

# 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

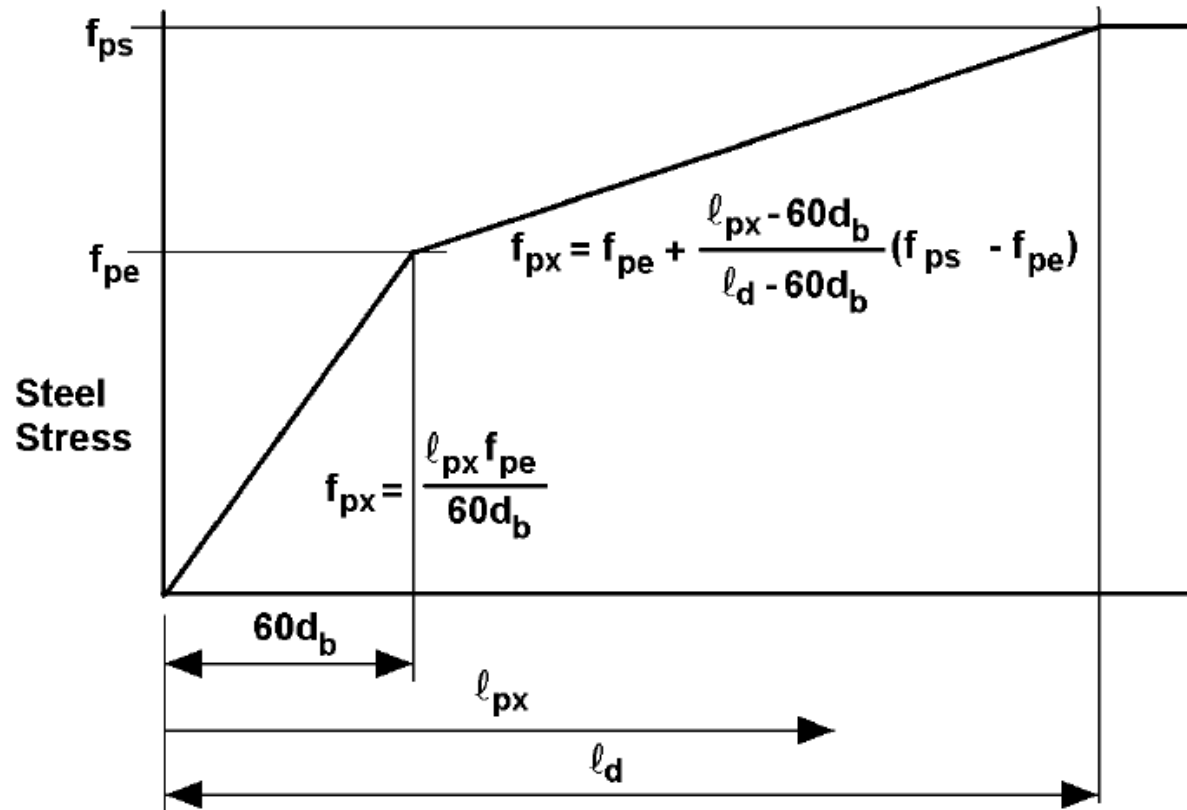
# Tópicos del Curso

- 1. Filosofía del Código LRFD
- 2. Cargas de Servicio en Subestructuras
- 3. Cargas Extremas en Puentes
- 4. Análisis Estructural Caso 1
- 5. Introducción al Concreto Estructural
- 6. Propiedades materiales Concreto Estructural
- 7. Diseño Flexión
- 8. Diseño Corte
- **9. Diseño de Puente 1 Vano**

## Longitudes de Transferencia y Desarrollo de Torones

- Los esfuerzos en los torones se transfieren al concreto mediante adherencia mecánica.
- **Longitud de transferencia** es la distancia que se necesita para transferir el esfuerzo efectivo del presfuerzo,  $f_{pe}$ , al concreto
- **Longitud de desarrollo** es la distancia necesaria para desarrollar el esfuerzo máximo en torones,  $f_{ps}$ , en la condición de resistencia última a flexión.

# Longitudes de Transferencia y Desarrollo de Torones



El diagrama muestra los conceptos de longitud de transferencia y desarrollo.

Longitud de transferencia se toma igual a 60 diámetros.

# Longitudes de Transferencia y Desarrollo de Torones

$$l_{tr} = 60d_b$$

$$l_d = K \left( f_{ps} - \frac{2}{3} f_{pe} \right) d_b$$

$f_{ps}$  = esfuerzo en torones al alcanzar el estado límite de resistencia ( $M_R$ )

$f_{pe}$  = esfuerzo efectivo en torones después de pérdidas

$d_b$  = diámetro de torón

# Longitudes de Transferencia y Desarrollo de Torones

$\kappa$  es un factor

= 1.0 en páneces presforzados, pilas o elementos pretensados < 24 in. de altura

= 1.6 en elementos pretensados > 24 in. de altura.

El cálculo de longitud de transferencia se necesita para revisar la condición de transferencia de presfuerzo y para revisar los límites permisibles en servicio.

