

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**

Temas Generales

- ***Estado límite de servicio***
 - » ***Conceptos de sección transformada***
 - » ***Cálculo de esfuerzos en servicio***
 - » ***Comparación con límites permisibles***
- ***Estado límite de resistencia***
- ***Análisis momento - curvatura***

Suposiciones Generales para Diseño por Flexión

- ***“Secciones planas antes de la deformación permanecen planas después de la deformación”***
- ***Fuerzas externas están en equilibrio con resultantes de esfuerzos internos***
- ***Existe compatibilidad de deformaciones entre el acero de refuerzo o presfuerzo y el concreto***

Suposiciones Generales para el Diseño por Flexión de Elementos de Concreto Presforzado

Diseño bajo Cargas de Servicio:

- ***Concreto es no agrietado***
- ***Esfuerzos en el acero de presfuerzo está en el rango lineal del comportamiento esfuerzo-deformación***
- ***Se debe iterar para determinar el patron de tendones de presfuerzo***
 - ***Deben satisfacerse los límites permisibles de esfuerzo en el concreto y presfuerzo***

Verificar Resistencia de la Sección en Posiciones Críticas:

- ***Concreto***
 - ***Comportamiento inelástico en zonas bajo compresión***
 - ***Resistencia a la tensión se desprecia***
- ***Acero de Presfuerzo***
 - ***Comportamiento dentro del rango inelástico***

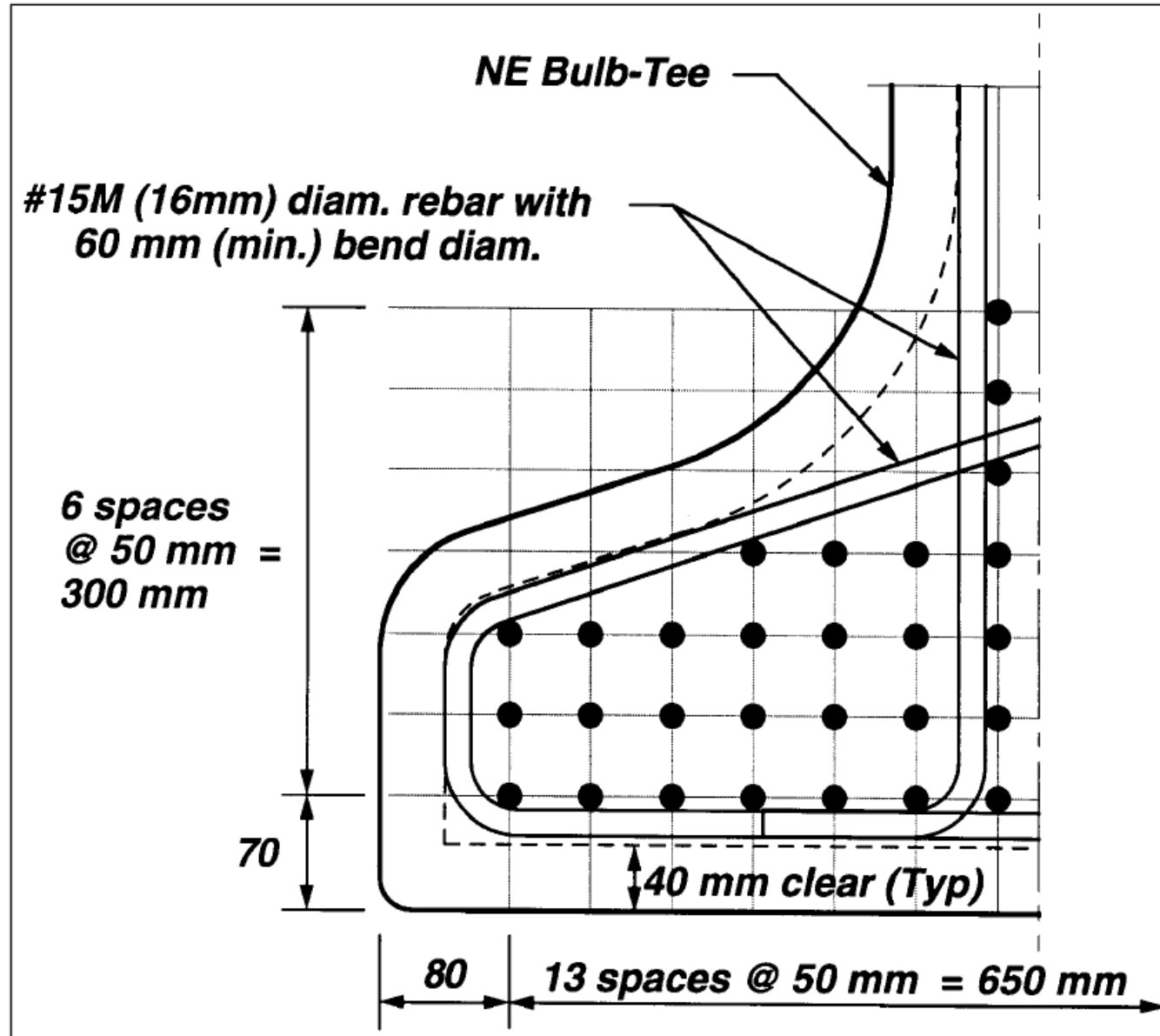
Determinar Patrón de Torones

Añadir torones hasta que los límites de esfuerzo a la mitad del claro se satisfagan

- ***Proceder llenando filas de abajo hacia arriba***
- ***Revisar el espaciamiento mínimo entre torones***
 - ***LRFD Artículo 5.10.3.3.1***
- ***Cubierta mínima de concreto***
 - ***LRFD Artículo 5.12.3***

Revisar esfuerzos en los extremos de la viga

Patrón Típico de Torones



Espaciamiento Mínimo de Torones

LRFD 5.10.3.3.1

Distancia mínima de torones en los extremos de vigas

- » **1.33 x tamaño máximo de agregados**
- » **No menos que el espaciamiento centro a centro dado por:**
 - **1st Edition - $3d_b$**
 - **2nd – 5th Edition - Table 5.10.3.3.1-1**

Strand Size (IN)	Spacing (IN)
0.6 0.5625 Special 0.5625 0.50 Special	2.000
0.5000 0.4375	1.750
0.3750	1.500

- » **Reducción de espacios requiere justificación**
- » **Pueden empaquetarse los torones**

