

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**

Temas Generales

- ***Concreto***
 - » ***Relación esfuerzo-deformación***
 - » ***Flujo plástico***
 - » ***Contracción***
- ***Acero de refuerzo y presfuerzo***
- ***Pérdidas de presfuerzo***

Clases de Concreto (C5.4.2.1)

Clase A – Uso general, excepto casos especiales (e.g. concreto marino).

Clase B – zapatas, pedestales, colados masivos.

Clase C – concreto para secciones delgadas (menores que 4 in. de espesor).

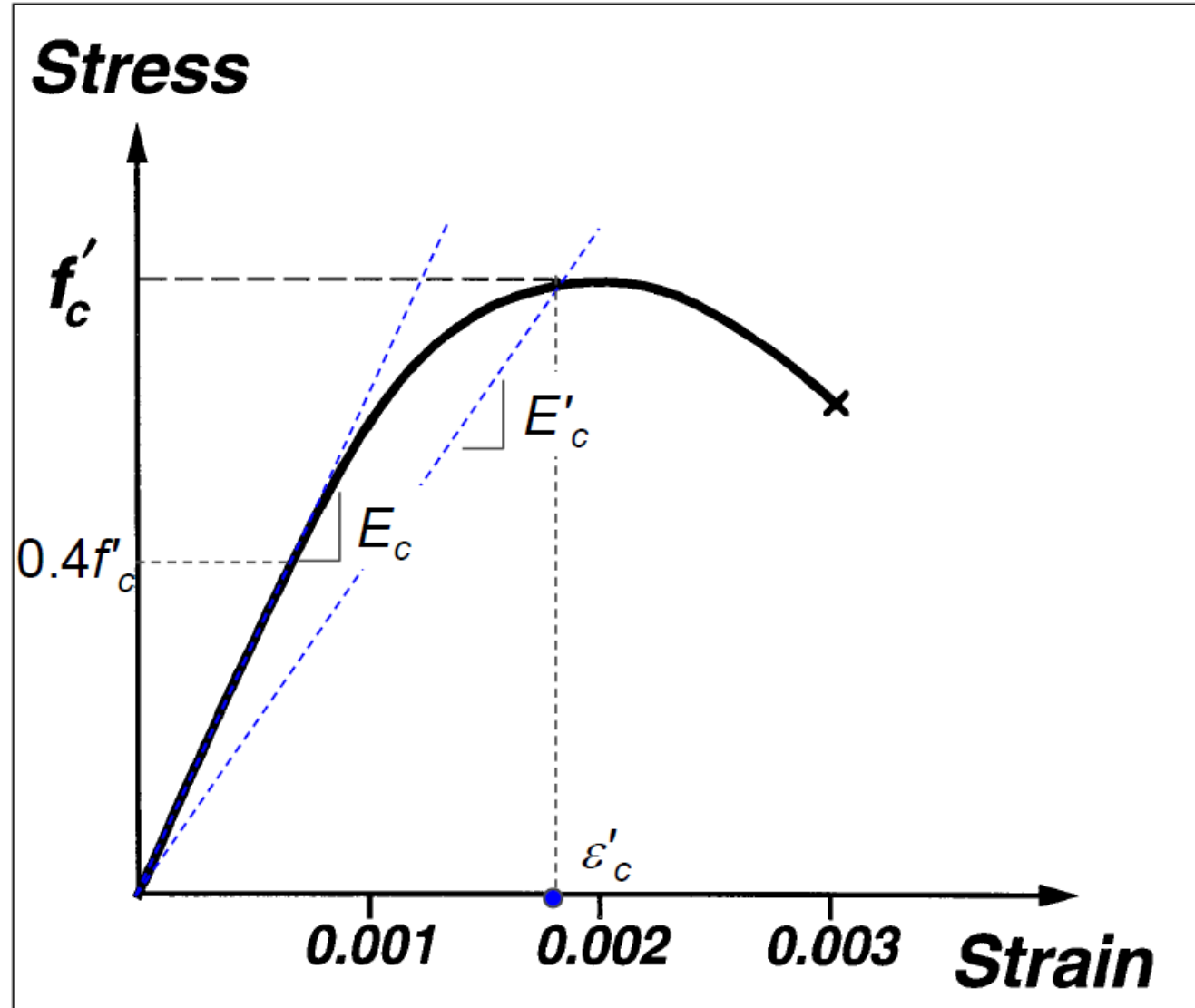
Clase P – Concreto de resistencia superior a 4 ksi (Concreto presforzado)

Clase S – Deposición por debajo del agua.

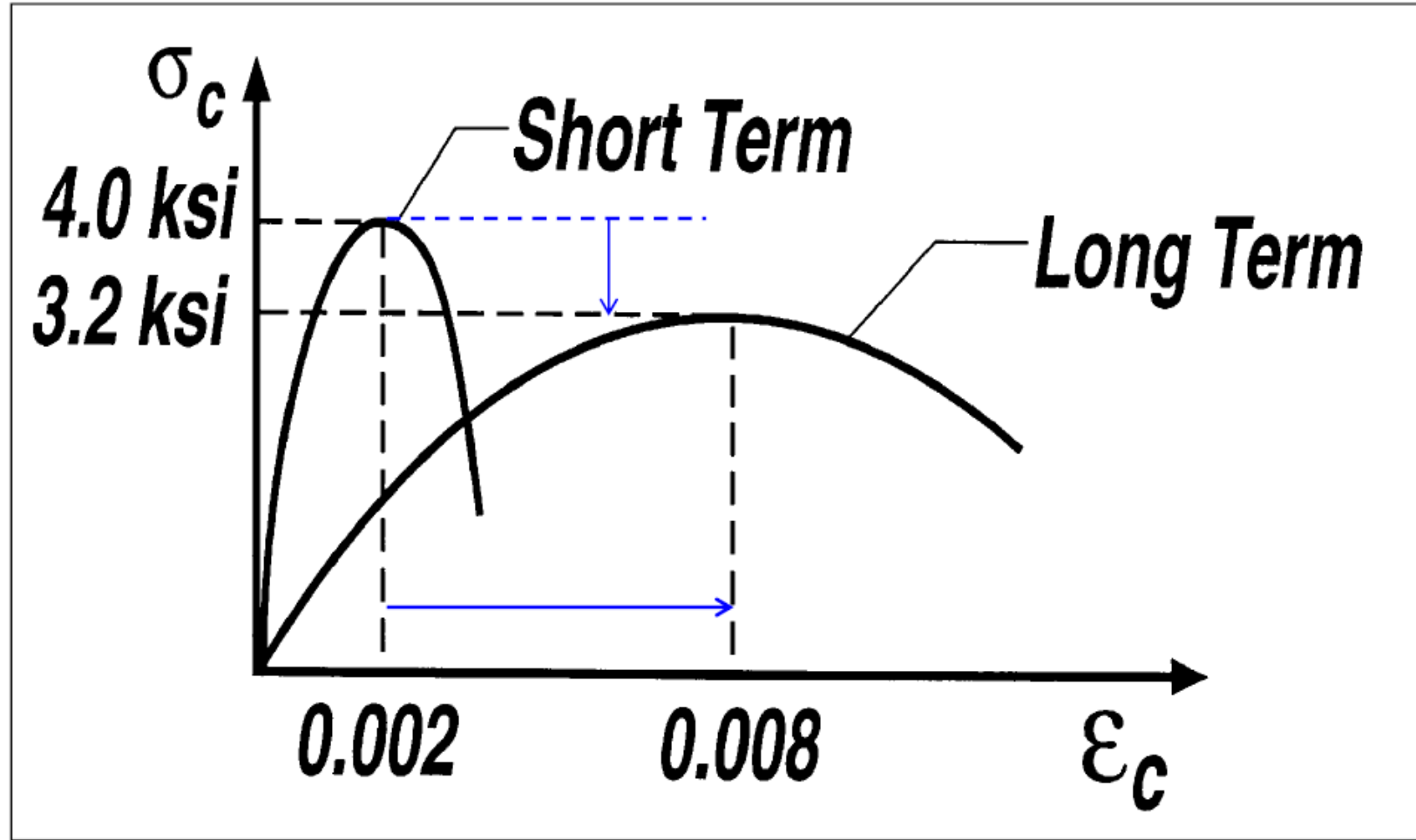
Table C5.4.2.1-1 Concrete Mix Characteristics By Class.