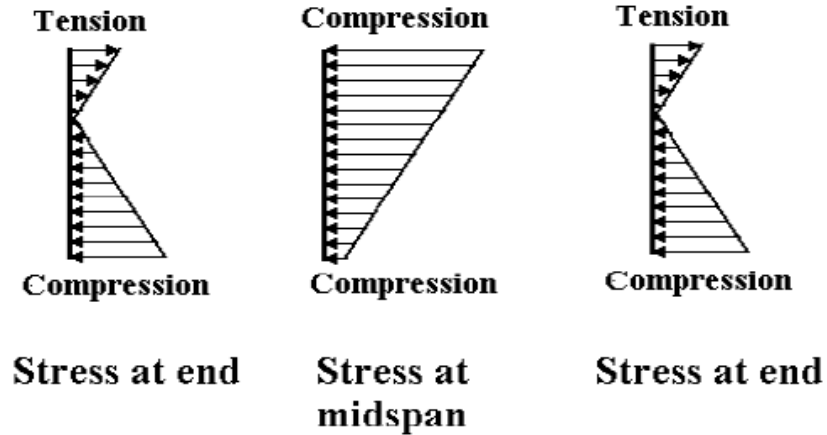
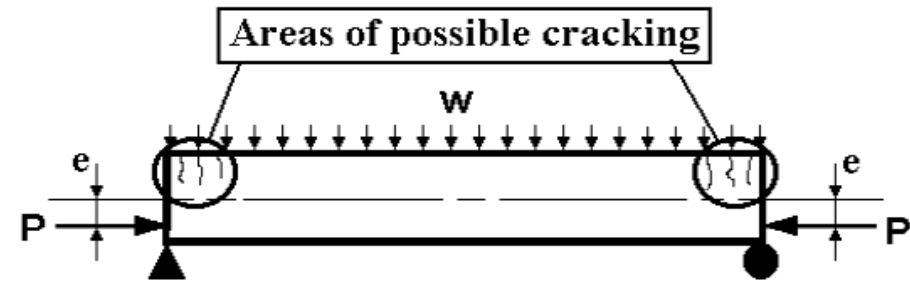
Longitud de desarrollo se necesitará para el estado límite de falla y se calculará posteriormente.

# Esfuerzos al Transferir Presfuerzo

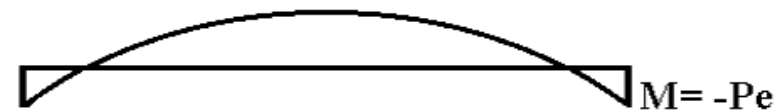
Los esfuerzos generados por torones rectos son constantes a lo largo de la viga.

En los extremos, esfuerzos de tensión se desarrollan en la fibra superior de la viga. tensile stresses can develop on top.

AASHTO LRFD no permite agrietamiento sin control en éstas zonas.



$$M_{\max} = \frac{wL^2}{8} - Pe$$



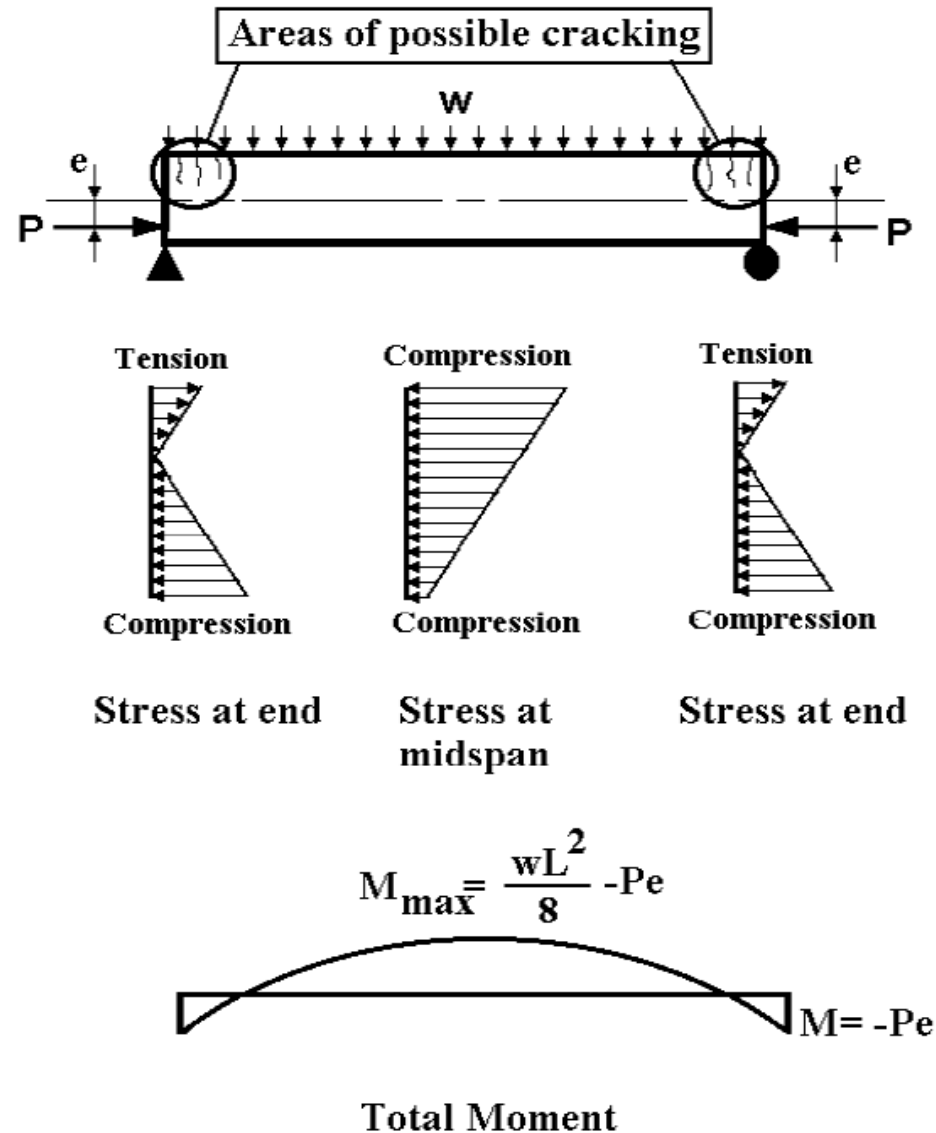
Total Moment



# Esfuerzos al Transferir Presfuerzo

La situación es crítica al momento de transferir la fuerza de presfuerzo.