Cubierta Mínima del Concreto

LRFD Tabla 5.12.3-1

SITUATION	COVER (IN)
Direct exposure to salt water	4.0
Cast against earth	3.0
Coastal	3.0
Exposure to deicing salts	2.5
Deck surfaces subject to tire stud or chain wear	2.5
Exterior other than above	2.0
Interior other than above	
• Up to No. 11 bar	1.5
• No. 14 and No. 18 bars	2.0
Bottom of cast-in-place slabs	
• Up to No. 11 bar	1.0
• No. 14 and No. 18 bars	2.0
Precast soffit form panels	0.8
Precast reinforced piles	
• Noncorrosive environments	2.0
• Corrosive environments	3.0
Precast prestressed piles	2.0
Cast-in-place piles	
• Noncorrosive environments	2.0
• Corrosive environments	
- General	3.0
- Protected	3.0
• Shells	2.0
• Auger-cast, tremie concrete, or slurry construction	3.0

Cubierta Mínima del Concreto

LRFD 5.12.3

Factores de modificación por relación agua-cemento

- ***Para $a/c \leq 0.40$ 0.8***
- ***Para $a/c \geq 0.50$ 1.2***

Cubierta mínima a barras principales, incluyendo barras cubiertas con epóxico = 1.0 IN.

Cubierta mínima a estribos puede ser 0.5 in. menor que los valores especificados para barras principales pero no menor que 1.0 in.

Diseño por Flexión – Estado Límite de Servicio

Calcular Propiedades de la Sección

- ***Calcular el ancho efectivo de la losa***
- ***Transformar concreto de losa a concreto de viga***
- ***Transformar acero de torones a concreto (opcional)***

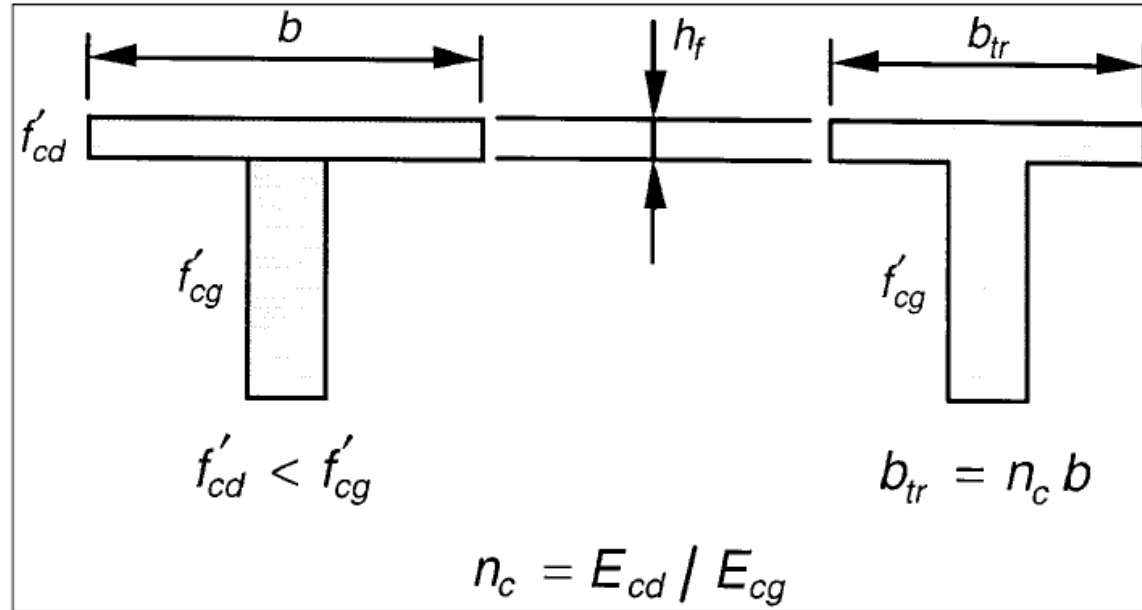
Calcular Esfuerzos

- ***Después de aplicación de presfuerzo***
- ***Bajo cargas de servicio***
 - ***Cargas permanentes sólomente***
 - ***Cargas permanentes y transitorias***

Comparar esfuerzos calculados con permisibles

- ***Concreto***
- ***Acero de presfuerzo***

Transformar Concreto en Losa a Concreto de Viga



Ancho efectivo de losa - (LRFD 4.6.2.6.1) – para vigas interiores: el menor de $\frac{1}{4}$ del claro efectivo, 12 veces el espesor promedio de la losa + mayor del ancho del alma de la viga y $\frac{1}{2}$ el ancho del patín superior; y el espacio promedio entre vigas adyacentes.

Ancho efectivo de losa transformada

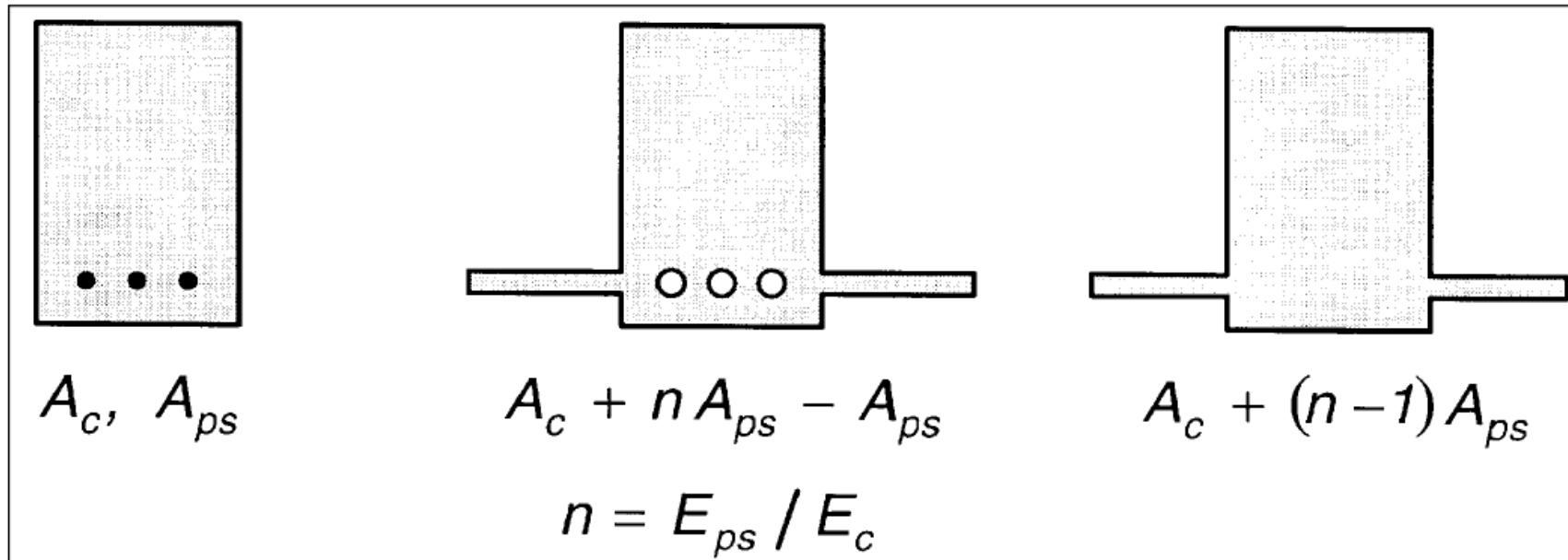
Usar la misma relación modular para efectos a corto y largo plazo

