a, <b>e, k</b> and also i, j if sufficiently connected to act as a unit	One Design Lane Loaded: $0.06 + \left(\frac{S}{14}\right)^{0.4} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.3} \left(\frac{K_g}{12.0 L t_s^3}\right)^{0.1}$	$3.5 \leq S \leq 16.0$ $4.5 \leq t_s \leq 12.0$ $20 \leq L \leq 240$ $N_b \geq 4$ $10,000 \leq K_g \leq 7,000,000$
		Two or More Design Lanes Loaded: $0.075 + \left(\frac{S}{9.5}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{12.0 L t_s^3}\right)^{0.1}$	
		use lesser of the values obtained from the equation above with $N_b = 3$ or the lever rule	$N_b = 3$



Nota: Los factores de presencia múltiple están incluidos en las ecuaciones para factores de distribución! No usar factores de presencia múltiple cuando se usa el método aproximado.

$DF_{M(int)}$  ( momento, viga interior, dos carriles cargados ):



$$DF_{M(int)} = 0.075 + \left( \frac{S}{9.5} \right)^{0.6} \left( \frac{S}{L} \right)^{0.2} \left( \frac{K_g}{12.0L t^3} \right)^{0.1}$$

L = longitud de la viga, ft

S = espaciamiento centro-a-centro entre vigas, ft

A = Area de la viga , in<sup>2</sup>

I = Momento de inercia de la viga, in<sup>2</sup>

n = relación modular (E viga/ E losa )

$e_g$  = distancia entre centros de gravedad de la viga y losa, in

$$K_g = n ( I + A e_g^2 )$$

Ejemplo numérico:

Claro:  $L = 140'$

Espacio entre vigas:  $S = 8.0'$

Espesor de losa:  $t_s = 7.5''$

Espesor del aumento:  $t_h = 1.5''$

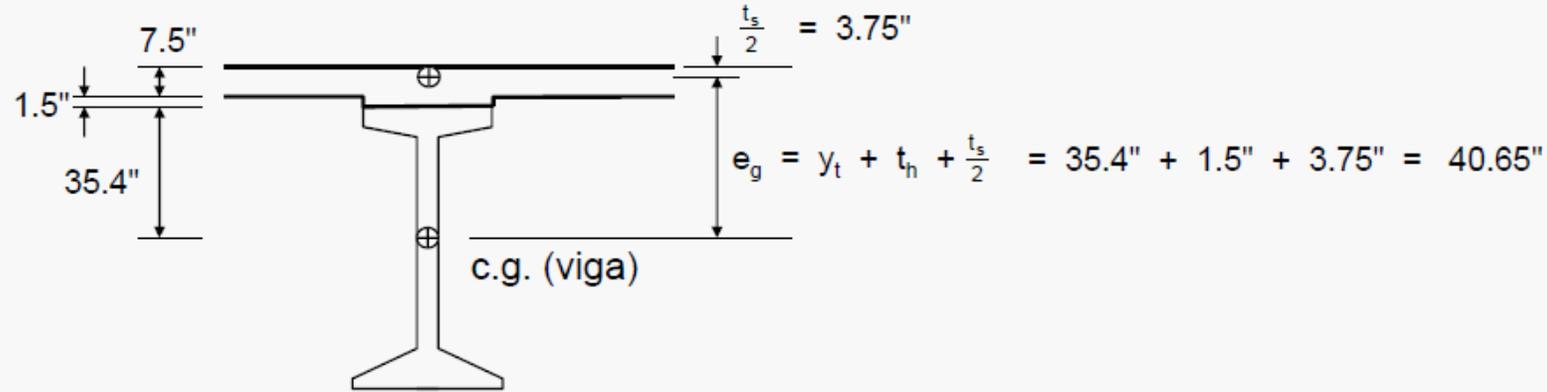
Viga:  $E_g = 4,800 \text{ ksi}$

Losa:  $E_s = 4,000 \text{ ksi}$

Viga BT-72:  $A_g = 767 \text{ in}^2$

$y_t = 35.40 \text{ in.}$   $I_g = 545,850 \text{ in}^4$

Viga interior ( dos carriles cargados )



$$n = \frac{E_g}{E_s} = \frac{4,800 \text{ ksi}}{4,000 \text{ ksi}} = 1.20$$

$$K_g = n ( I + A e_g^2 ) = 1.20 ( 545,850 \text{ in}^4 + 767 \text{ in}^2 ( 40.65 \text{ in} )^2 ) = 2,175,910 \text{ in}^4$$

$$\begin{aligned} DF_{M(int)} &= 0.075 + \left( \frac{S}{9.5} \right)^{0.6} \left( \frac{S}{L} \right)^{0.2} \left( \frac{K_g}{12.0 L t^3} \right)^{0.1} \\ &= 0.075 + \left( \frac{8.0}{9.5} \right)^{0.6} \left( \frac{8.0}{140} \right)^{0.2} \left( \frac{2,175,910}{12.0 \cdot 140 \cdot (7.5)^3} \right)^{0.1} = 0.6443 \end{aligned}$$