La fuerza de presfuerzo está a su valor máximo, el concreto tiene su resistencia más baja y el peso propio es la única fuerza actuando en la viga.

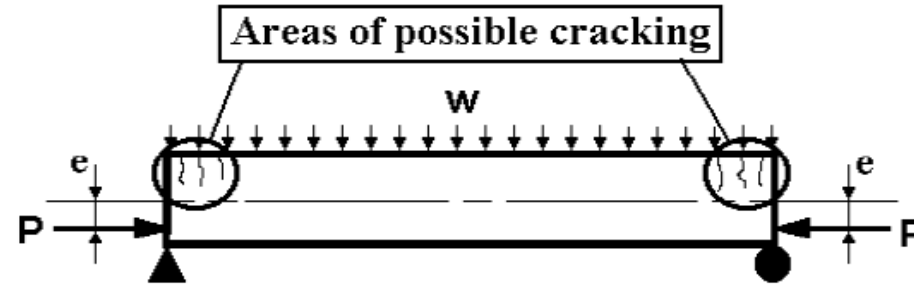


# Esfuerzos al Transferir Presfuerzo

Definición:

Zona de tensión  
precomprimida:

La zona (lado) de la viga que está precomprimida por la fuerza de presfuerzo, pero que eventualmente puede estar en tensión con cargas de servicio.



En esta figura, la zona de tensión precomprimida es la parte inferior de la viga.

# Esfuerzos al Transferir Presfuerzo

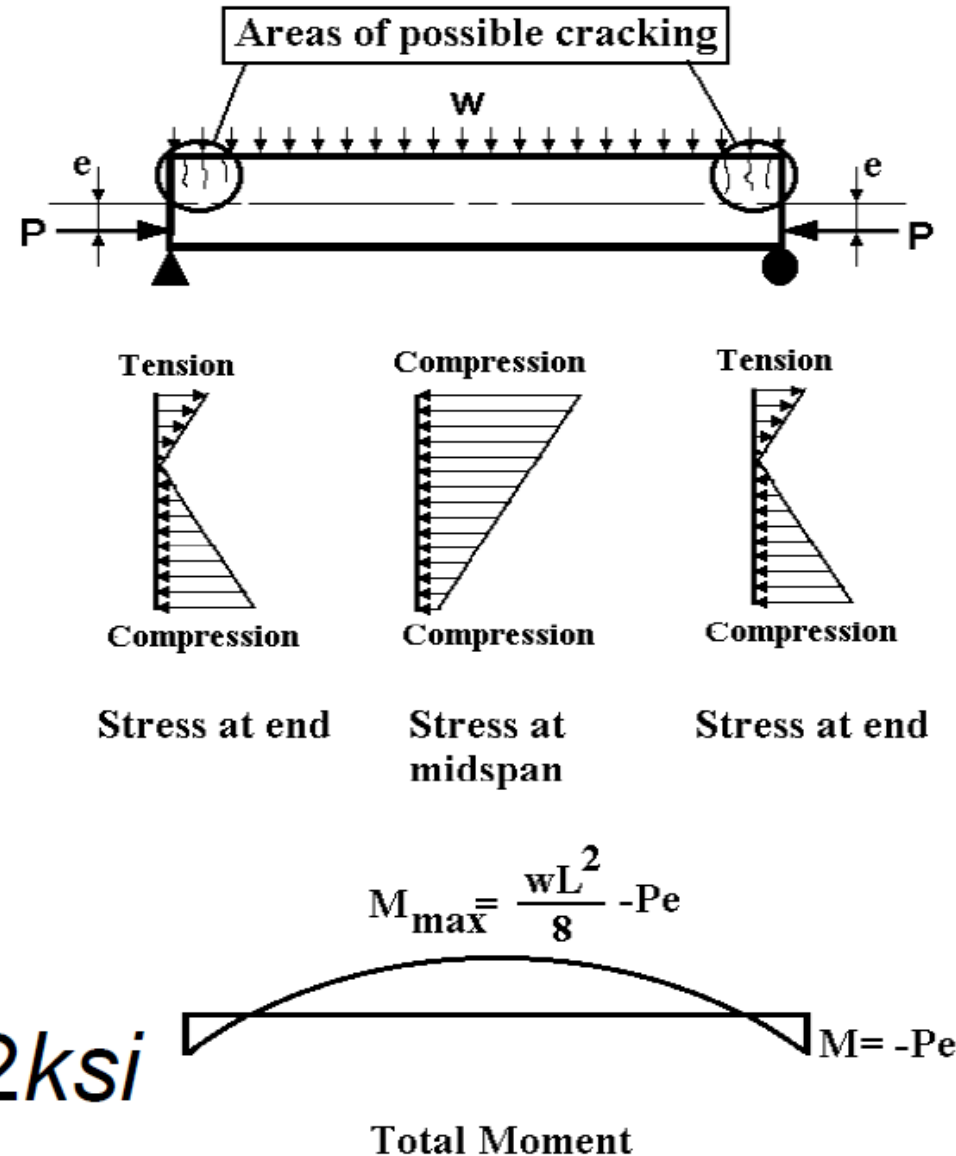
AASHTO LRFD Tabla 5.9.4.1.2-1 limita los esfuerzos de tensión en áreas fuera de zonas de tensión precomprimidas.