Transformación del Acero de Presfuerzo a Concreto de Viga

LRFD 5.9.1.4

Las propiedades de la sección pueden calcularse con base en la sección gruesa o transformada

El acero de presfuerzo puede transformarse usando el mismo procedimiento que se usa en concreto reforzado



Notas Sobre las Relaciones Modulares

LRFD 5.7.1

Relaciones modulares entre acero y concreto:

- **La relación modular, n , se redondea al número entero más cercano,**
- **La relación modular no debe ser menor que 6.0, y**
- **Una relación modular efectiva de $2n$ se aplica a cargas permanentes y el presfuerzo.**
 - **Sólo aplicable al refuerzo en compresión – Especificación Estándar - Artículo 8.15.3.5**

Cálculo de Esfuerzos al Liberar Presfuerzo

Sección no compuesta (Viga)

Cargas en viga

- **Carga muerta (peso propio)**
- **Presfuerzo inicial**

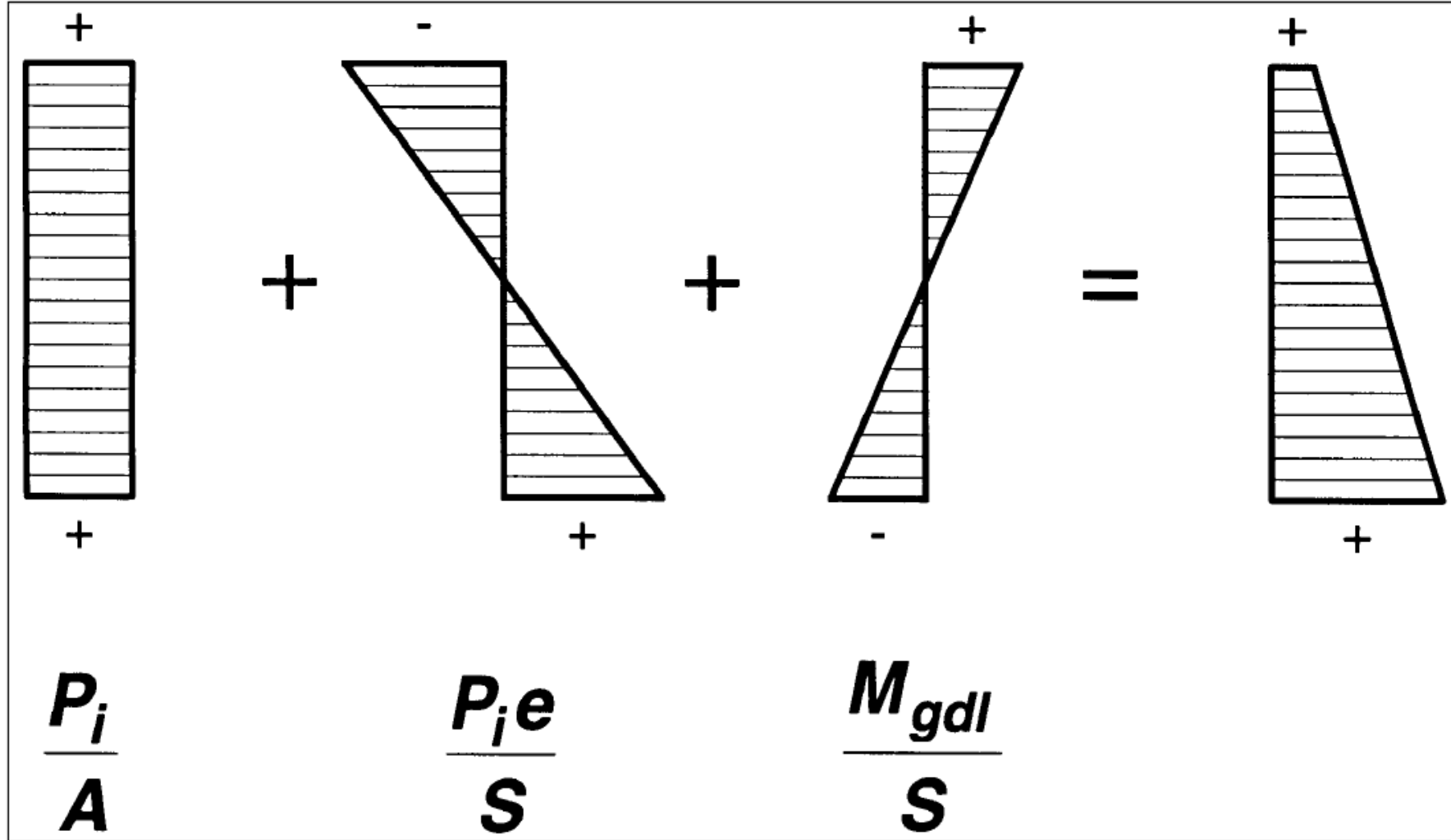
Fibra superior de viga

$$f_{tR} = \frac{P_i}{A} - \frac{P_i e}{S_t} + \frac{M_{gdl}}{S_t}$$

Fibra inferior de viga

$$f_{bR} = \frac{P_i}{A} + \frac{P_i e}{S_b} - \frac{M_{gdl}}{S_b}$$

Cálculo de Esfuerzos al Liberar Presfuerzo



Cálculo de Esfuerzos de Servicio : Incluir Pérdidas de Presfuerzo

Sección Compuesta (Viga + Losa)

Cargas en la sección no compuesta

- ***Viga, cargas muertas en losa***
- ***Otras cargas muertas aplicadas antes de colar losa (ej., diafragmas)***
- ***Presfuerzo final (después de pérdidas)***

Cargas en la sección compuesta

- ***Barrera y superficie de rodamiento***
- ***Otras cargas muertas (tuberías, etc.)***
- ***Carga viva vehicular***