Class of Concrete	Minimum Cement Content	Maximum W/C Ratio	Air Content Range	Coarse Aggregate Per AASHTO M 43 (ASTM D 448)	28-Day Compressive Strength
	pcy	lbs. Per lbs.	%	Square Size of Openings (in.)	ksi
A	611	0.49	—	1.0 to No. 4	4.0
A(AE)	611	0.45	6.0 ± 1.5	1.0 to No. 4	4.0
B	517	0.58	—	2.0 to No. 3 and No. 3 to No. 4	2.4
B(AE)	517	0.55	5.0 ± 1.5	2.0 to No. 3 and No. 3 to No. 4	2.4
C	658	0.49	—	0.5 to No. 4	4.0
C(AE)	658	0.45	7.0 ± 1.5	0.5 to No. 4	4.0
P P(HPC)	564	0.49	As specified elsewhere	1.0 to No. 4 or 0.75 to No. 4	As specified elsewhere
S	658	0.58	—	1.0 to No. 4	—
Lightweight	564	As specified in the contract documents			

Curva Típica Esfuerzo-Deformación el Concreto en Compresión

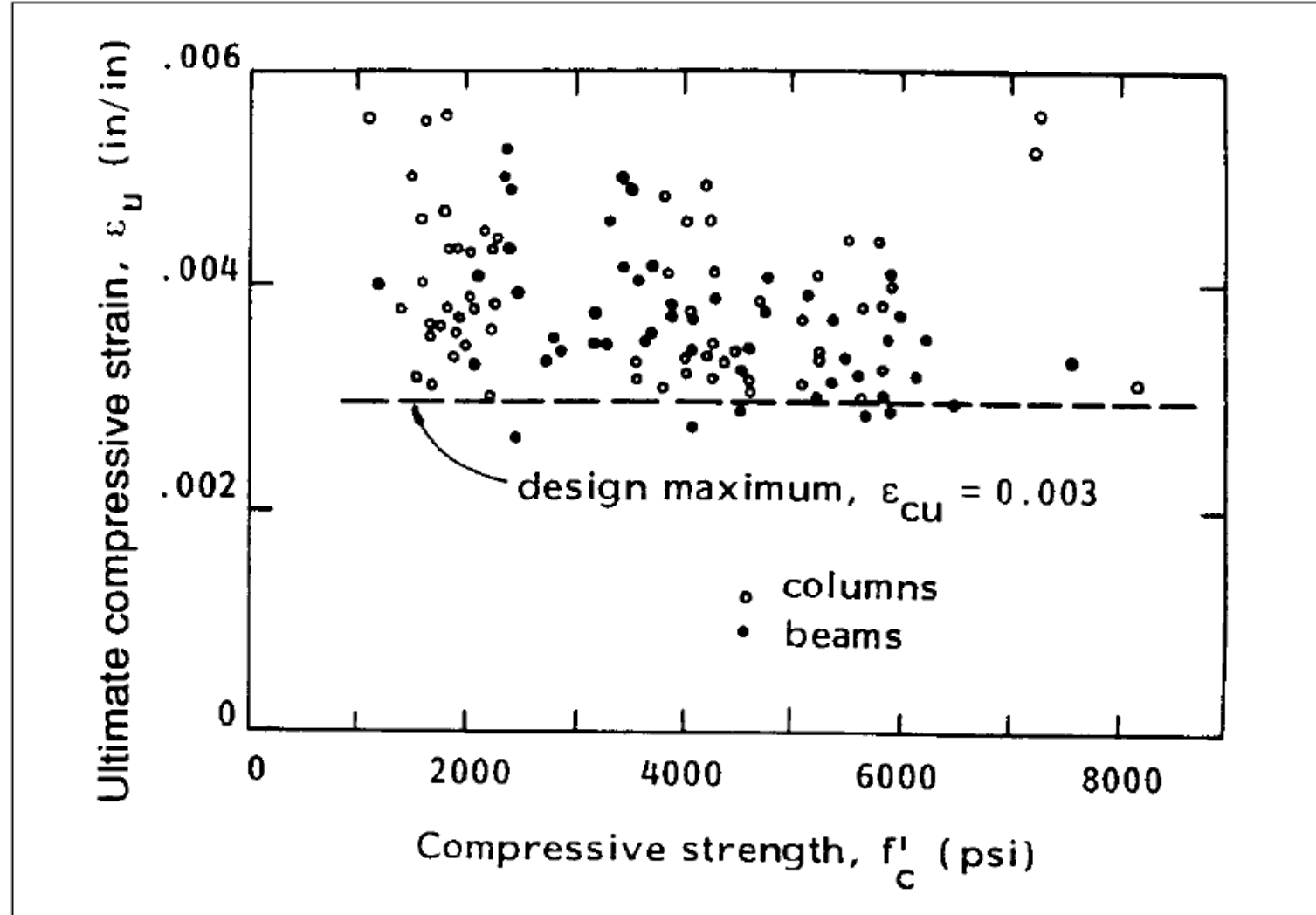


Efecto de la Velocidad de Carga

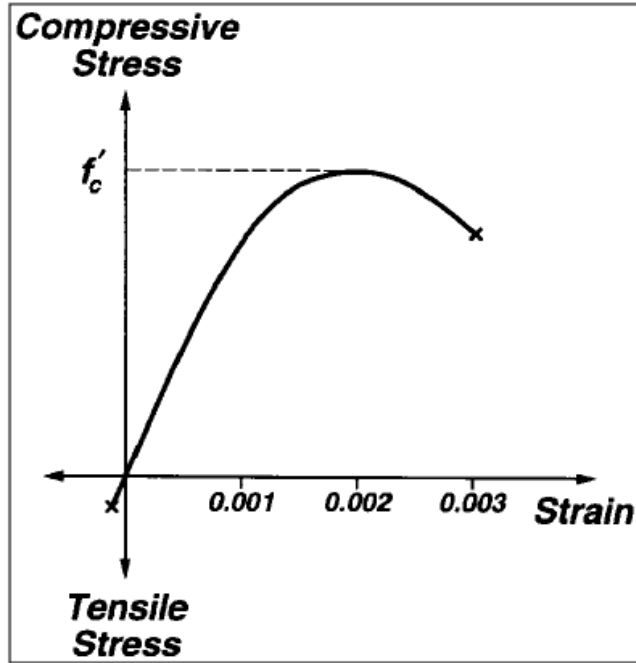


Deformación Máxima a Compresión del Concreto, ϵ_{cu} , con Base en Pruebas

(“Notes on ACI 318-99”, PCA, 1999)



Comportamiento y Resistencia del Concreto a la Tensión



Relación esfuerzo-deformación lineal

- E_c – mismo que para compresión

Resistencia a la tensión – modulo de ruptura (para estimar el momento de agrietamiento)

Para deflexiones y contraflecha (LRFD 5.7.3.6.2)

$$f'_r = 0.24\sqrt{f'_c} \text{ (ksi)} = 7.5\sqrt{f'_c} \text{ (psi)}$$

La resistencia a la tensión es altamente variable

El rango de valores recomendado tiene por objeto dar resultados conservadores

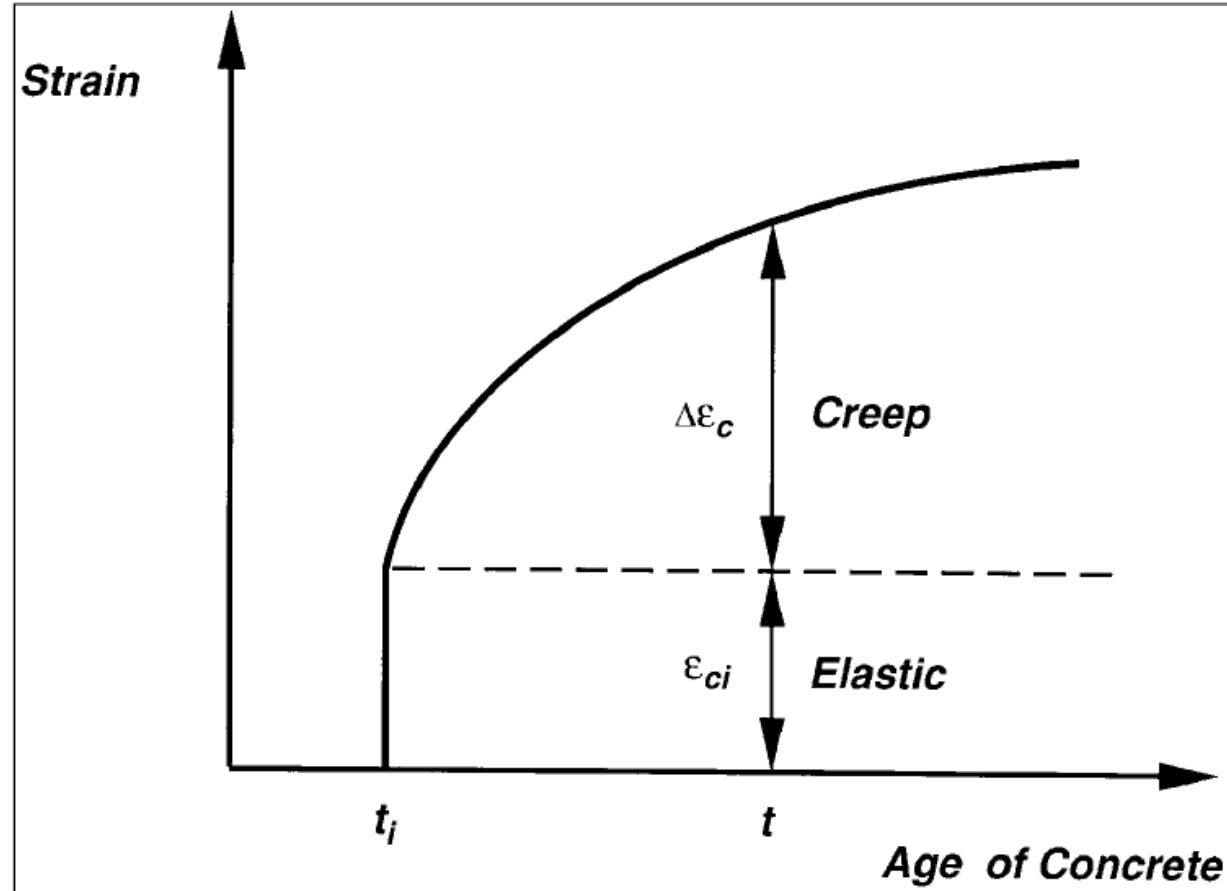
Para cálculo de refuerzo mínimo (LRFD 5.7.3.3.2)