Con acero adherido:

$$f_t \leq 0.24 \sqrt{f_{ci}}$$

Sin acero adherido:

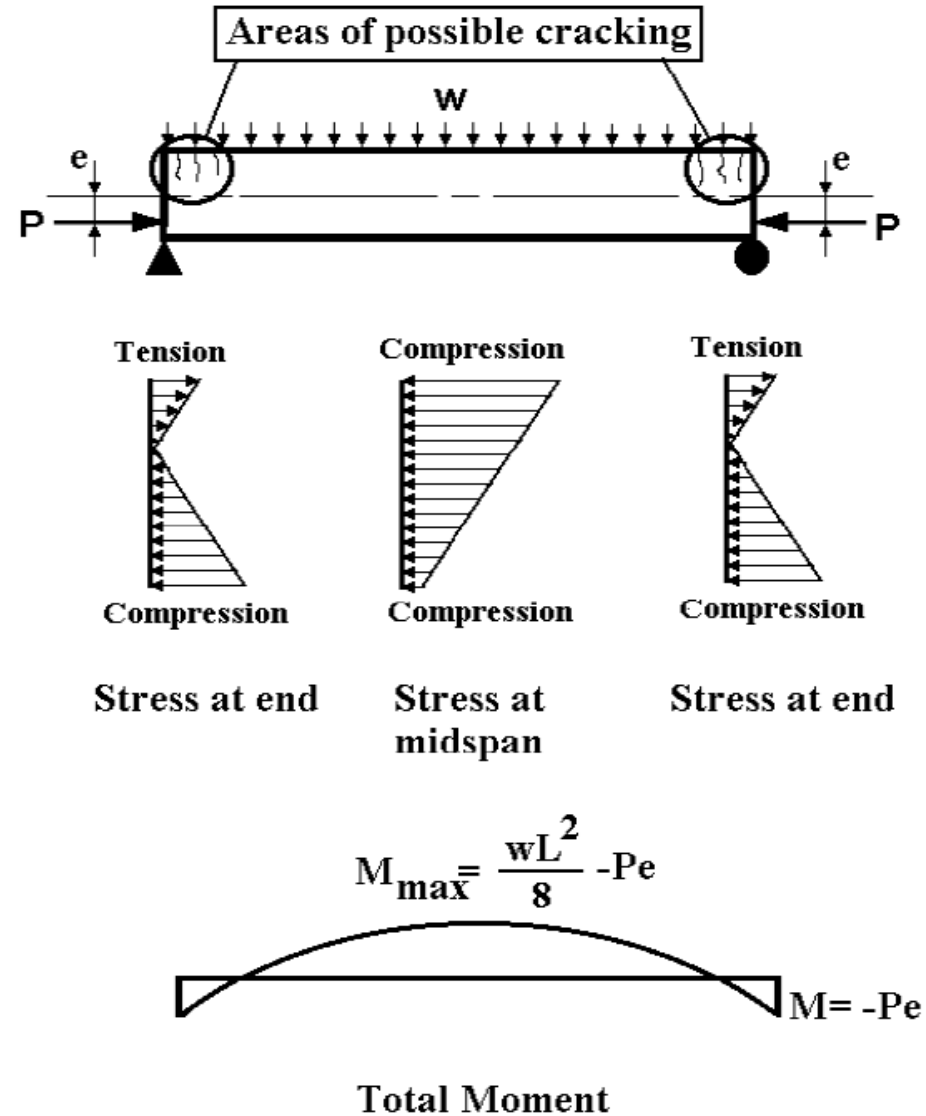
$$f_t \leq 0.0948 \sqrt{f_{ci}} \leq 0.2 \text{ ksi}$$



# Esfuerzos al Transferir Presfuerzo

AASHTO LRFD Tabla 5.9.4.1.2-1 también limita los esfuerzos de compresión en zonas de tensión precomprimidas.

$$f_c \leq 0.6f_{ci}'$$



# Esfuerzos al Transferir Presfuerzo

$$\text{Transfer Length} = 60d_b = 60(0.6'') = 36'' = 3.0 \text{ ft}$$

Momento por peso propio en sección a 3 ft:

$$M_{\text{Viga}} = 0.5wx(L - x)$$

$$M_{\text{Viga}} = \frac{(1.057 \text{ kip / ft})(3 \text{ ft})}{2}(76 \text{ ft} - 3 \text{ ft})$$

$$M_{\text{Viga}} = 115.7 \text{ kip} - \text{ft}$$

Se podría utilizar la longitud total de la viga en éste cálculo (76 ft) pero la diferencia sería mínima.

## Esfuerzos al Transferir Presfuerzo Fibra Superior en Sección a 3 ft del Extremo

$$f_t = \frac{P_i}{A} - \frac{P_i e_{pre}}{S_t} + \frac{M_{Viga}}{S_t}$$

$P_i$  es la fuerza inicial del presfuerzo después de pérdida elástica, ES.