Cálculo de Esfuerzos de Servicio Después de Pérdidas: Cargas Permanentes

Fibra superior de losa

$$f_{tdP} = \frac{M_{cdl}}{S_{tcd}}$$

Fibra superior de viga

$$f_{tgP} = \frac{P_e}{A} - \frac{P_e e}{S_t} + \frac{M_{gdl} + M_{ncdl}}{S_t} + \frac{M_{cdl}}{S_{tcg}}$$

Fibra inferior de viga

$$f_{bgP} = \frac{P_e}{A} + \frac{P_e e}{S_b} - \frac{M_{gdl} + M_{ncdl}}{S_b} - \frac{M_{cdl}}{S_{bcg}}$$

Cálculo de Esfuerzos de Servicio después de Pérdidas: Cargas Permanentes + Transitorias

Fibra superior de losa

$$f_{tdP+L} = \frac{M_{cdl} + M_{LL+I}}{S_{tcd}}$$

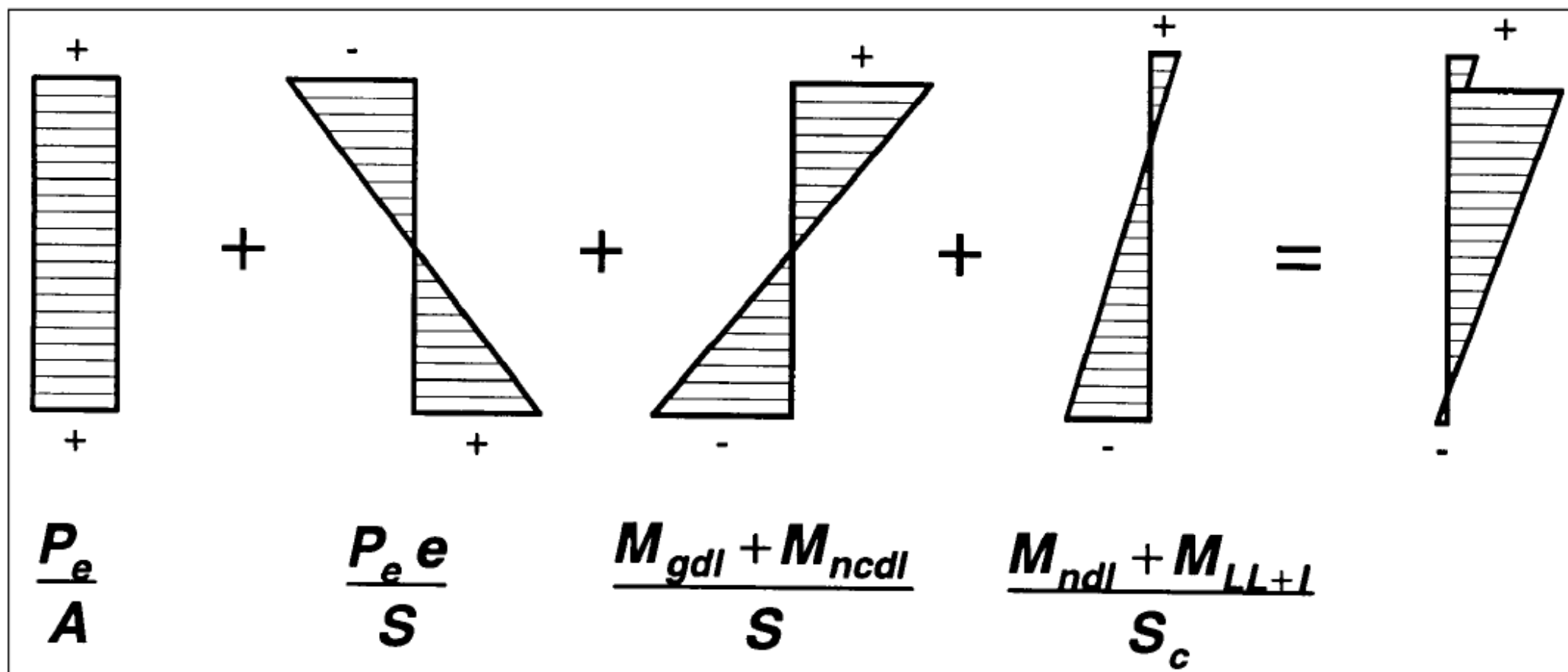
Fibra superior de viga

$$f_{tgP+L} = \frac{P_e}{A} - \frac{P_e e}{S_t} + \frac{M_{gdl} + M_{ncdl}}{S_t} + \frac{M_{cdl} + M_{LL+I}}{S_{tcg}}$$

Fibra inferior de viga

$$f_{bgP+L} = \frac{P_e}{A} + \frac{P_e e}{S_b} - \frac{M_{gdl} + M_{ncdl}}{S_b} - \frac{M_{cdl} + M_{LL+I}}{S_{bcg}}$$

Cálculo de Esfuerzos de Servicio después de Pérdidas: Cargas Permanentes + Transitorias



Límites Permisibles para Tendones de Presfuerzo

LRFD 5.9.3

En vigas pretensadas (ver LRFD sección 5.9.3 para vigas postensadas):

- ***Torones de baja relajación ($f_{py} = 0.90 f_{pu}$):***
 $0.75f_{pu}$ Inmediatamente antes de transferencia
 $0.80f_{py}$ En el estado límite de servicio, después de pérdidas
- ***Torones liberados de esfuerzo ($f_{py} = 0.85 f_{pu}$):***
 $0.70f_{pu}$ Inmediatamente antes de transferencia
 $0.80f_{py}$ En el estado límite de servicio, después de pérdidas

Esfuerzos Permisibles del Concreto

LRFD 5.9.4.1.1 and 5.9.4.1.2

*Para esfuerzos temporales antes de pérdidas
(Componentes totalmente presforzados):*

- **Compresión:**

$0.60 f'_{ci}$ Componentes pretensados (f'_{ci} = resistencia al liberar presfuerzo, ksi)

- **Tensión (puentes no-segmentales):**

***N / A** Zona de tensión precomprimida sin refuerzo adherido*

$0.0948\sqrt{f'_{ci}} \leq 0.200$ ksi – Secciones fuera de la zona de tensión precomprimida y sin contener refuerzo adherido

$0.24\sqrt{f'_{ci}}$ En áreas donde existe refuerzo adherido suficiente para resistir la fuerza de tensión en el concreto por excentricidad de presfuerzo. Se calcula suponiendo sección no agrietada donde el área de acero necesaria se determina usando un esfuerzo igual a $0.5 f_y$ pero no más que 30 ksi

Esfuerzos Permisibles del Concreto

LRFD 5.9.4.2.1

Esfuerzos en el estado límite de servicio después de pérdida de presfuerzo (secciones totalmente presforzadas):