$$f'_r = 0.37\sqrt{f'_c} \text{ (ksi)} = 11.7\sqrt{f'_c} \text{ (psi)}$$

Para cálculo de V_{ci} (LRFD 5.8.3.4.3)

$$f'_r = 0.20\sqrt{f'_c} \text{ (ksi)} = 6.3\sqrt{f'_c} \text{ (psi)}$$

Variación en la Deformación del Concreto por Flujo Plástico



Coeficiente de Flujo Plástico

$$\psi(t, t_i) = \frac{\Delta \epsilon_c}{\epsilon_{ci}}$$

Estimación del Coeficiente de Flujo Plástico

ACI 209R-92

$$\psi(t) = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} \psi_u$$

donde

***ψ_u = coeficiente de flujo plástico a $t = \infty$
= 2.35 γ_c***

***γ_c = producto de factores de corrección por edad,
humedad relative, espesor del element,
composición del concreto, etc.***

t = tiempo en días después de carga

Estimación del Coeficiente de Flujo Plástico

LRFD 5.4.2.3.2

$$\psi(t, t_i) = 1.9 k_s k_{hc} k_f k_{td} t_i^{-0.118}$$

donde:

$$k_s = \text{efecto de relación de volumen a superficie} = 1.45 - 0.13 \left(\frac{V}{S} \right) \geq 1.0$$

$$k_{hc} = \text{factor de humedad} = 1.56 - 0.008H$$

$$k_f = \text{efecto de Resistencia a compresión} = \frac{5}{1 + f'_{ci}} \text{ con } f'_{ci} \text{ en ksi}$$

$$k_{td} = \text{factor de tiempo} = \frac{t}{61 - 4f'_{ci} + t} \text{ con } f'_{ci} \text{ en ksi}$$

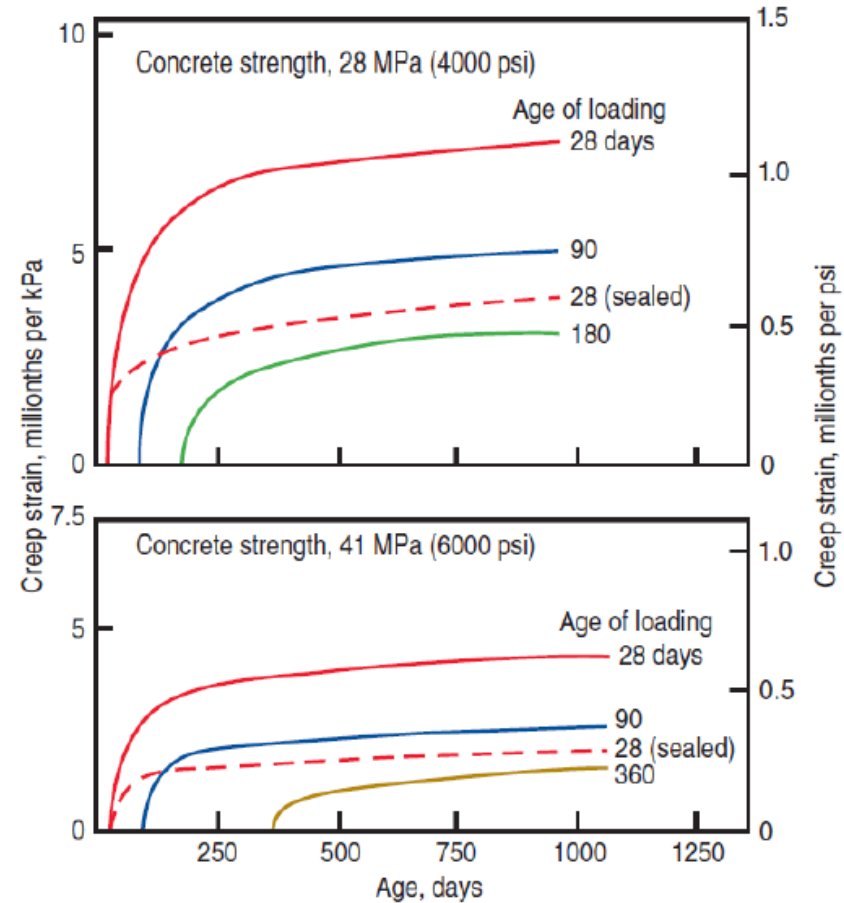
H = humedad relativa en por ciento

t = madurez del concreto en días

t_i = edad del concreto al inicio de aplicación de carga en días

Efecto de la Edad al Cargar en Flujo Plástico de Dos Concretos con Resistencia Diferente

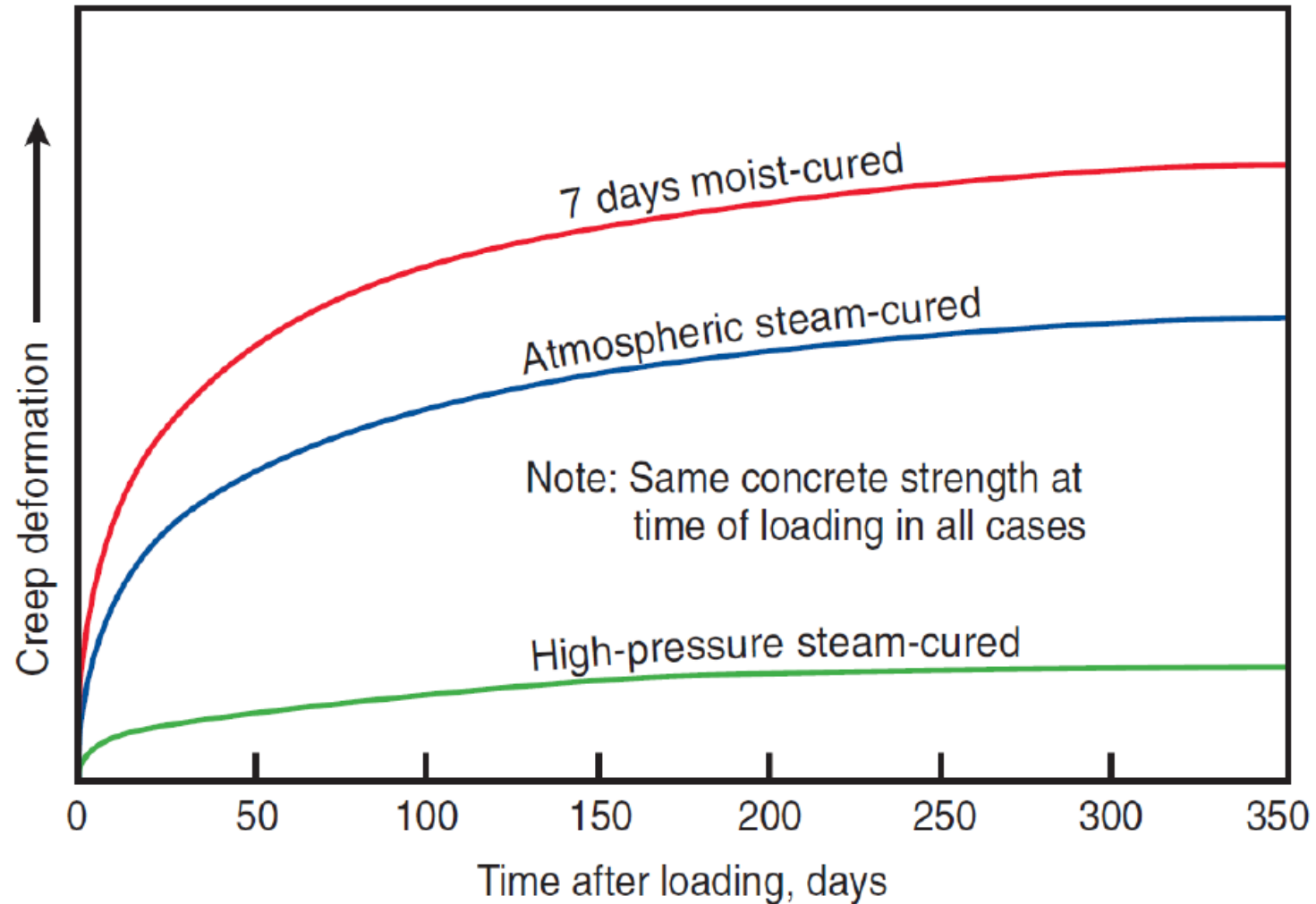
(“Design and Control of Concrete Mixtures”, PCA, 2002)