ES se calculó como 3.5%.

$$P_i = 12 \text{ torones } (0.217 \text{ in}^2/\text{torón})(0.965)(189 \text{ ksi})$$

$$P_i = 475 \text{ kips}$$

## Esfuerzos al Transferir Presfuerzo Fibra Superior en Sección a 3 ft del Extremo

$$f_t = \frac{P_i}{A} - \frac{P_i e_{pre}}{S_t} + \frac{M_{Viga}}{S_t}$$

$$f_t = \frac{475 \text{ kip}}{975.9 \text{ in}^2} - \frac{(475 \text{ kip})(24.6 \text{ in})}{11,268 \text{ in}^3} + \frac{(115.7 \text{ kip-ft})(12 \text{ in/ft})}{11,268 \text{ in}^3}$$

$$f_t = -0.427 \text{ ksi (Tension)}$$

Limite :

$$f_t = -0.0948\sqrt{f'_{ci}} \text{ ksi} \geq -0.2 \text{ ksi (Tension)}$$

$$f_t = -0.0948\sqrt{5} = -0.212 \text{ ksi}$$

No satisface ya que el  
esfuerzo de tensión es más  
alto

## Esfuerzos al Transferir Presfuerzo Fibra Inferior en Sección a 3 ft del Extremo

$$f_b = \frac{P_i}{A} + \frac{P_i e_{pre}}{S_b} - \frac{M_{Viga}}{S_b}$$

$$f_b = \frac{475 \text{ kip}}{975.9 \text{ in}^2} + \frac{(475 \text{ kip})(24.6 \text{ in})}{6,185 \text{ in}^3} - \frac{(115.7 \text{ kip} \cdot \text{ft})(12 \text{ in} / \text{ft})}{6,185 \text{ in}^3}$$

$$f_b = +2.15 \text{ ksi (C)}$$

Limite:

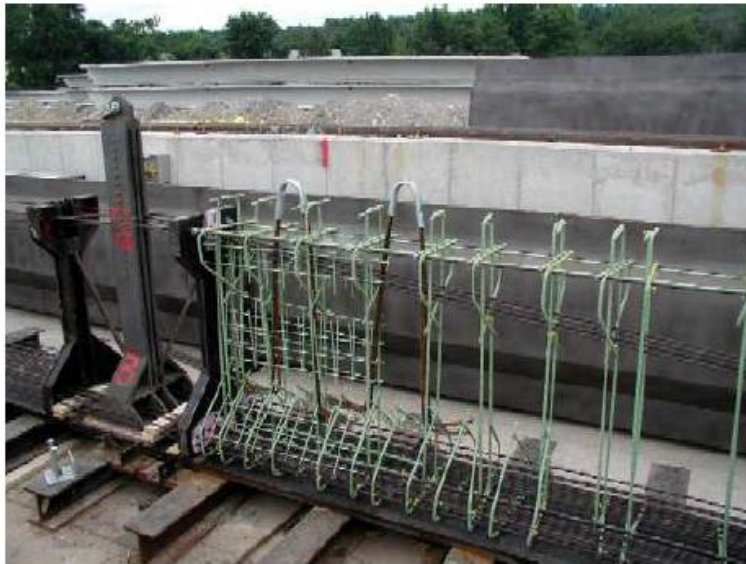
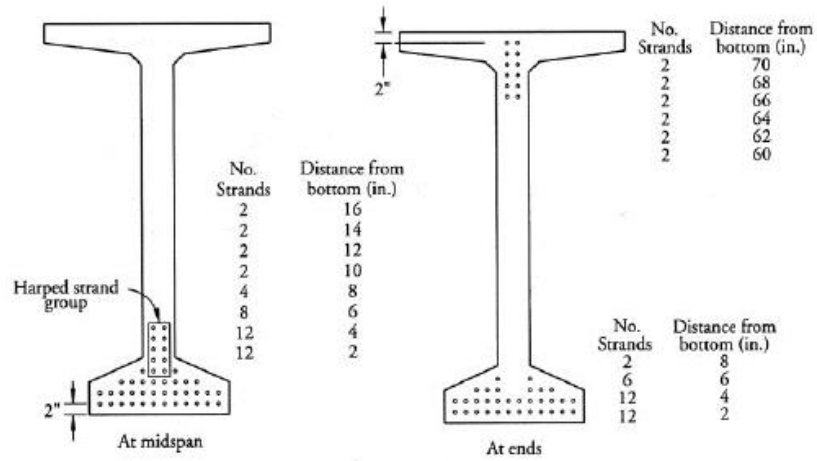
$$f_b = 0.6f'_{ci} \text{ ksi}$$

$$f_b = 0.6(5 \text{ ksi}) = 3.0 \text{ ksi} \quad \boxed{\text{Sí cumple.}}$$



# Control de Tensión en Fibra Superior

- Desadherir torones
  - Algunos torones se cubren con una camisa plástica para impedir su adherencia con el concreto.
  - Se reduce la fuerza  $P_i$  del presfuerzo.
- Deflectar torones
  - Se deflecan los torones hacia arriba para reducir la excentricidad  $e$ .

