

Longitud de anclaje y empalme de la armadura

ACTUALIZACIÓN PARA EL CÓDIGO 2002

La mayoría de los cambios introducidos en el Capítulo 12 han sido para aclarar requisitos existentes. Se modificaron las ecuaciones dadas en la Sección 12.2 para la longitud de anclaje ℓ_d de las barras y alambres conformados solicitados a tracción: ahora el diámetro nominal d_b aparece del lado derecho de la ecuación. Ahora el título de la Sección 12.3 también incluye a los alambres conformados. Se eliminó la definición de la longitud básica de anclaje ℓ_{db} ; por motivos de claridad se introdujo la longitud de anclaje ℓ_{dc} para barras y alambres conformados solicitados a compresión. De manera similar, se modificó la Sección 12.5 para explicar los requisitos de anclaje para las barras y alambres con gancho solicitados a tracción.

La expresión para calcular la longitud de anclaje ℓ_d de los cordones de pretensado se trasladó del comentario a la Ecuación (12-2) de la Sección 12.9. La Ecuación (12-2) reemplaza la versión no numerada anterior. El nuevo artículo 12.9.1.1 especifica que en ciertos casos se permite usar una longitud embebida menor que la longitud de anclaje. El artículo 12.9.2 especifica que el análisis se puede limitar a las secciones transversales en las cuales se anclará la totalidad de la resistencia de diseño, pero ahora aclara que esta práctica puede no ser conservadora. El comentario de esta sección contiene lineamientos para determinar la capacidad de secciones en las cuales los cordones no están totalmente anclados.

Por motivos de claridad también se modificó la Sección 12.5.4, la cual trata los empalmes mecánicos y soldados que no satisfacen los requisitos de los artículos 12.14.3.2 ó 12.14.3.4.

CONSIDERACIONES GENERALES

El concepto de la longitud de anclaje de las barras conformadas y los alambres conformados solicitados a tracción se basa en la tensión de adherencia promedio que se logra en la longitud embebida de las barras o alambres. Este concepto exige que las armaduras tengan longitudes mínimas especificadas o que se prolonguen las distancias mínimas especificadas más allá de las secciones en las cuales la armadura está solicitada a las tensiones máximas. En los elementos solicitados a flexión estas tensiones máximas generalmente ocurren en las secciones donde la tensión es máxima y en aquellas donde la armadura adyacente termina o cambia de dirección.

En el Capítulo 12 del Código no se utiliza el factor de reducción de la resistencia, ϕ , ya que las longitudes de anclaje especificadas ya incluyen una tolerancia que considera la reducción de la resistencia.

12.1 ANCLAJE DE LA ARMADURA – REQUISITOS GENERALES

Las armaduras necesitan, a partir de la sección donde se produce la tensión máxima, una cierta longitud o algún dispositivo a través del cual transmitir al hormigón los esfuerzos a los que están solicitadas. Esta longitud o dispositivo de anclaje son necesarios a ambos lados de las secciones donde se producen las máximas tensiones. Por ejemplo, en los elementos continuos, típicamente la armadura se prolonga una distancia considerable a un lado de una sección crítica, de modo que generalmente sólo es necesario realizar los cálculos correspondientes al lado en el cual termina la armadura.

Hasta que haya más información disponible y con el objeto de asegurar la ductilidad y la seguridad de las estructuras de hormigón de alta resistencia, a partir del Código 1989 el término $\sqrt{f'_c}$ se limita a un máximo de 100 psi. Todas las ecuaciones de diseño existentes para el anclaje de barras rectas solicitadas a tracción y compresión y para el anclaje de las barras que terminan en gancho solicitadas a tracción dependen de $\sqrt{f'_c}$. Estas ecuaciones fueron desarrolladas a partir de resultados de ensayos realizados en armaduras de acero embebidas en hormigones con resistencias a la compresión comprendidas entre 3000 y 6000 psi. De forma conservadora, el Comité ACI 318 limita el valor de $\sqrt{f'_c}$ a 100 psi hasta que se realicen ensayos que permitan verificar la aplicabilidad de las expresiones de diseño actuales a las barras embebidas en hormigones de alta resistencia.