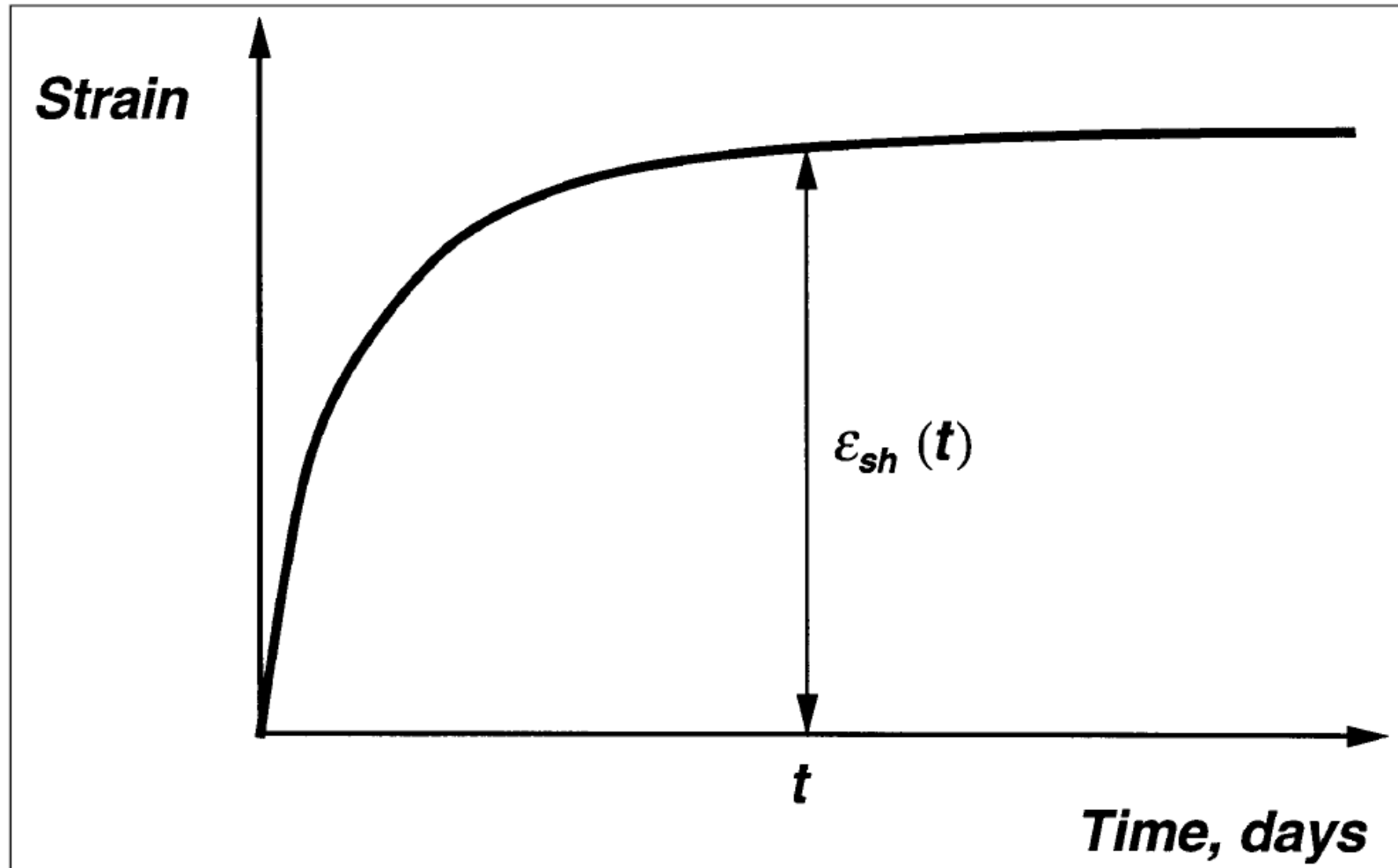
Secado de especímenes fue permitido durante la carga, excepto aquellos marcados como sellados.

Efecto del Método de Curado en Flujo Plástico de Concreto de Peso Normal

(“Design and Control of Concrete Mixtures”, PCA, 2002)



Contracción del Concreto



donde

$\epsilon_{sh}(t)$ = deformación por contracción en tiempo t

t = tiempo de secado en días

Estimación de Contracción

ACI 209R - 92

Para concreto curado en húmedo (7 días):

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{t}{35 + t} (\varepsilon_{sh})_u$$

Para concreto curado en vapor (1 a 3 días):

$$\varepsilon_{sh}(t) = \frac{t}{55 + t} (\varepsilon_{sh})_u$$

donde

$$\begin{aligned} (\varepsilon_{sh})_u &= \text{contracción máxima en } t = \alpha \\ &= 780 \gamma_{sh} \times 10^{-6} \text{ in./in.} \end{aligned}$$

γ_{sh} = *producto de factores de corrección aplicables*

Estimación de Contracción

LRFD 5.4.2.3.3

$$\varepsilon_{sh}(t) = k_s k_{hs} k_f k_{td} 0.48 \times 10^{-3}$$

donde

k_s = factor de tamaño – volumen/superficie (como en el caso de flujo plástico)

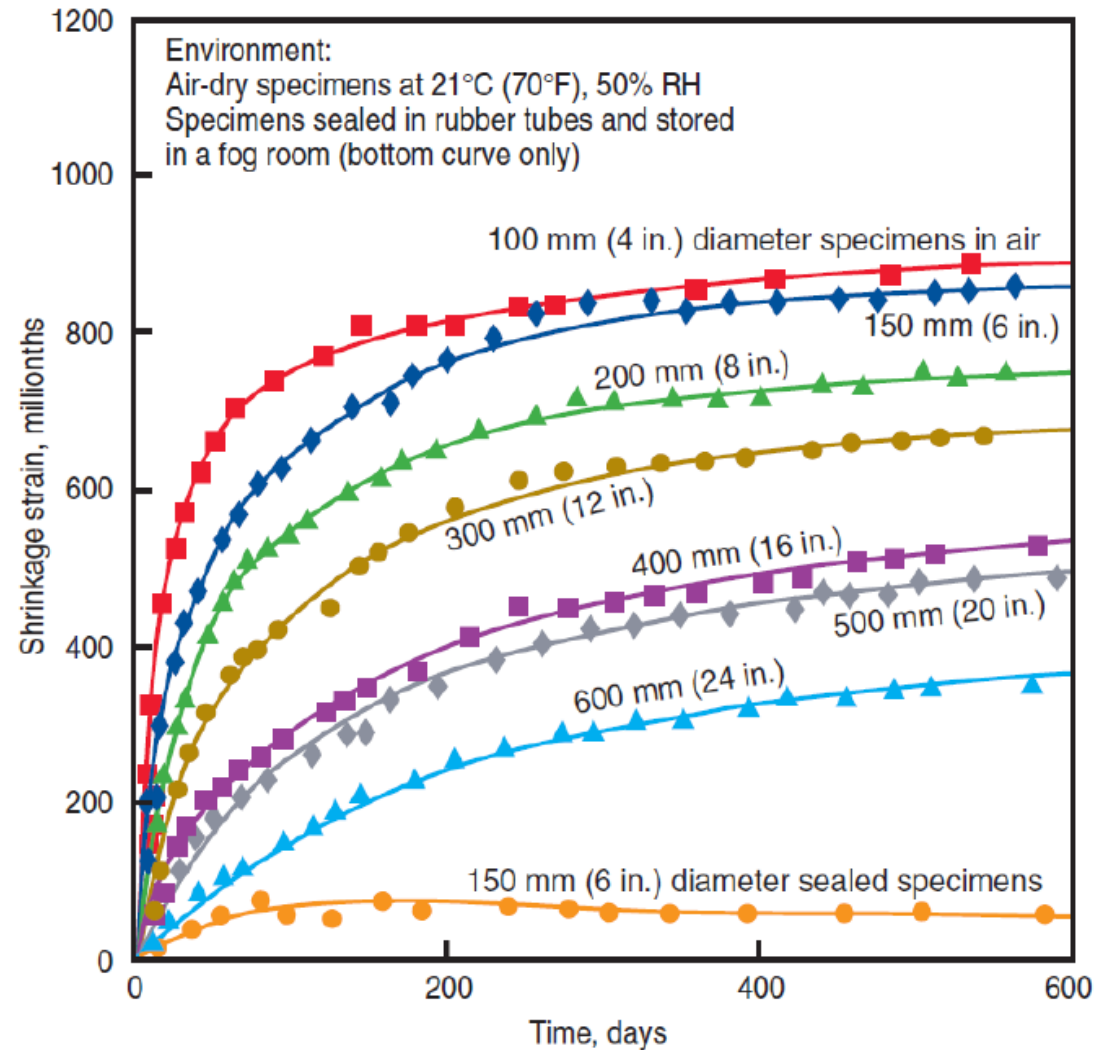
k_{hs} = factor de humedad para contracción = $(2.00 - 0.014H)$

k_f = efecto de la resistencia del concreto (como en el caso de flujo plástico)

k_{td} = factor de tiempo (como en el caso de flujo plástico)