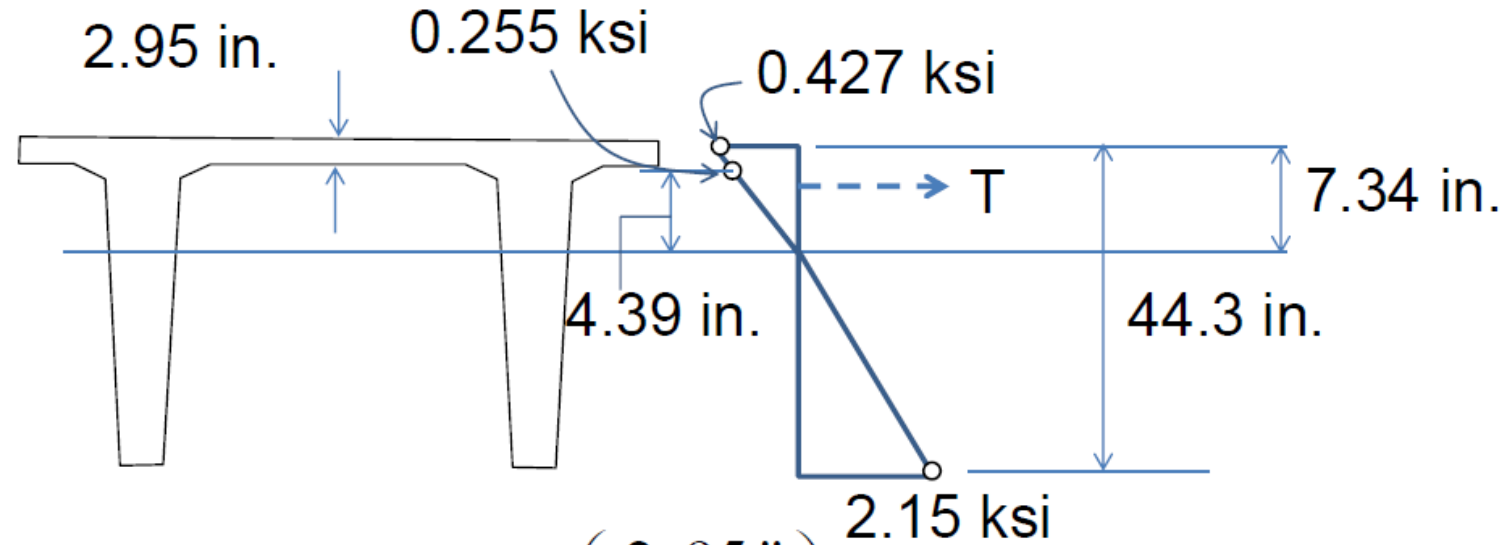


Torones deflectados - ejemplo

# Control de Tensión en Fibra Superior

- Añadir acero de refuerzo en parte superior
  - El acero de refuerzo debe resistir la fuerza total de tensión.
    - Se calcula con base en esfuerzos elásticos
    - Adherencia perfecta
    - El esfuerzo en el acero es  $0.6 f_y$  ó 30 ksi (menor)

# Control de Tensión en Fibra Superior



$$T = (0.427 \text{ ksi} + 0.255 \text{ ksi}) \left( \frac{2.95''}{2} \right) (93'') + \dots$$

$$+ \dots (0.255 \text{ ksi}) \left( \frac{4.39''}{2} \right) (10.8'')(2)$$

$$T = 105.6 \text{ kip}$$

$$A_s = \frac{105.6 \text{ kip}}{30 \text{ ksi}} = 3.52 \text{ in}^2 \quad (8 \text{ No.6})$$

Ancho  
aproximado  
por nervio

## Esfuerzos en Condiciones de Servicio

- Elementos de concreto presforzado deben revisarse en condiciones de servicio.
- La combinación de Servicio I aplica al lado de compresión de la viga y a la losa.
  - Los esfuerzos en la losa prácticamente nunca gobiernan
- La combinación de Servicio III se usa para revisar esfuerzos en la zona de tensión precomprimida.

# Esfuerzos en Condiciones de Servicio

Momentos sin factores de carga (recordatorio):

Localizacion		Seccion Viga*		Seccion compuesta				Seccion compuesta				HL - 93 (LL+IM)	
Distancia x ft	Seccion x/L	DC		DC		DW		LL carril		LL HS20		HL - 93 (LL+IM)	
		Cortante kip	Momento kip-ft	Cortante kip	Momento kip-ft	Cortante kip	Momento kip-ft	Cortante kip	Momento kip-ft	Cortante kip	Momento kip-ft	Cortante kip	Momento kip-ft
0.0	0.0	54.0	0.0	4.5	0.0	9.4	0.0	24.0	0.0	61.1	0.0	84.2	0.0
3.8	0.1	48.6	192.4	4.1	16.0	8.4	33.4	21.6	85.5	57.5	216.1	78.5	294.6
7.5	0.1	43.2	364.5	3.6	30.4	7.5	63.3	19.2	162.0	53.9	404.7	72.7	553.2
11.3	0.2	37.8	516.4	3.2	43.0	6.6	89.6	16.8	229.5	50.3	566.3	67.0	776.3
15.0	0.2	32.4	648.0	2.7	54.0	5.6	112.5	14.4	288.0	46.7	700.9	61.2	964.0
18.8	0.3	27.0	759.4	2.3	63.3	4.7	131.8	12.0	337.5	43.1	820.2	55.5	1128.4
22.5	0.3	21.6	850.5	1.8	70.9	3.8	147.7	9.6	378.0	39.5	914.3	49.7	1259.3
26.3	0.4	16.2	921.4	1.4	76.8	2.8	160.0	7.2	409.5	35.9	981.5	44.0	1354.7
30.0	0.4	10.8	972.0	0.9	81.0	1.9	168.8	4.8	432.0	32.3	1021.6	38.2	1414.7
33.8	0.5	5.4	1002.4	0.5	83.5	0.9	174.0	2.4	445.5	28.7	1039.3	32.5	1443.9
37.5	0.5	0.0	1012.5	0.0	84.4	0.0	175.8	0.0	450.0	-25.1	1066.0	-26.7	1475.5
41.3	0.6	-5.4	1002.4	-0.5	83.5	-0.9	174.0	-2.4	445.5	-28.7	1065.6	-32.5	1471.6
45.0	0.6	-10.8	972.0	-0.9	81.0	-1.9	168.8	-4.8	432.0	-32.3	1038.3	-38.2	1432.2
48.8	0.7	-16.2	921.4	-1.4	76.8	-2.8	160.0	-7.2	409.5	-35.9	984.0	-44.0	1357.4
52.5	0.7	-21.6	850.5	-1.8	70.9	-3.8	147.7	-9.6	378.0	-39.5	902.7	-49.7	1247.1
56.3	0.8	-27.0	759.4	-2.3	63.3	-4.7	131.8	-12.0	337.5	-43.1	794.4	-55.5	1101.3
60.0	0.8	-32.4	648.0	-2.7	54.0	-5.6	112.5	-14.4	288.0	-46.7	667.5	-61.2	928.8
63.8	0.9	-37.8	516.4	-3.2	43.0	-6.6	89.6	-16.8	229.5	-50.3	518.7	-67.0	726.4
67.5	0.9	-43.2	364.5	-3.6	30.4	-7.5	63.3	-19.2	162.0	-53.9	351.9	-72.7	497.7
71.3	1.0	-48.6	192.4	-4.1	16.0	-8.4	33.4	-21.6	85.5	-57.5	189.6	-78.5	266.7
75.0	1.0	-54.0	0.0	-4.5	0.0	-9.4	0.0	-24.0	0.0	-61.1	0.0	-84.2	0.0