12.2 ANCLAJE DE LAS BARRAS Y ALAMBRES CONFORMADOS SOLICITADOS A TRACCIÓN

Los requisitos de la Sección 12.2 se basan en los trabajos de Orangun, Jirsa y Breen^{4.1} y de Sozen y Moehle.^{4.2} El artículo 12.2.3 da la expresión para calcular la longitud de anclaje de una barra o alambre recto conformado solicitado a tracción en función del diámetro de la barra o alambre:

$$\ell_d = \left(\left(\frac{3}{40} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) \frac{\alpha \beta \gamma \lambda}{\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) d_b \quad \text{Ec. (12-1)}$$

donde:

ℓ_d = longitud de anclaje, in.

d_b = diámetro nominal de la barra o alambre, in.

f_y = tensión de fluencia especificada de una barra o alambre no pretensado, psi

f'_c = resistencia a la compresión especificada del hormigón, psi

α = **factor relativo a la ubicación de la armadura**

= 1,3 para la armadura horizontal ubicada de manera tal que haya, como mínimo, 12 in. de hormigón debajo de la barra o alambre anclado o empalmado

= 1,0 para otras armaduras

β = **factor relativo al revestimiento**

= 1,5 para las barras o alambres revestidos con epoxi, con recubrimientos menores que $3d_b$ o una separación libre menor que $6d_b$

= 1,2 para las demás barras o alambres con revestimiento epoxi

= 1,0 para las armaduras sin revestimiento

No es necesario adoptar para el producto de α por β un valor mayor que 1,7.

γ = **factor relativo al diámetro de la armadura**

= 0,8 para las barras y alambres conformados No. 6 y menores

= 1,0 para las barras No. 7 y mayores

λ = **factor aplicable al hormigón de agregados livianos**

= 1,3 cuando se utilice hormigón de agregados livianos, o bien

= $6,7\sqrt{f'_c} / f_{ct}$; pero nunca menor que 1,0 cuando se especifica f_{ct}

= 1,0 cuando se utilice hormigón de peso normal.

c = **separación o recubrimiento**, in.

= (1) la distancia entre el centro de la barra o alambre anclado y la superficie de hormigón más próxima, o (2) la mitad de la separación entre los centros de las barras o alambres que se anclan, cualquiera sea el valor que resulte menor.

K_{tr} = **índice de la armadura transversal**

$$= \frac{A_{tr} f_{yt}}{1500 s n}$$

donde:

A_{tr} = área total de toda la armadura transversal que está ubicada dentro de la distancia s y que atraviesa el plano potencial de hendimiento a través de la armadura que está siendo anclada, in.²

f_{yt} = tensión de fluencia especificada de la armadura transversal, psi

s = separación máxima de la armadura transversal ubicada en la longitud ℓ_d , medida entre sus centros, in.

n = número de barras o alambres que se anclan a lo largo del plano de hendimiento

Observar que para evitar las fallas por arrancamiento se establece un valor límite de 2,5 para el término $\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)$ (12.2.3).

En el Código 1989 y sus ediciones anteriores, para evitar las fallas por arrancamiento se especificaba la expresión $0,03d_b f_y / \sqrt{f'_c}$.

Para simplificar el diseño, de forma conservadora se puede asumir $K_{tr} = 0$ aún cuando haya armadura transversal. Si hay un recubrimiento libre de $2d_b$ y la separación libre entre las barras que se anclan es de $4d_b$, la variable "c" sería igual a $2,5d_b$.

Para estas condiciones, aún con $K_{tr} = 0$, el término $\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)$ sería igual a 2,5.

El término $\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)$ del denominador de la Ecuación (12-1) toma en cuenta los efectos de la falta de recubrimiento, la falta de separación y el confinamiento proporcionado por la armadura transversal. Para simplificar aún más el cálculo de ℓ_d , a partir del Código 1995 se preseleccionaron valores para el término $\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)$. En consecuencia, la Ecuación (12-1) puede

adoptar las formas simplificadas especificadas en el artículo 12.2.2 y reproducidas en la Tabla 4-1 siguiente. Exclusivamente a los fines de la discusión, las cuatro ecuaciones de esta tabla se han identificado con las letras A, B, C y D. Observar que

esta designación no aparece en el Código. En las Ecuaciones A y B, el término $\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b}\right) = 1,5$, mientras que en las Ecuaciones C y D el término $\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b}\right) = 1,0$. Las Ecuaciones A y C incluyen un factor relativo al diámetro de la armadura $\gamma = 0,8$. Esta reducción del 20 por ciento se basa en comparaciones con requisitos anteriores y en numerosos resultados de ensayos.