Contracción por Secado de Cilindros de Concreto de Varios Tamaños

(“Design and Control of Concrete Mixtures”, PCA, 2002)



Coeficiente de Expansión y Contracción Térmica del Concreto

- **Concreto Peso Normal:**
 - **Rango: $3.5 \text{ to } 7.0 \times 10^{-6} / ^\circ F$**

- **Especificación Estándar AASHTO:**
 - **Concreto Peso Normal**
 $6.0 \times 10^{-6} / ^\circ F$
 - **Concreto Ligero**
 $5.0 \times 10^{-6} / ^\circ F$

Tipos de Refuerzo

1. Acero de Refuerzo con Deformaciones



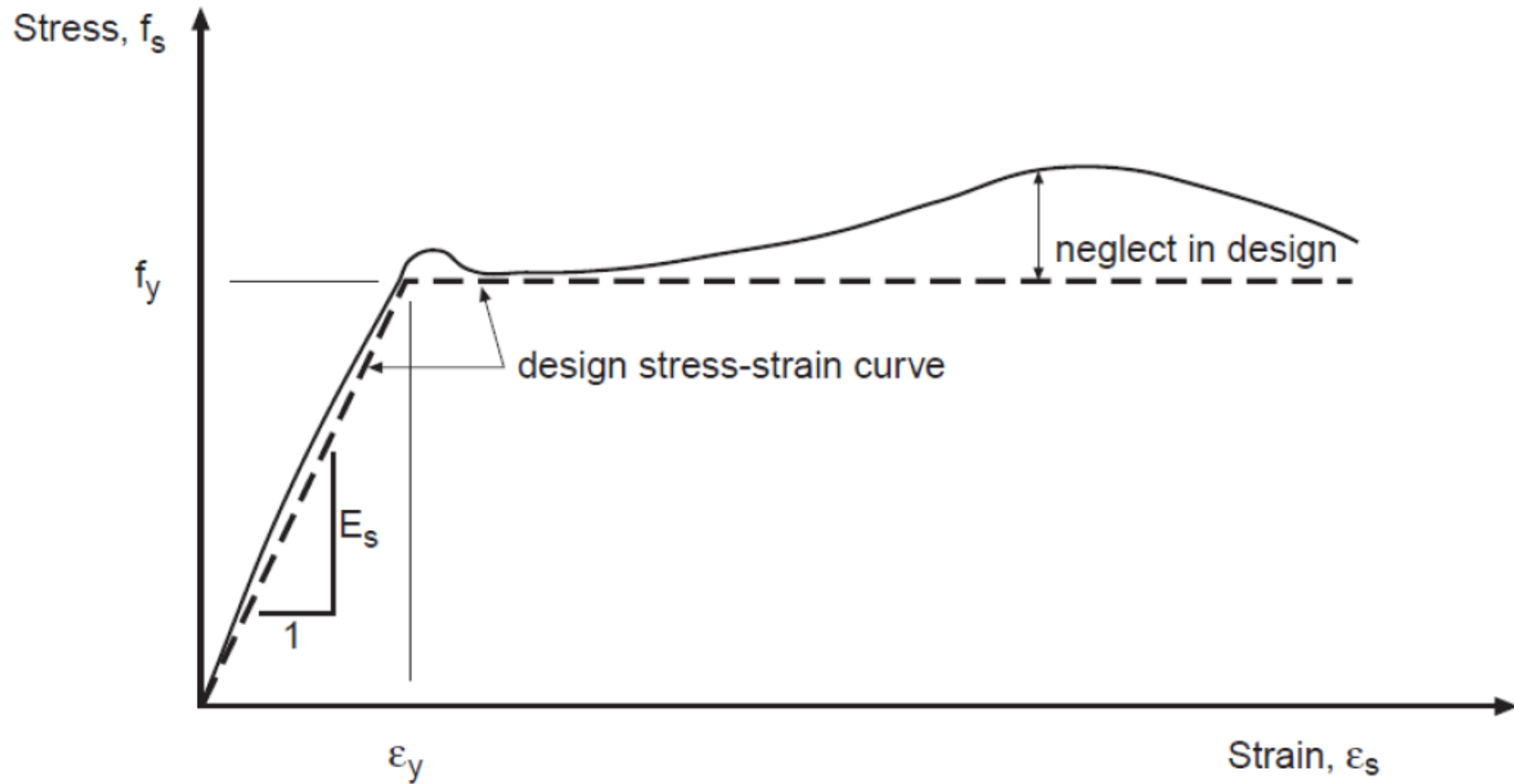
2. Acero de Presfuerzo

- *Torón de 7 alambres*
- *Barras*
- *Alambre*



3. Malla soldada

Relación Esfuerzo-Deformación de Acero de Refuerzo

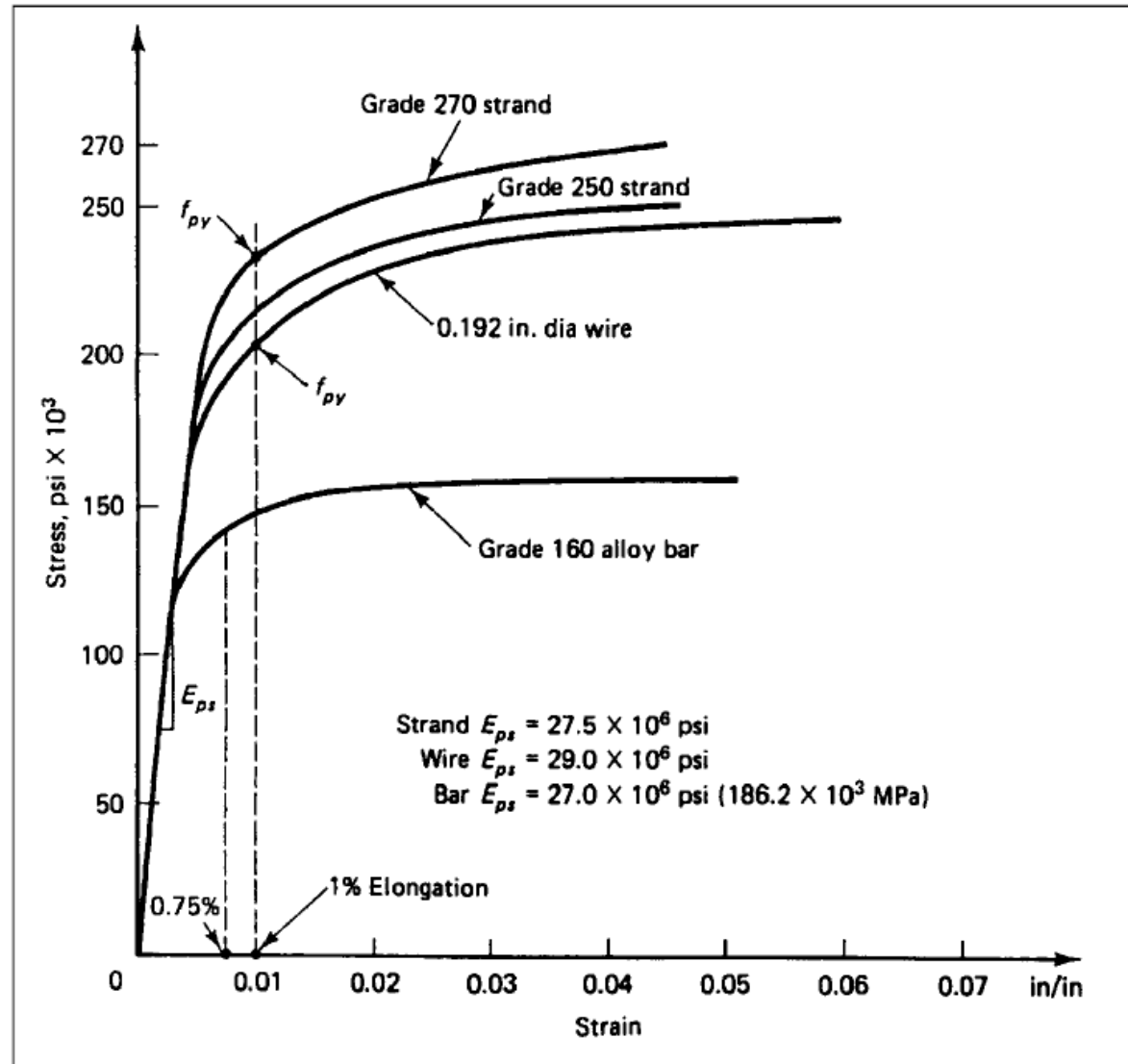


Propiedades del Acero de Refuerzo: Especificaciones AASHTO y ASTM

AASHTO Spec	M31			M42 **		-- ***		****
ASTM Spec	A615			A616 **		A617 ***		A706
Type	<i>Deformed and Plain Billet-Steel Bars</i>			<i>Rail-Steel Deformed and Plain Bars</i>		<i>Axle-Steel Deformed and Plain Bars</i>		<i>Low-Alloy Deformed Bars</i>
<i>Grade</i>	40 ^a	60	75 ^b	40	60	40	60	60
<i>Min yield (ksi)</i>	40	60	75	40	60	40	60	60 *
<i>Min strength (ksi)</i>	70	90	100	80	90	70	90	80
<i>Min elongation (%)</i>	7-11	7-9	6	5-7	4.5-6	7-12	7-8	10-14
<p>* - Maximum yield strength is 78 ksi.</p> <p>** - Including Supplementary Requirement S1</p> <p>*** - Not included in Division II of AASHTO Standard Specification</p> <p>**** - Included in Division II of AASHTO Standard Specification using the ASTM designation</p> <p>a - Only available in bar sizes #3-#6</p> <p>b - Available in bar sizes #6 through #18</p>								