\*Incluye peso propio + peso losa

## Esfuerzos en Condiciones de Servicio – Fibra Inferior de Viga: Centro del Claro, Cargas Totales (Servicio III)

$$f_b = \frac{P_{\text{eff1}}}{A} + \frac{P_{\text{eff1}} e_{\text{pre}}}{S_b} + \frac{P_{\text{eff2}}}{A_c} + \frac{P_{\text{eff2}} e_{\text{pos}}}{S_{b,c}} - \dots$$

$$- \frac{M_{\text{viga}} + M_{\text{losa}}}{S_b} - \frac{M_{\text{barr}} + M_{\text{DW}} + 0.8M_{\text{LL+IM}}}{S_{b,c}}$$

$$f_b = -0.346 \text{ ksi} \quad \mathbf{OK}$$

Limite:

$$f_b = -0.19\sqrt{f'_c} \text{ ksi}$$

$$f_b = -0.19\sqrt{7} = -0.503 \text{ ksi}$$

$P_{\text{eff1}} = 384 \text{ kip}$
$P_{\text{eff2}} = 448 \text{ kip}$
$M_{\text{viga}} + M_{\text{losa}} = 1012.5 \text{ kip-ft}$
$M_{\text{barr}} = 84.4 \text{ kip-ft}$
$M_{\text{DW}} = 175.8 \text{ kip-ft}$
$M_{\text{LL+IM}} = 1475.5 \text{ kip-ft}$
$A = 975.9 \text{ in}^2$
$A_c = 1254 \text{ in}^2$
$S_b = 6,185 \text{ in}^3$
$S_{b,c} = 7,540 \text{ in}^3$

En esta revisión se usaron valores con la pérdida supuesta del 22%.

## Esfuerzos en Condiciones de Servicio – Fibra Superior de Viga: Centro del Claro, Cargas Permanentes (Servicio I)

$$f_t = \frac{P_{\text{eff1}}}{A} - \frac{P_{\text{eff1}} e_{\text{pre}}}{S_t} + \frac{P_{\text{eff2}}}{A_c} - \frac{P_{\text{eff2}} e_{\text{pos}}}{S_{t,c}} + \dots$$
$$+ \frac{M_{\text{viga}} + M_{\text{losa}}}{S_t} + \frac{M_{\text{barr}} + M_{\text{DW}}}{S_{t,c}}$$

$$f_t = +0.547 \text{ ksi}$$

**OK**

Limite :

$$f_c = 0.45f'_c \text{ ksi} = 3.15 \text{ ksi}$$

$$P_{\text{eff1}} = 384 \text{ kip}$$

$$P_{\text{eff2}} = 448 \text{ kip}$$

$$M_{\text{viga}} + M_{\text{losa}} = 1012.5 \text{ kip-ft}$$

$$M_{\text{barr}} = 84.4 \text{ kip-ft}$$

$$M_{\text{DW}} = 175.8 \text{ kip-ft}$$

$$M_{\text{LL+IM}} = 1475.5 \text{ kip-ft}$$

$$S_t = 11,275 \text{ in}^3$$

$$S_{t,c} = 20,766 \text{ in}^3 \text{ (viga)}$$



## Esfuerzos en Condiciones de Servicio – Fibra Superior de Viga: Centro del Claro, Cargas Totales (Servicio I)

$$f_t = \frac{P_{\text{eff1}}}{A} - \frac{P_{\text{eff1}}e_{\text{pre}}}{S_t} + \frac{P_{\text{eff2}}}{A_c} - \frac{P_{\text{eff2}}e_{\text{pos}}}{S_{t,c}} - \dots$$
$$+ \frac{M_{\text{viga}} + M_{\text{losa}}}{S_t} + \frac{M_{\text{barr}} + M_{\text{DW}} + M_{\text{LL+IM}}}{S_{t,c}}$$

$$f_t = +1.340 \text{ ksi}$$

**OK**

Limite :