Tabla 4-1 – Longitudes de desarrollo ℓ_d especificadas en el artículo 12.2.2

	Barras o alambres conformados No. 6 y menores	Barras No. 7 y mayores
La separación libre entre las barras o alambres que se anclan o empalman es mayor o igual que d_b , el recubrimiento libre es mayor o igual que d_b y la cantidad de estribos o estribos cerrados a lo largo de ℓ_d es mayor que el mínimo indicado en el Código o bien La separación libre entre las barras o alambres que se anclan o empalman es mayor o igual que $2d_b$ y el recubrimiento libre es mayor o igual que d_b	(Ec. A) $\left(\frac{f_y \alpha \beta \lambda}{25 \sqrt{f'_c}}\right) d_b$	(Ec. B) $\left(\frac{f_y \alpha \beta \lambda}{20 \sqrt{f'_c}}\right) d_b$
Otros casos	(Ec. C) $\left(\frac{3 f_y \alpha \beta \lambda}{50 \sqrt{f'_c}}\right) d_b$	(Ec. D) $\left(\frac{3 f_y \alpha \beta \lambda}{40 \sqrt{f'_c}}\right) d_b$

Las Ecuaciones A y B solamente se pueden aplicar si se satisface uno de los dos conjuntos de condiciones siguientes:

Conjunto #1

Se deben satisfacer simultáneamente las tres condiciones siguientes:

1. La separación libre de la armadura que se ancla o empalma no debe ser menor que su diámetro d_b ,
2. El recubrimiento libre de hormigón sobre la armadura que se ancla no debe ser menor que d_b , y
3. La cantidad mínima de estribos o estribos cerrados en la longitud ℓ_d no debe ser menor que los valores mínimos especificados en el artículo 11.5.5.3 para las vigas o en el artículo 7.10.5 para las columnas

Conjunto #2:

Se deben satisfacer simultáneamente las dos condiciones siguientes:

1. La separación libre mínima de la armadura que se ancla o empalma no debe ser menor que $2d_b$, y
2. El recubrimiento libre no debe ser menor que d_b .

Si no se pueden satisfacer simultáneamente todas las condiciones del Conjunto #1 ni todas las condiciones del Conjunto #2 se deben utilizar las Ecuaciones C o D. Observar que la Ecuación D es idéntica a la Ecuación (12-1) con $\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b}\right) = 1,0$ y el factor relativo al diámetro de la armadura $\gamma = 1,0$.

Aunque las Ecuaciones A, B, C y D son más sencillas de utilizar que la Ecuación (12-1), el término $\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b}\right)$ solamente puede tomar el valor 1,0 (Ecuaciones C y D) o el valor 1,5 (Ecuaciones A y B). Por el contrario, la Ecuación (12-1) puede requerir de un esfuerzo adicional, pero permite asignarle al término $\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b}\right)$ un valor de hasta 2,5. Por lo tanto, las longitudes de anclaje ℓ_d calculadas con la Ecuación (12-1) pueden ser considerablemente menores que las calculadas con las ecuaciones simplificadas del artículo 12.2.2.

Las longitudes de anclaje de la Tabla 4-1 se pueden simplificar aún más para determinadas condiciones particulares. Por ejemplo, para armaduras de acero Grado 60 ($f_y = 60.000$ psi) y diferentes resistencias a la compresión del hormigón, asumiendo hormigón de peso normal ($\lambda = 1,0$) y barras o alambres inferiores ($\alpha = 1,0$) sin revestimiento ($\beta = 1,0$) los valores de ℓ_d en función de d_b se pueden determinar como se indica en la Tabla 4-2.

Al igual que en las ediciones anteriores del Código, la longitud de anclaje de las barras o alambres conformados, incluyendo todos los factores de modificación, debe ser mayor o igual que 12 in.