Curvas Esfuerzo-Deformación del Acero de Presfuerzo

(“Prestressed Concrete”, Nawy, 1989)



Módulo de Elasticidad del Acero de Presfuerzo

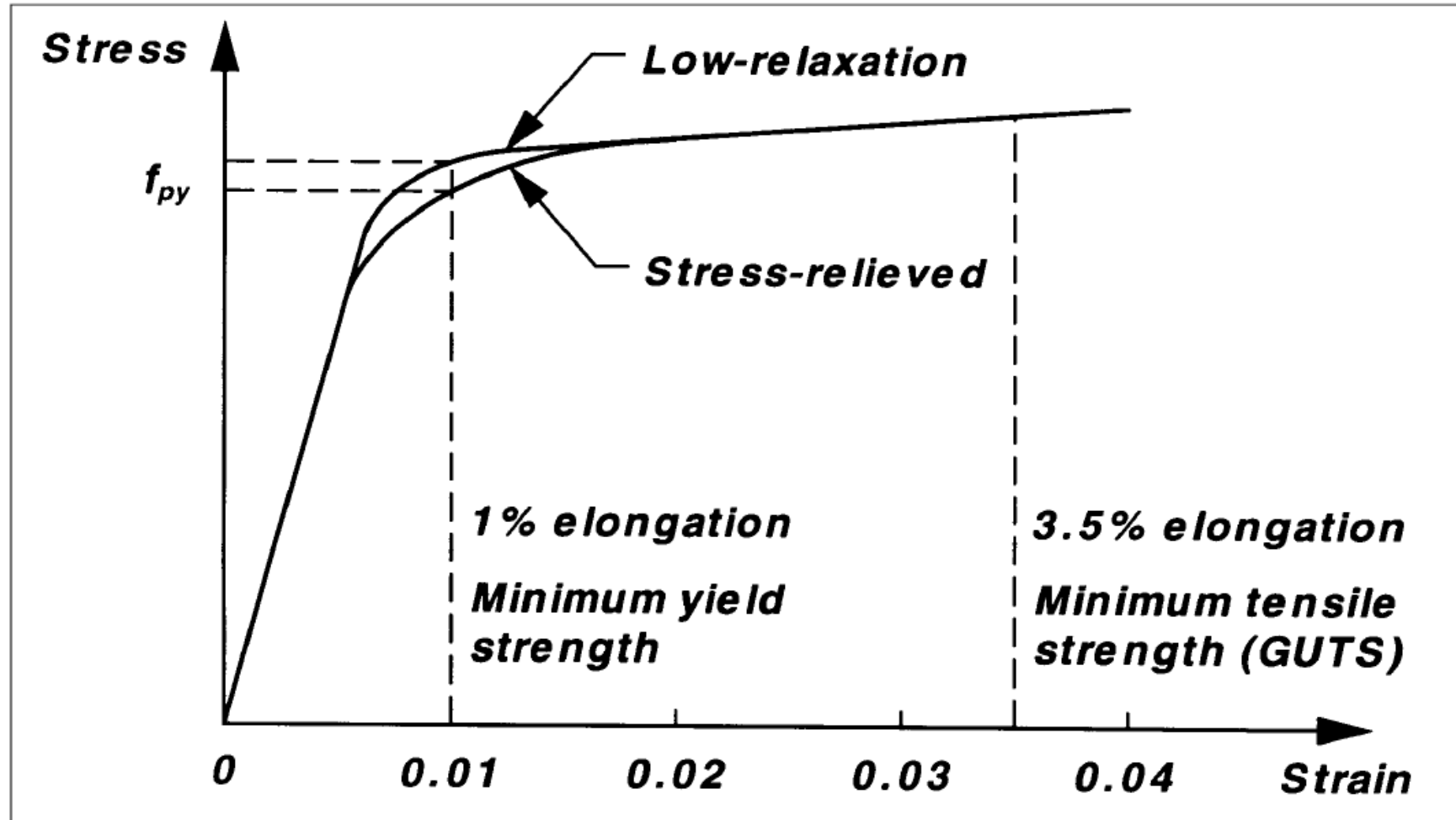
LRFD 5.4.4.2

Especificaciones LRFD para Presfuerzo

Para torones: $E_p = 28,500$ ksi

Para barras: $E_p = 30,000$ ksi

Curvas Esfuerzo-Deformación de Torones de Presfuerzo



Propiedades del Acero de Presfuerzo: Especificaciones AASHTO y ASTM

<i>AASHTO Spec</i>	<i>M203</i>	<i>M203</i>	<i>M204</i>	<i>M275</i>
<i>ASTM Spec</i>	<i>A416</i>	<i>A416</i>	<i>A421</i>	<i>A722</i>
<i>Type</i>	<i>Stress-Relieved 7-Wire Strand</i>	<i>Low-Relaxation 7-Wire Strand</i>	<i>Wire</i>	<i>Deformed Bars</i>
<i>Min strength (ksi)</i>	270	270	235-250	150
<i>Min yield (ksi) *</i>	230	243	212.5-200	120
<i>Yield/Strength ratio (%)</i>	85	90	85	80
<i>Min elongation (%)</i>	3.5	3.5	4	4
<i>* - Minimum yield strength is taken as the stress at an elongation of 1.0% for strand and wire and as the 0.2% offset for bars</i>				

Relajación del Acero de Presfuerzo

(“Prestressed Concrete Structures”, Collins and Mitchell, 1997)

Torón de baja relajación:

$$\frac{f_p}{f_{pi}} = 1 - \frac{\log t}{45} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right)$$

Torón liberado de esfuerzos:

$$\frac{f_p}{f_{pi}} = 1 - \frac{\log t}{10} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right)$$

where

f_p = **esfuerzo en torón al tiempo t**

f_{pi} = **esfuerzo inicial en torón**

f_{py} = **esfuerzo de fluencia del torón**

t = **tiempo después de tensado (horas)**

Relajación de Torones de Presfuerzo
(*“Prestressed Concrete Structures”, Collins and Mitchell, 1997*)