Usar la Combinación Servicio I

- Compresión (puentes no-segmentales):***

	$0.45 f'_c$	<i>Presfuerzo efectivo + cargas permanentes</i>
f'_c en ksi	$0.60 f'_c$	<i>Presfuerzo efectivo + cargas permanentes y transitorias, y durante transporte</i>
	$0.40 f'_c$	<i>Carga viva y 0.5 la suma de presfuerzo efectivo y cargas permanentes</i>

Esfuerzos Permisibles del Concreto

LRFD 5.9.4.2.2

Esfuerzos en el estado límite de servicio después de pérdidas (componentes totalmente presforzados):

Usar Combinación Servicio III

- **Tensión en zona de tensión precomprimida (excepto puentes segmentales):**

$0.190\sqrt{f'_c}$ **Componentes con torones adheridos**

$0.0948\sqrt{f'_c}$ **Componentes sujetos a condiciones severas de corrosión**

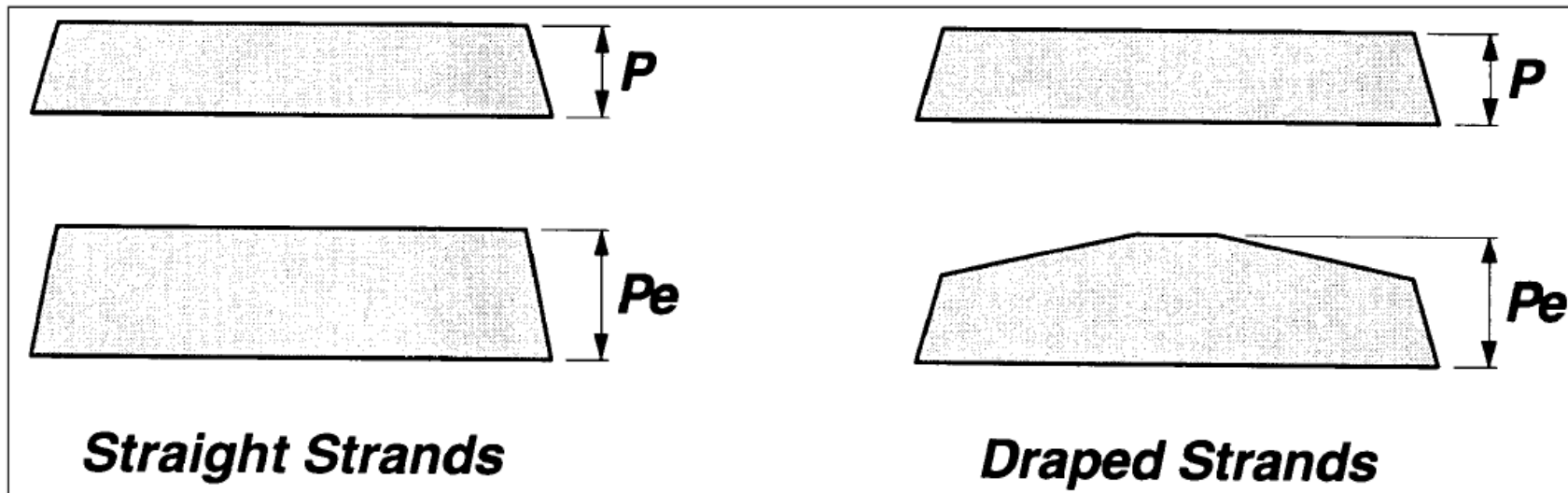
no tensión **Componentes con torones no adheridos**

Control de Esfuerzos en los Extremos de Miembros Pretensados

Métodos pueden usarse individualmente o en combinación con otros:

1. Deflectar los torones

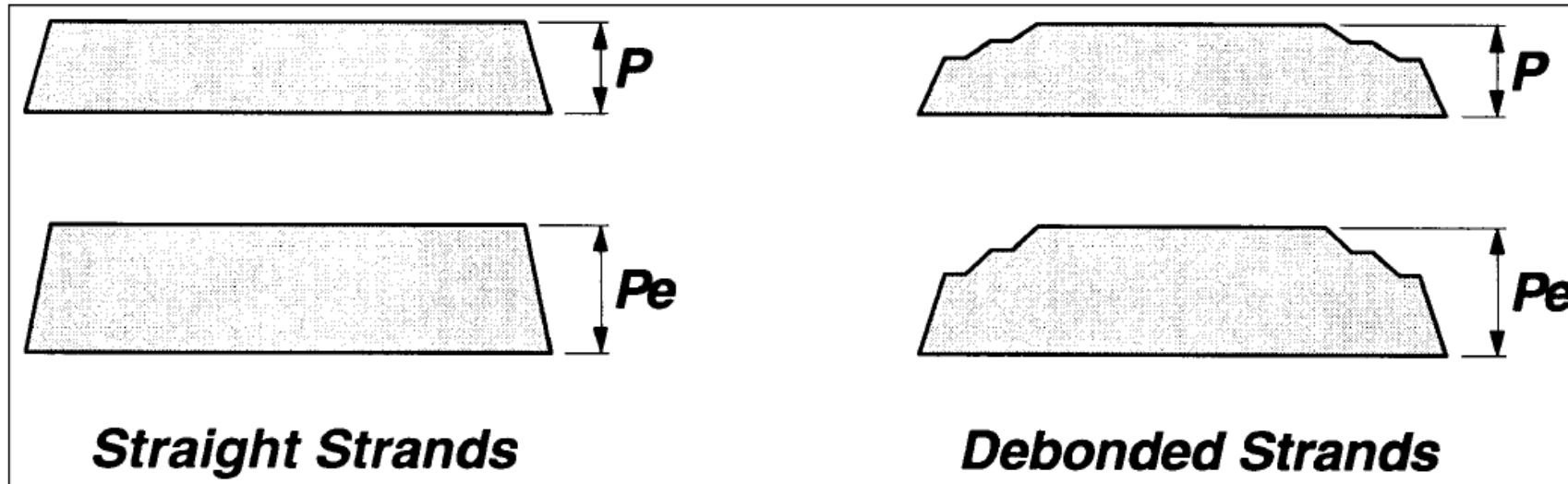
- Reduce excentricidad en los extremos
- Mover el grupo central de torones hasta satisfacer los esfuerzos permisibles



Control de Esfuerzos en los Extremos de Miembros Pretensados

2. Torones no adheridos

- *Reduce la fuerza de presfuerzo en los extremos evitando la adherencia de ciertos torones al concreto*
- *Se debe aumentar el número de torones no adheridos hasta satisfacer los esfuerzos permisibles*