Tabla 4-2 – Longitud de anclaje ℓ_d para barras o alambres inferiores de acero Grado 60, sin revestimiento, colocadas en hormigón de peso normal

	f'_c psi	Barras o alambres conformados No. 6 y menores	Barras No. 7 y mayores
La separación libre entre las barras o alambres que se anclan o empalman es mayor o igual que d_b , el recubrimiento libre es mayor o igual que d_b y la cantidad de estribos o estribos cerrados a lo largo de ℓ_d es mayor que el mínimo indicado en el Código o bien La separación libre entre las barras o alambres que se anclan o empalman es mayor o igual que $2d_b$ y el recubrimiento libre es mayor o igual que d_b	3000	$44d_b$	$55d_b$
	4000	$38d_b$	$47d_b$
	5000	$34d_b$	$42d_b$
	6000	$31d_b$	$39d_b$
	8000	$27d_b$	$34d_b$
	10.000	$24d_b$	$30d_b$
Otros casos	3000	$66d_b$	$82d_b$
	4000	$57d_b$	$71d_b$
	5000	$51d_b$	$64d_b$
	6000	$46d_b$	$58d_b$
	8000	$40d_b$	$50d_b$
	10.000	$36d_b$	$45d_b$

12.2.5 Armadura en exceso

Cuando en un elemento solicitado a tracción la armadura provista es mayor que la armadura requerida, la longitud de anclaje se puede reducir aplicando la relación $[(A_s \text{ requerida}) / (A_s \text{ provista})]$. Observar que esta reducción no se puede aplicar en los siguientes casos: (a) cuando se requiere el anclaje para la totalidad de la tensión f_y , como se indica para los empalmes de tracción por yuxtaposición en las Secciones 7.13, 12.15.1 y 13.3.8.5; (b) para el anclaje de la armadura para momento positivo en los apoyos, de acuerdo con 12.11.2; y (c) para el anclaje de la armadura de contracción y temperatura de acuerdo con el artículo 7.12.2.3. Observar también que no se permite reducir la longitud de anclaje de las armaduras de las estructuras ubicadas en regiones de elevada peligrosidad sísmica o para las cuales se requiere un nivel de comportamiento o diseño sismorresistente elevado (ver 21.2.1.4).

La longitud de anclaje ℓ_d calculada luego de aplicar la reducción por armadura en exceso especificada en el artículo 12.2.5 debe ser mayor o igual que 12 in.

12.3 ANCLAJE DE LAS BARRAS Y ALAMBRES CONFORMADOS SOLICITADOS A COMPRESIÓN

La longitud de anclaje requerida para la armadura solicitada a compresión es menor que la longitud de anclaje requerida para la armadura solicitada a tracción, ya que en las barras comprimidas no se presenta el efecto debilitante que provocan las fisuras originadas por la tracción por flexión. La longitud de anclaje para las barras conformadas o los alambres conformados solicitados a compresión es $\ell_{dc} = 0,02 d_b f_y / \sqrt{f'_c}$, pero este valor no puede ser menor que $0,0003 d_b f_y$ ni menor que 8 in. En el Código 1999 esto se definía como la longitud básica de anclaje en compresión, ℓ_{db} . Observar que ℓ_{dc} se puede reducir si hay armadura en exceso de la requerida (12.3.3(a) y si hay estribos cerrados o zunchos que "confinen" la armadura (12.3.3(b)). Observar también que los requisitos que deben satisfacer los estribos cerrados o zunchos para poder reducir la longitud de anclaje un 25 por ciento son algo más estrictos que los correspondientes a los estribos de columna "regulares" especificados en 7.10.5, pero menos estrictos que los correspondientes a los zunchos especificados en 7.10.4. A modo de referencia, la Tabla 4-3 lista las longitudes de anclaje en compresión para las barras de acero Grado 60.

Tabla 4-3 – Longitud de desarrollo en compresión ℓ_{dc} para barras de acero Grado 60 (in.)

Tamaño de la barra No.	f'_c (Hormigón de peso normal), psi		
	3000	4000	$\geq 4444^*$
3	8,2	7,1**	6,8**
4	11,0	9,5	9,0
5	13,7	11,9	11,3
6	16,4	14,2	13,5
7	19,2	16,6	15,8
8	21,9	19,0	18,0
9	24,7	21,4	20,3
10	27,8	24,1	22,9
11	30,9	26,8	25,4
14	37,1	32,1	30,5
18	49,4	42,8	40,6

* Para $f'_c \geq 4444$ psi la mínima longitud básica de anclaje resulta determinante ($0,0003 d_b f_y$). Para las barras de acero Grado 60 $\ell_{dc} = 18 d_b$.