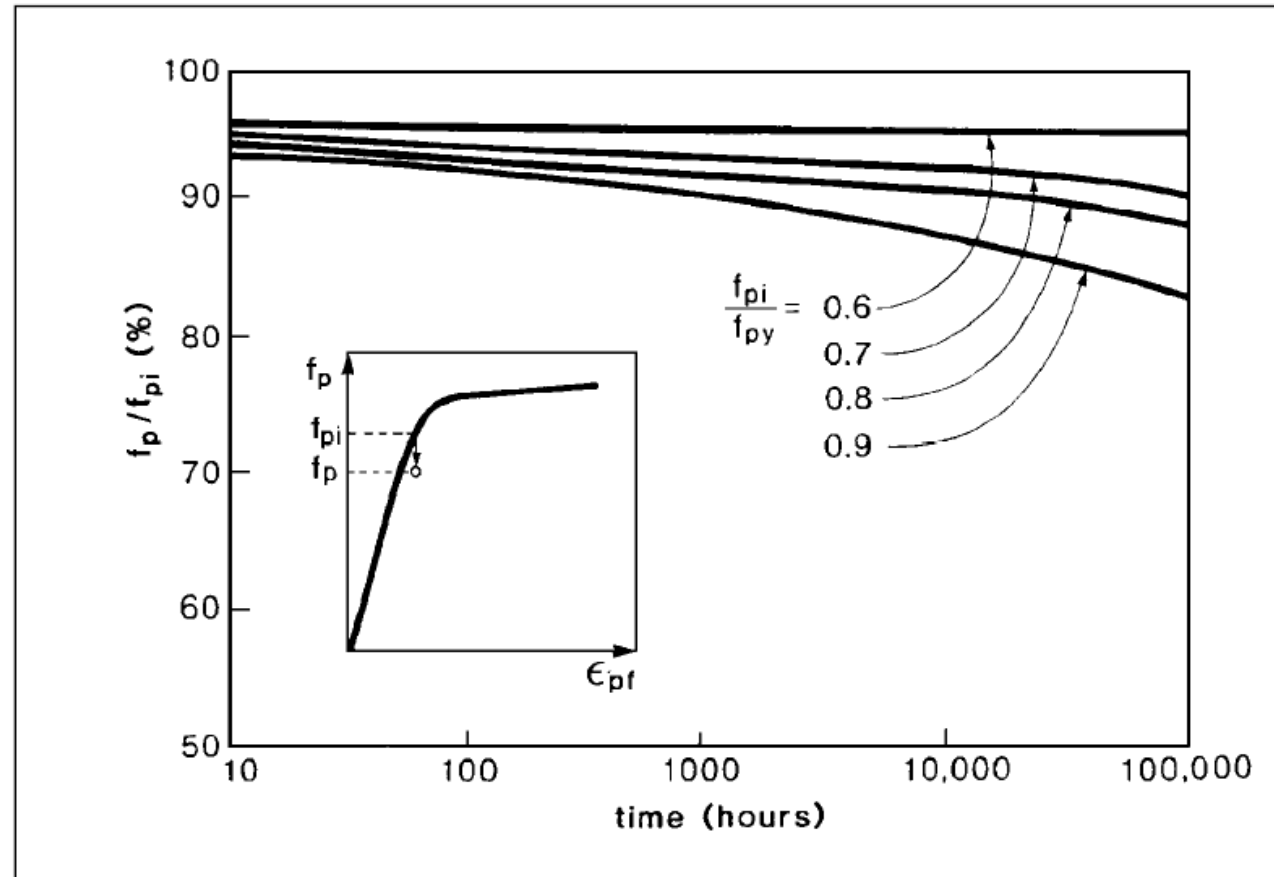


Figura basada en datos de pruebas de torones liberados de esfuerzo publicada en 1964

Pérdidas de Presfuerzo

Fuentes de Pérdidas en Presfuerzo

Pérdidas inmediatas:

- Contracción Elástica, Δf_{pES}
Causado por el acortamiento de la viga causado por la aplicación de la fuerza de presfuerzo

Pérdidas a largo plazo (dependientes del tiempo):

- Contracción del Concreto, Δf_{pSR}
Contracción del concreto a lo largo del tiempo
- Flujo Plástico del Concreto, Δf_{pCR}
Causado por flujo del concreto bajo cargas sostenidas – cargas permanentes y de presfuerzo
- Relajación del Acero de Presfuerzo, Δf_{pR}
Torones pierden parte de su tensión inicial a lo largo del tiempo

Fuentes de Pérdidas en Presfuerzo

Para miembros postensados:

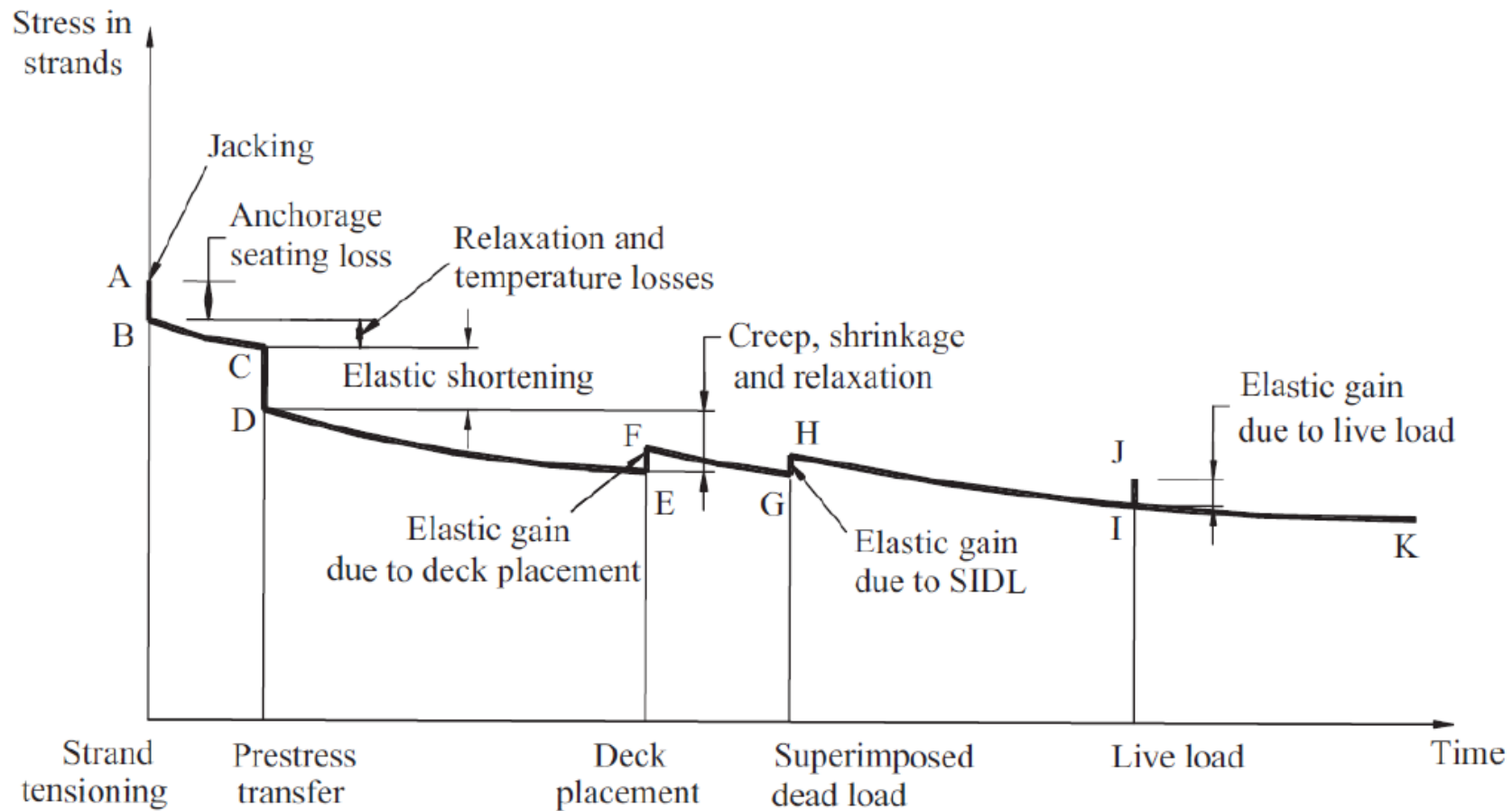
Pérdidas inmediatas:

- **Pérdidas por fricción, Δf_{pF}**
Pérdida de esfuerzos durante el tensionado de torones por fricción contra los ductos de presfuerzo. Depende del perfil de los tendones.
- **Pérdidas por asentamiento de cuñas, Δf_{pA}**
Asociadas al acomodo de cuñas al liberar los tendones del gato de tensado en el extremo activo de la viga.

Los fabricantes de dispositivos de postensado pueden estimar la magnitud de ésta pérdida.

Historia de Esfuerzos en Torones

*Ejemplo de una viga pretensada:
(Reporte NCHRP 496)*



Pérdidas por Fricción y Anclaje

(“Prestressed Concrete Structures”, Collins and Mitchell, 1997)

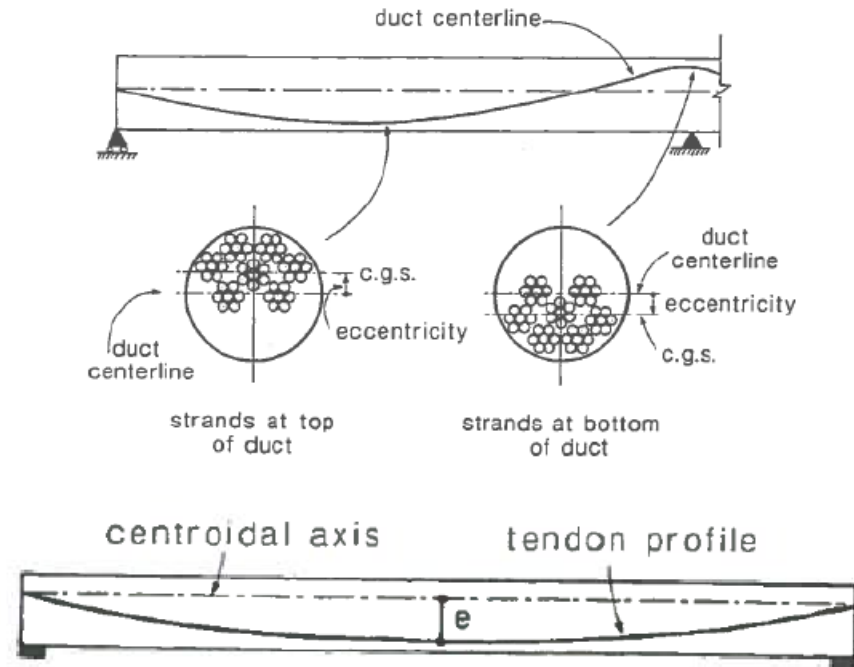
$$P_B = P_A e^{-(\mu\alpha + Kx)}$$

P_A , P_B = fuerza en torón en sección A y B.