Requisitos Especiales para Torones No Adheridos al Concreto

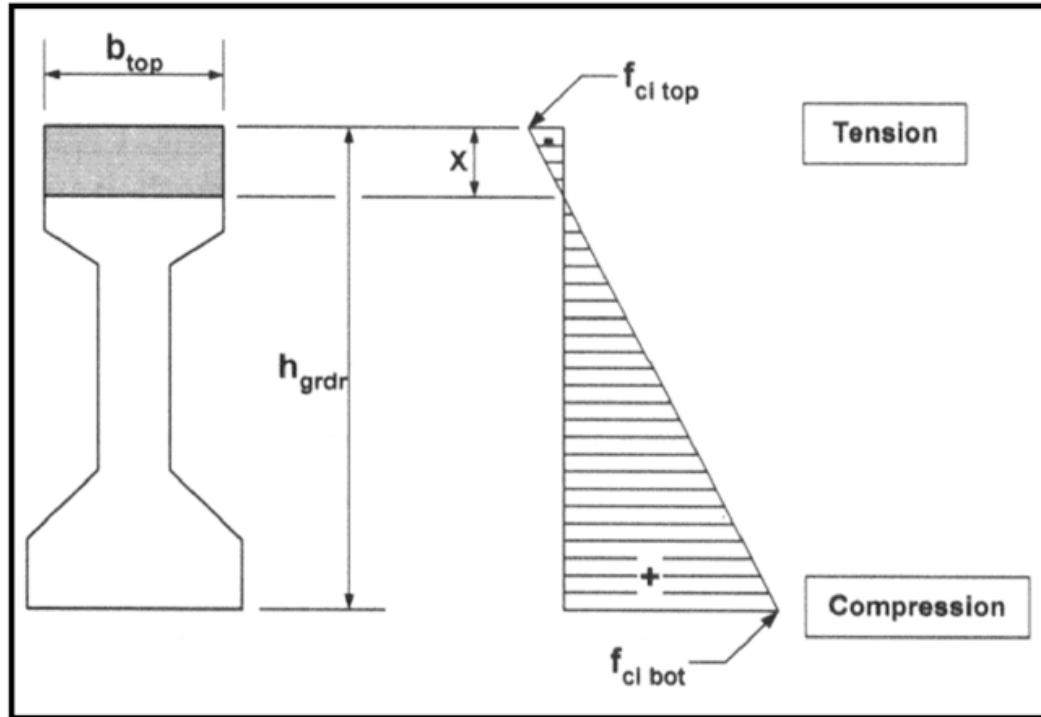
LRFD 5.11.4.3 requiere :

- ***Número de torones no adheridos \leq 25% of número total de torones***
- ***Número de torones no adheridos en una fila \leq 40% del número total de torones en esa fila row***
- ***Torones exteriores en cada fila deben estar totalmente adheridos al concreto***

Control de Esfuerzos en los Extremos de Miembros Pretensados

3. Añadir acero de refuerzo (C5.9.4.1.2)

- Si el esfuerzo de tensión $> 0.0948\sqrt{f'_{ci}}$, pero no es mayor que $0.24\sqrt{f'_{ci}}$, añadir refuerzo que resista 100% de la fuerza de tensión



$$A_s = \frac{T}{f_s} = \frac{(f_{ci\ top}/2)(x)b_{top}}{f_s}$$

donde $f_s = 0.5 f_{sy} = 30\text{ ksi}$

Control de Esfuerzos en los Extremos de Miembros Pretensados

4. ***Añadir Torones en la Parte Superior***
 - ***Reduce el momento del presfuerzo en los extremos***
 - ***Se pueden desadherir los torones superiores en la parte central de la viga***
 - ***Se debe tener una cavidad de acceso para cortar torones superiores***

Control de Esfuerzos en los Extremos de Elementos de Concreto Pretensados

5. Incrementar la Resistencia a la Compresión Inicial del Concreto (Liberación de Presfuerzo), f'_{ci}

- Aumentar f'_{ci} hasta alcanzar el esfuerzo permisible***
- Se debe usar un valor razonable de f'_{ci} que pueda alcanzar el productor local***
- Debe mantenerse un balance razonable entre f'_{ci} and f'_c***

Requisitos para el Rango de Esfuerzos: Estado Límite de Fatiga

LRFD 5.5.3.3

Torones de Presfuerzo

- ***18.0 ksi cuando el radio de curvatura del torón excede 30.0 ft***
- ***10.0 ksi cuando el radio de curvatura del torón no excede 12.0 ft***
- ***Interpolar linealmente entre límites***

Usar el camión de diseño de fatiga (eje trasero a 30.0 ft del intermedio).

Estado Límite de Falla (Resistencia): Generales

LRFD 5.7.2.1

Refuerzo

- ***Acero de refuerzo fluye***
- ***Acero de presfuerzo esta cerca de la fluencia ó excede la fluencia***

Concreto

- ***Deformación máxima usable del concreto es 0.003 para concreto no confinado***
- ***La distribución de esfuerzos en la zona de compresión resulta en predicciones de resistencia que correspondan a resultados de pruebas de laboratorio***

Esfuerzo en el Acero de Presfuerzo al Alcancar la Resistencia Nominal a Flexión

LRFD 5.7.3.1

Componentes con torones adheridos y donde f_{pe} no sea menor que $0.5 f_{pu}$:

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - k \frac{c}{d_p} \right)$$

donde:

f_{pe} = esfuerzo efectivo del presfuerzo después de pérdidas

f_{pu} = resistencia especificada a la tensión del acero de presfuerzo

$$k = 2 \left(1.04 - \frac{f_{py}}{f_{pu}} \right)$$

= 0.28 para torones de baja relajación

f_{py} = esfuerzo de fluencia cedencia del acero de presfuerzo

Esfuerzo en el Acero de Presfuerzo al Alcanzar la Resistencia Nominal a Flexión

LRFD 5.7.3.1

c = distancia de la cara de compresión al eje neutro

d_p = distancia de la cara de compresión al centroide del acero de presfuerzo

Para secciones con zona de compresión rectangular:

$$c = \frac{A_{ps} f_{pu} + A_s f_y - A'_s f'_y}{0.85 f'_c \beta_1 b + k A_{ps} \frac{f_{pu}}{d_p}}$$

donde:

A_{ps} = área del acero de presfuerzo

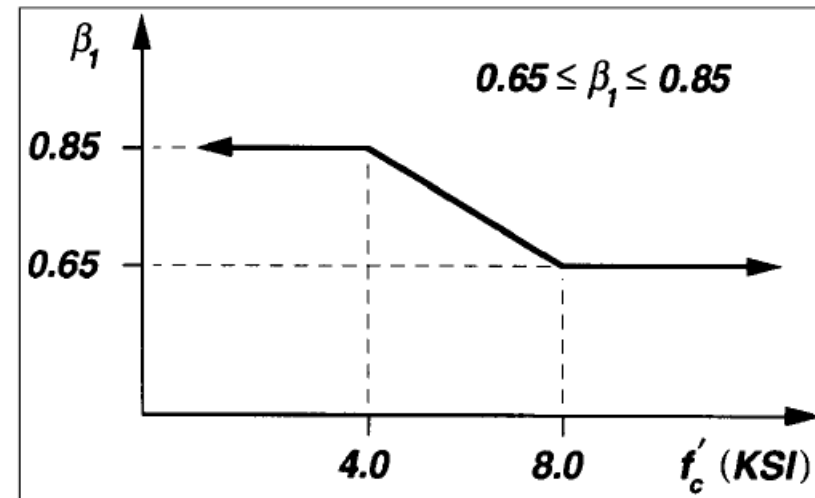
b = ancho de la cara de compresión

Distribución de Esfuerzos en el Concreto al Alcanzar Resistencia Nominal a Flexión

LRFD 5.7.2.2

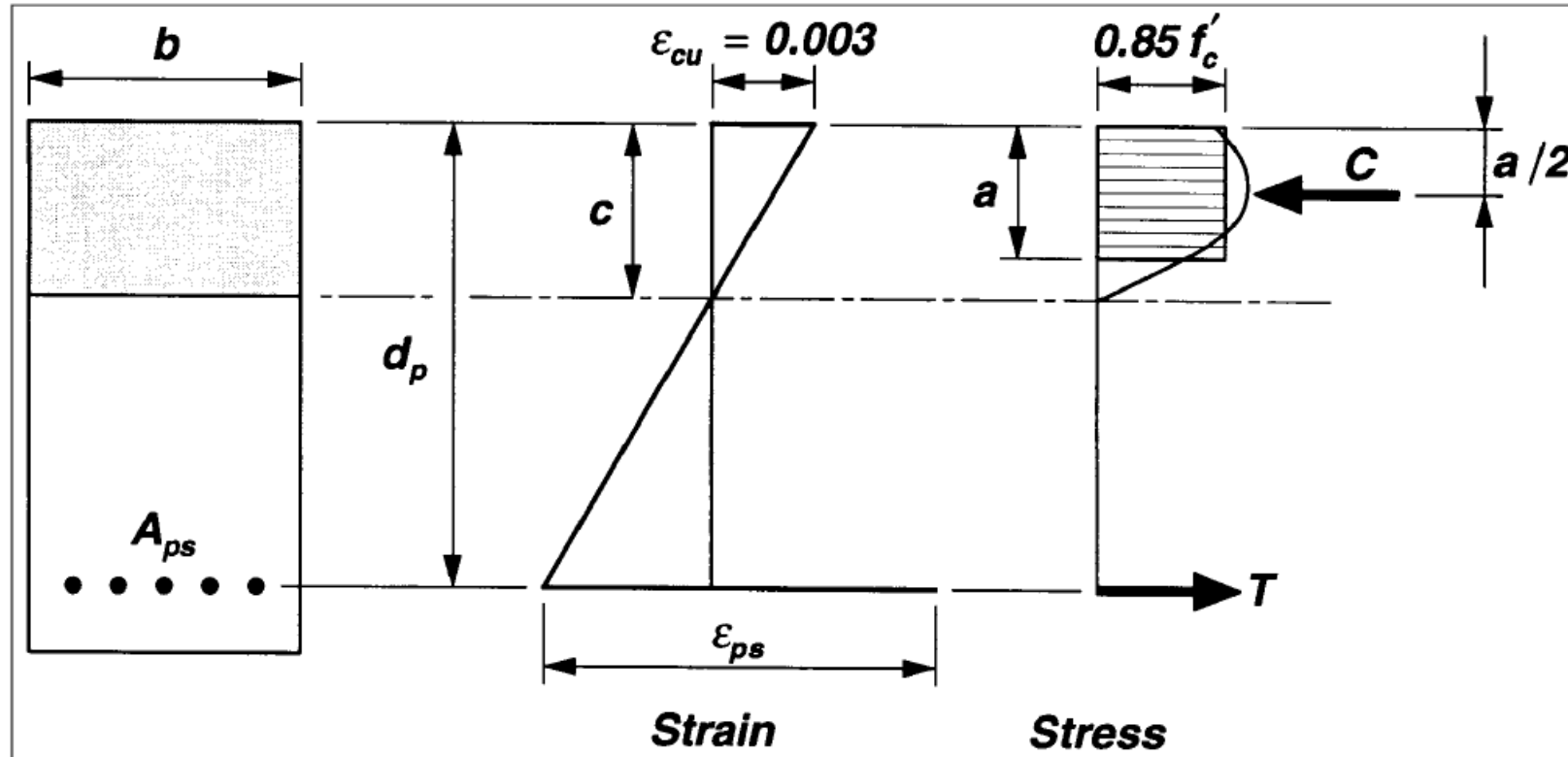
Bloque de Esfuerzos Equivalenes

- Usar en lugar de una distribución de esfuerzos más precisa
- Magnitud de esfuerzos es igual a $0.85 f_c'$
- El bloque de esfuerzos se extiende hasta una distancia $a = \beta_1 c$ de la fibra extrema de compresión
- β_1 varía con la resistencia a la compresión f_c'



Bloque Equivalente de Esfuerzos en Concreto: Resistencia Nominal a Flexión

LRFD 5.7.3.2



$$a = \beta_1 c$$

$$C = 0.85 f'_c b a$$

$$T = A_{ps} f_{ps}$$

Resistencia Nominal a la Flexión

LRFD 5.7.3.2

$$M_r = \phi M_n$$

Secciones Rectangulares:

$$M_n = A_{ps} f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2} \right) - A'_s f'_y \left(d'_s - \frac{a}{2} \right)$$

donde:

M_r = resistencia de diseño

M_n = resistencia nominal

a = $\beta_1 c$

= profundidad el bloque equivalente de esfuerzos

Resistencia Nominal a la Flexión

LRFD 5.7.3.2.2

Secciones con patín:

$M_n =$ Ecuación de sección rectangular +

$$0.85f'_c(b - b_w)\beta_1h_f\left(\frac{a}{2} - \frac{h_f}{2}\right)$$

Nota:

Sección con patín aplica cuando $c > h_f$ en lugar de $a > h_f$ (especificaciones estándar)