$DF_{M(int)}$  ( momento , viga interior, un carril cargado ):

$$DF_{M(int)} = 0.06 + \left( \frac{S}{14} \right)^{0.4} \left( \frac{S}{L} \right)^{0.3} \left( \frac{K_g}{12.0L t^3} \right)^{0.1}$$

Ejemplo numérico ( ver diapositiva anterior )

$$n = \frac{E_g}{E_s} = \frac{4,800 \text{ ksi}}{4,000 \text{ ksi}} = 1.20$$

$$K_g = n ( I + A e_g^2 ) = 1.20 ( 545,850 \text{ in}^4 + 767 \text{ in}^2 ( 40.65 \text{ in} )^2 ) = 2,175,910 \text{ in}^4$$

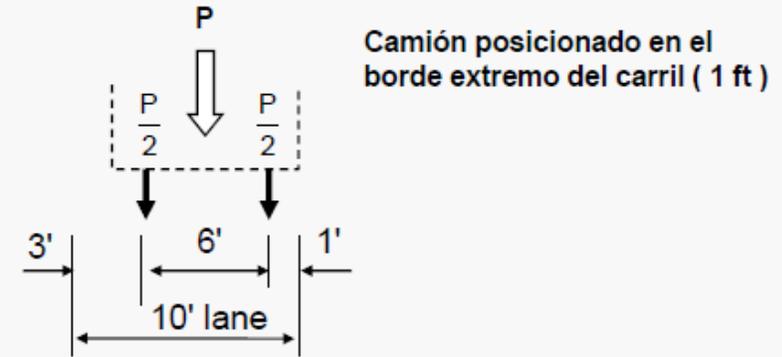
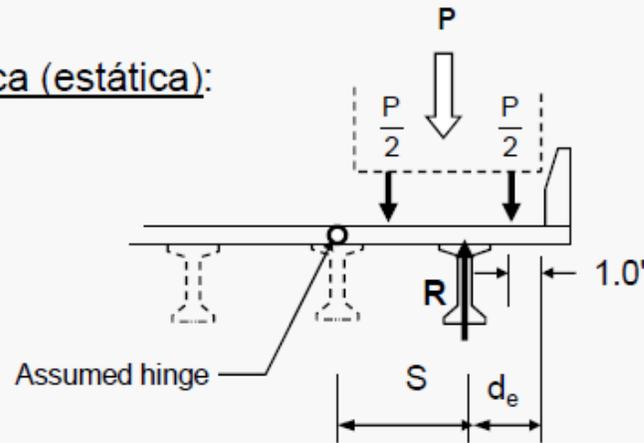
$$DF_{M(int)} = 0.06 + \left( \frac{8.0}{14} \right)^{0.4} \left( \frac{8.0}{140} \right)^{0.3} \left( \frac{2,175,910}{12.0 \bullet 140 \bullet (7.5)^3} \right)^{0.1} = 0.4390$$

Para dos carriles cargados ( diapositiva previa ):  $DF_{M(int)} = 0.6443 > 0.4390$

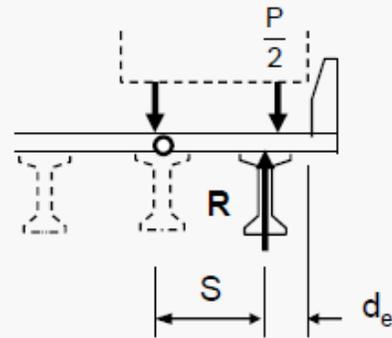
Gobierna

$DF_{M(\text{ext})}$  ( momento , viga exterior, un carril cargado ):

Regla de la palanca (estática):