μ = coeficiente de fricción entre torón y ducto

α = cambio acumulativo del ángulo entre A y B

K = coeficiente empírico que captura los cambios inesperados en el perfil del ducto (wobble)



(Coeficientes: ACI 343R-95)

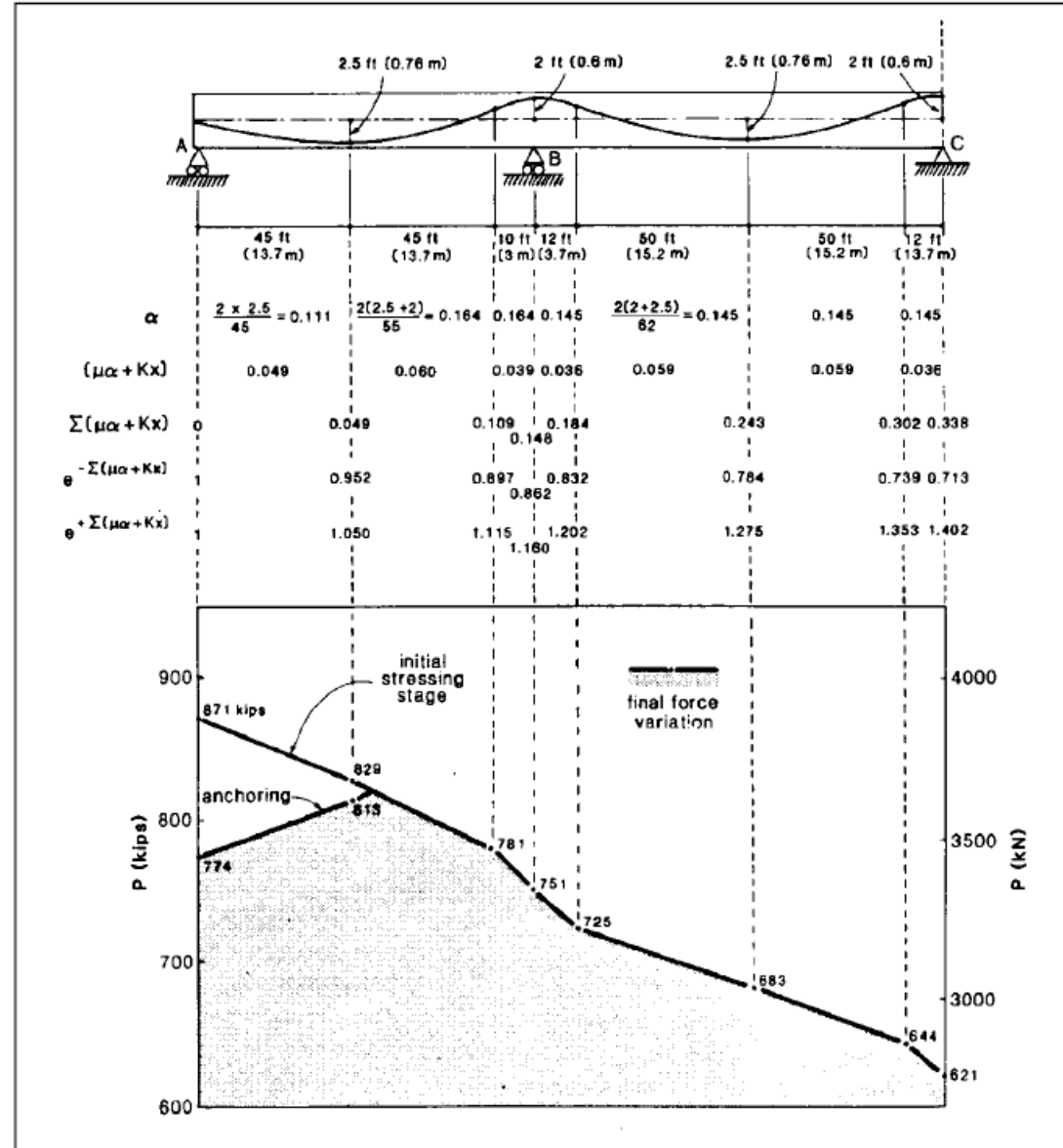
Table 9.6.3.1—Friction coefficients for post-tensioning tendons*

Type of tendons and sheathing	Wobble coefficient, K		Curvature coefficient μ
	per ft	per m	
Tendons in flexible metal sheathing			
- wires	0.0010-0.0015	0.0033-0.0049	0.15-0.25
- 7-wire strands	0.0005-0.0020	0.0016-0.0066	0.15-0.25
- high-strength bars	0.0001-0.0006	0.0003-0.0020	0.08-0.30
Tendons in rigid and semi-rigid galvanized			
- 7-wire strands	0.0002	0.00066	0.15-0.25
Pregreased tendons			
- wires and 7-wire strands	0.0003-0.0020	0.0010-0.0066	0.05-0.15
Mastic-coated tendons			
- wires and 7-wire strands	0.0010-0.0020	0.0033-0.0066	0.05-0.15

*See also manufacturers' literature or test data.

Ejemplo de Pérdidas por Fricción y Anclaje

- (“Prestressed Concrete Structures”, Collins and Mitchell, 1997)



Pérdida Total de Fuerza de Presfuerzo

Miembros pretensados:

- ***Inmediatamente después de liberación:***

$$\Delta f_{pi} = \Delta f_{pES}$$

- ***Final (pérdidas totales)***

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pES} + \Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pR} - \Delta f_{pLT}$$

Miembros postensados:

- ***Inmediatamente después de asentar cuñas***

$$\Delta f_{pi} = \Delta f_{pF} + \Delta f_{pA} + \Delta f_{pES}$$

- ***Final (pérdidas totales)***

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pF} + \Delta f_{pA} + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pR} - \Delta f_{pLT}$$

Contracción Elástica

LRFD 5.9.5.2.3

Elementos pretensados:

$$\Delta f_{pES} = \frac{E_p}{E_{ct}} f_{cgp}$$

donde

f_{cgp} = esfuerzo del concreto al nivel del c.g. de los torones de presfuerzo causado por la fuerza de presfuerzo inicial y el peso propio en la sección de momento máximo

E_p = E del torón de presfuerzo

E_{ct} = E del concreto cuando ocurre la transferencia

Contracción Elástica

LRFD 5.9.5.2.3

Miembros postensados:

$$\Delta f_{pES} = \frac{N-1}{2N} \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp}$$

donde

N = número de torones de presfuerzo idénticos

f_{cgp} = esfuerzo en el concreto al nivel del c.g. de los torones de presfuerzo causado por la aplicación de la fuerza de presfuerzo y peso propio del elemento en las secciones de momento máximo.

Estimación de Pérdidas a Largo Plazo: Método Aproximado: Suma Global

LRFD 5.9.5.3

“para elementos pretensionados estándar bajo condiciones normales de carga y ambiente”

$$\Delta f_{pLT} = 10.0 \frac{f_{pi} A_{ps}}{A_g} \gamma_h \gamma_{st} + 12.0 \gamma_h \gamma_{st} + \Delta f_{pR}$$

donde

γ_h = factor de humedad relativa = $1.7 - 0.01H$

γ_{st} = factor de corrección de resistencia = $\frac{5}{1 + f'_{ci}}$ con f'_{ci} en ksi

**Δf_{pR} = 2.4 ksi para torones de baja relajación;
= 10.0 ksi para torones con relajación de esfuerzos**

**De otra manera deben usarse métodos refinados en LRFD
5.9.5.4**

Cálculo Refinado de Pérdidas Dependientes del Tiempo (Largo Plazo)

LRFD 5.9.5.4.1

Restricciones en Empleo del Método

- ***Claros menores que 250 ft***
- ***Concreto de densidad normal***
- ***Resistencia mayor que 3.50 ksi cuando se aplica el presfuerzo***