$$f_c = 0.60f'_c \text{ ksi} = 4.20 \text{ ksi}$$

$$P_{\text{eff1}} = 384 \text{ kip}$$

$$P_{\text{eff2}} = 448 \text{ kip}$$

$$M_{\text{viga}} + M_{\text{losa}} = 1012.5 \text{ kip-ft}$$

$$M_{\text{barr}} = 84.4 \text{ kip-ft}$$

$$M_{\text{DW}} = 175.8 \text{ kip-ft}$$

$$M_{\text{LL+IM}} = 1475.5 \text{ kip-ft}$$

$$S_t = 11,275 \text{ in}^3$$

$$S_{t,c} = 20,766 \text{ in}^3 \text{ (viga)}$$

## Esfuerzos en Condiciones de Servicio – Fibra Superior de Losa: Centro del Claro, Cargas Permanentes (Servicio I)

$$f_{t,L} = \frac{P_{\text{eff}2}}{A_c} - \frac{P_{\text{eff}2} e_{\text{pos}}}{S_{t,c}} + \frac{M_{\text{barr}} + M_{\text{DW}}}{S_{t,c}}$$

$$f_{t,L} = -0.232 \text{ ksi}$$

**OK**

$P_{\text{eff}2} = 448 \text{ kip}$
$M_{\text{barr}} = 84.4 \text{ kip-ft}$
$M_{\text{DW}} = 175.8 \text{ kip-ft}$
$S_{t,c} = 15,608 \text{ in}^3 \text{ (losa)}$

Limite :

$$f_t = -0.0938 \sqrt{f'_c} \text{ ksi} = -0.251 \text{ ksi}$$

## Esfuerzos en Condiciones de Servicio – Fibra Superior de Losa: Centro del Claro, Cargas Totales (Servicio I)

$$f_{t,L} = \frac{P_{\text{eff}2}}{A_c} - \frac{P_{\text{eff}2} e_{\text{pos}}}{S_{t,c}} + \frac{M_{\text{barr}} + M_{\text{DW}} + M_{\text{LL+IM}}}{S_{t,c}}$$

$$f_{t,L} = +0.902 \text{ ksi}$$

Limite :

$$f_c = 0.60f'_c \text{ ksi} = 2.40 \text{ ksi}$$

**OK**

$P_{\text{eff}2} = 448 \text{ kip}$
$M_{\text{barr}} = 84.4 \text{ kip-ft}$
$M_{\text{DW}} = 175.8 \text{ kip-ft}$
$M_{\text{LL+IM}} = 1475.5 \text{ kip-ft}$
$S_{t,c} = 15,608 \text{ in}^3 \text{ (losa)}$

# Resumen de Esfuerzos de Servicio al Centro del Claro

	Fibra Superior Losa (ksi) Servicio I		Fibra Superior Viga (ksi) Servicio I		Fibra Inferior (ksi) Servicio III
	Cargas permanentes	Cargas totales	Cargas permanentes	Cargas totales	Cargas totales
Centro del claro	-0.232	+0.902	+0.547	+1.340	-0.346
Permisible (ksi)	-0.251	+2.400	+3.150	+4.200	-0.503

# Revisión por Fatiga

Sólo se considera el momento causado por el camión (sin la carga en via) en un carril:

1066 k-ft. Sin carga de carril. Dividir por el factor de presencia múltiple para un carril de 1.2.

$$IM = 15\% \quad DF_{M \text{ un carril}} = 0.57 \text{ carriles por viga}$$

$$M_{\text{fatiga}} = 1066 \text{ k-ft/carril} (0.57 \text{ carriles/viga})(1.15)/1.2$$

$$M_{\text{fatiga}} = 582.3 \text{ k-ft} = 6,988 \text{ k-in}$$

# Revisión por Fatiga

- El camión de fatiga es un HS20, ejes traseros a 30 ft. sin carga en vía.
  - 3.6.1.4.1
- El camión de fatiga usa DF de 1 carril.
  - 3.6.1.4.3b
- Remover Factor de Presencia Múltiple
  - 3.6.1.1.2

# Revisión por Fatiga

Esfuerzo de fatiga + ½ del esfuerzo en la fibra superior de la viga debida al presfuerzo y cargas permanentes:

$$f_{t,F} = \frac{1}{2} \left( \frac{P_{\text{eff1}}}{A} - \frac{P_{\text{eff1}} e_{\text{pre}}}{S_t} + \frac{P_{\text{eff2}}}{A_c} - \frac{P_{\text{eff2}} e_{\text{pos}}}{S_{t,c}} + \frac{M_{\text{viga}} + M_{\text{losa}}}{S_t} + \frac{M_{\text{barr}} + M_{\text{DW}}}{S_{t,c}} \right) + \dots$$
$$+ \frac{M_{(\text{LL}+\text{IM})\text{Fatiga}}}{S_{t,c}}$$

$$f_{t,F} = +0.610 \text{ ksi}$$

**OK**

Limite :

$$f_c = 0.40f'_c \text{ ksi} = 2.80 \text{ ksi}$$

$$P_{\text{eff1}} = 384 \text{ kip}$$

$$P_{\text{eff2}} = 448 \text{ kip}$$

$$M_{\text{viga}} + M_{\text{losa}} = 1012.5 \text{ kip-ft}$$

$$M_{\text{barr}} = 84.4 \text{ kip-ft}$$

$$M_{\text{DW}} = 175.8 \text{ kip-ft}$$

$$M_{(\text{LL}+\text{IM})\text{Fatiga}} = 582.3 \text{ kip-ft}$$

$$A = 975.9 \text{ in}^2$$

$$A_c = 1254 \text{ in}^2$$

$$S_t = 11,275 \text{ in}^3$$

$$S_{t,c} = 20,766 \text{ in}^3 \text{ (viga)}$$