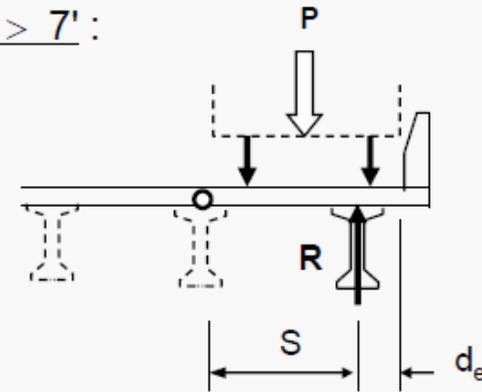


$S + d_e \leq 7'$ :



$$DF_{M(\text{ext})} = \frac{R}{P} = \left( \frac{S + d_e - 1}{2S} \right)$$

$S + d_e > 7'$ :



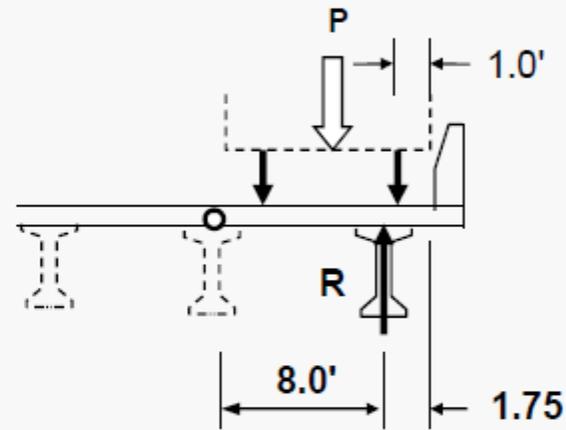
$$DF_{M(\text{ext})} = \frac{R}{P} = \left( \frac{S + d_e - 4}{S} \right)$$

Ejemplo numérico:

Espacio entre vigas:  $S = 8.0$  ft  
Viga exterior, un carril cargado

$$d_e = 1' - 9'' = 1.75 \text{ ft}$$

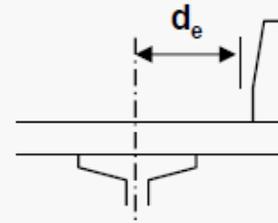
$$S + d_e = 8.0 \text{ ft} + 1.75 \text{ ft} = 9.75 \text{ ft} > 7.0 \text{ ft}$$



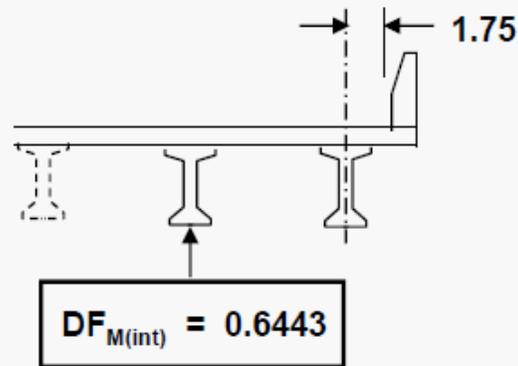
$$DF_{M(\text{ext})} = \frac{R}{P} = \left( \frac{S + d_e - 4}{S} \right) = \left( \frac{8.0 + 1.75 - 4}{8.0} \right) = 0.7188$$

$DF_{M(\text{ext})}$  ( momento, viga exterior, dos carriles cargados ):

$$DF_{M(\text{ext})} = \left( 0.6 + \frac{d_e}{10} \right) \cdot DF_{M(\text{int})}$$



Ejemplo numérico ( continúa de la diapositiva anterior ):



$$DF_{M(\text{ext})} = \left( 0.6 + \frac{1.75}{10} \right) \cdot 0.6443 = 0.4993$$

Para un carril cargado ( diapositiva anterior ):  $DF_{M(\text{int})} = \underline{0.7188} > 0.4993$   
*Usar*

Ejemplo numérico ( conclusión ):

Momento de carga viva para el carril de diseño de 10':

$$M_{LL} = M_{\text{Carril}} + (1 + IM) \cdot M_{\text{Camión}} = 4547.2 \text{ ft-k}$$

$$DF_{N(\text{ext})} = 0.7188 \text{ ( dos carriles cargados )}$$

$$DF_{N(\text{int})} = 0.6443 \text{ ( dos carriles cargados )}$$

$$M_{L(\text{int})} = 0.6443 ( 4547.2 \text{ ft-k} ) = 2930.0 \text{ ft-k}$$

$$M_{L(\text{ext})} = 0.7188 ( 4547.2 \text{ ft-k} ) = 3268.5 \text{ ft-k}$$