Cuantía Máxima de Refuerzo por Flexión

LRFD 5.7.3.3.1

La cuantía máxima de acero presforzado y no presforzado es tal que:

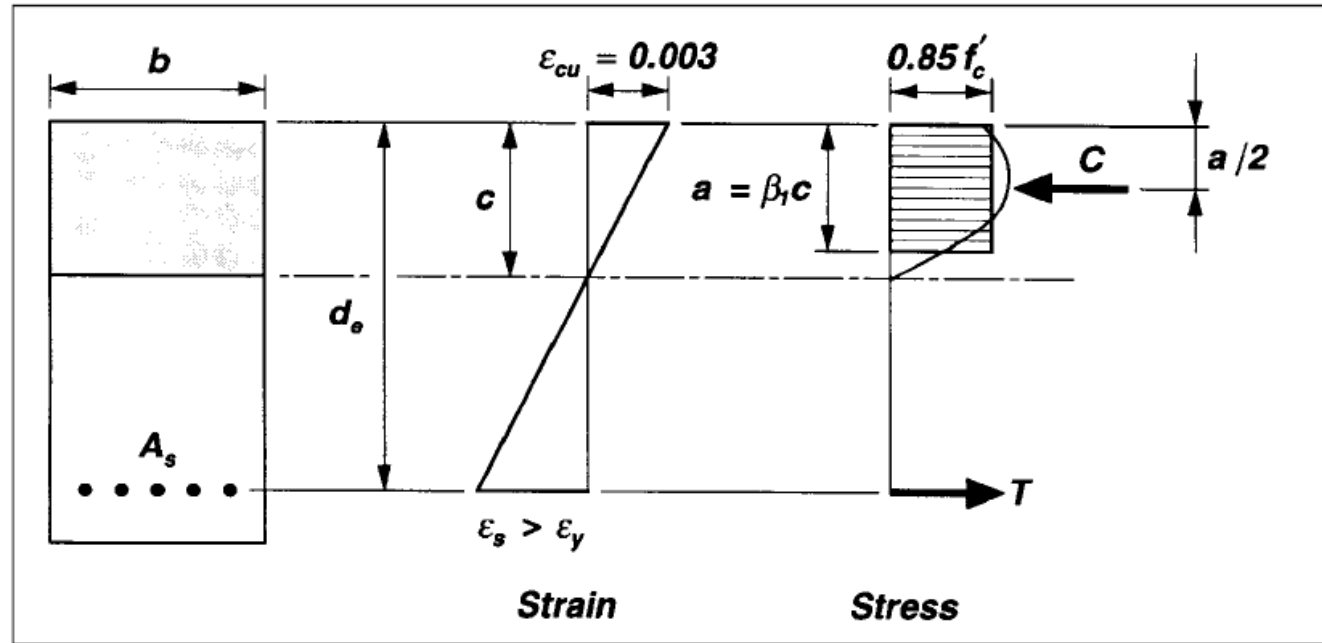
$$\frac{c}{d_e} \leq 0.42$$

donde:

$$d_e = \frac{A_{ps} f_{ps} d_p + A_s f_y d_s}{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y}$$

= Profundidad efectiva medida desde la fibra extrema de compresión al centroide de la fuerza de tensión del acero

Cuantía Máxima de Refuerzo por Flexión



cuando $\frac{c}{d_e} = 0.42$

entonces $\frac{0.003}{0.42 d_e} = \frac{\epsilon_s}{(1 - 0.42) d_e}$

y $\epsilon_s = 0.003 \left(\frac{1 - 0.42}{0.42} \right) = 0.00414 \approx 2\epsilon_y$

(para acero Grado 60)

Cuantía Mínima de Acero por Flexión

LRFD 5.7.3.3.2

La cantidad mínima de acero debe ser tal que la resistencia a la flexión satisfaga, en cualquier sección:

$$M_r = \phi M_n \geq 1.2 M_{cr}$$

$$\geq \frac{4}{3} M_u$$

donde:

- ***M_{cr} se calcula usando el módulo de ruptura.***

Diafragmas Interiores

Propósito

- ***Mejorar la distribución de carga entre vigas***
- ***Estabilizar vigas durante construcción***
- ***Puede usarse arriostramiento temporal***

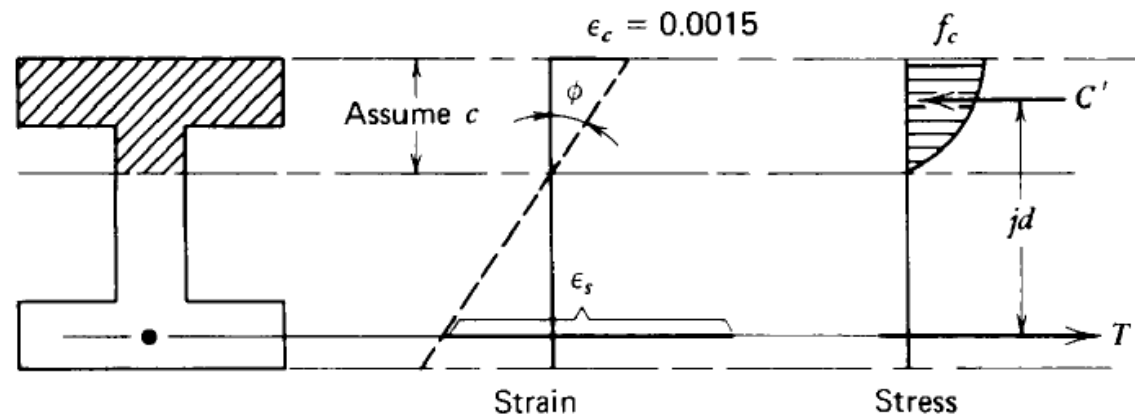
Desventajas

- ***Su instalación es costosa***
- ***Investigaciones han demostrado que no se necesitan para distribución de carga***
- ***Pueden ser dañinas en el caso de impacto lateral***

Análisis de Momento-Curvatura

(Lin y Burns 1981)

- ① Assume strain at top fiber—say $\epsilon_c = 0.0015$ for this point
- ② Assume depth to neutral axis c and compute internal forces.



- ③ Check to see if assumed c yields $C' = T'$
- ④ Revise assumption for c until equilibrium is satisfied ($C' = T'$).
- ⑤ With final value of c find ϕ and moment of couple.
- ⑥ Assume another top fiber strain in ① and repeat ② through ⑤ to obtain ϕ and moment.

Fig. 5-24. Postcracking analysis for moment-curvature.

Ejemplo de la Respuesta Momento-Curvatura de una Sección Presforzada

(Lin and Burns 1981)