** La longitud de anclaje ℓ_{dc} (incluyendo todos los factores de reducción aplicables) no debe ser menor que 8 in.

12.4 ANCLAJE DE LOS PAQUETES DE BARRAS

Cuando se utilizan paquetes de tres o cuatro barras es necesario aumentar la longitud de anclaje de las barras individuales. Esta longitud adicional es necesaria porque el agrupamiento hace más difícil movilizar resistencia al "deslizamiento" entre las barras, en el núcleo del paquete. Para un paquete de tres barras el factor de modificación aplicable es 1,2; para un paquete de cuatro barras el factor de modificación aplicable es 1,33. Otros requisitos aplicables incluyen los especificados en 7.6.6.4 referidos a la terminación de las barras individuales dentro de un paquete, y los de 12.14.2.2 referidos al empalme por yuxtaposición de los paquetes de barras.

Para determinar los factores de 12.2 que dependen del diámetro de las barras, d_b , un paquete de barras se puede considerar como una sola barra cuyo diámetro se obtiene en base al área total equivalente. Ver la Tabla 3-7 del Capítulo 3 de este documento.

12.5 ANCLAJE DE LAS BARRAS O ALAMBRES TERMINADOS EN GANCHO SOLICITADOS A TRACCIÓN

Los requisitos actuales para el anclaje de las armaduras terminadas en gancho fueron introducidos por primera vez en el Código 1983. Estos requisitos representaron un cambio importante con respecto a los requisitos de los códigos anteriores, ya que diferenciaban entre el anclaje de las armaduras terminadas en gancho y el anclaje de las barras rectas, y daban la longitud de anclaje para las barras terminadas en gancho directamente. Los requisitos actuales no sólo simplifican el cálculo de las longitudes de anclaje de las barras terminadas en gancho sino que además con ellos se obtienen longitudes embebidas considerablemente menores que las requeridas por las ediciones anteriores del Código, particularmente para el caso de las barras de mayor diámetro. La Sección 12.5 contiene requisitos para determinar la longitud de anclaje de las barras conformadas que terminan en un gancho normal. Los ganchos sólo se pueden usar para anclar barras traccionadas; estos ganchos no se pueden considerar efectivos para el anclaje de las armaduras en compresión (ver 12.1.1 y 12.5.5). Esta sección solamente considera los ganchos "normales" (ver 7.1); los requisitos de la Sección 12.5 no permiten calcular la capacidad de anclaje de los ganchos con diámetros de mayor tamaño.

Para poder aplicar los requisitos de anclaje de las barras o alambres con ganchos el primer paso consiste en calcular la longitud de anclaje de la barra o alambre, ℓ_{dh} , de acuerdo con el artículo 12.5.2. Luego esta longitud se multiplica por el factor o los factores de modificación aplicables indicados en el artículo 12.5.3. Observar que en el Código 1999 se determinaba una longitud básica de anclaje diferente, ℓ_{hb} , la cual luego se podía modificar aplicando los factores de 12.5.3. La longitud de anclaje ℓ_{dh} se mide entre la sección crítica y el extremo exterior del gancho normal, es decir, corresponde a la longitud recta embebida desde la sección crítica hasta el inicio del gancho, más el radio de doblado del gancho, más un diámetro de la barra o alambre. A modo de referencia, la Figura 4-1 ilustra ℓ_{dh} y los detalles de los ganchos normales (ver 7.1) para todos los tamaños de barras y alambres habituales. Para los ganchos normales doblados a 180 grados perpendiculares a una superficie expuesta, la longitud de anclaje debe proveer una distancia mínima de 2 in. más allá de la cola del gancho.

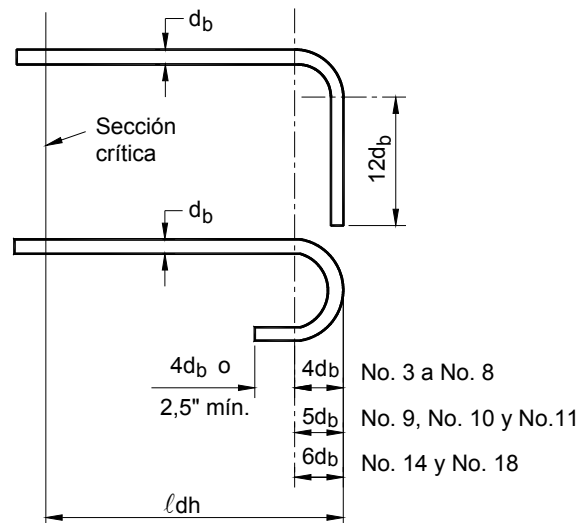


Figura 4-1 – Longitud de anclaje ℓ_{dh} para los ganchos normales

12.5.2 Longitud de anclaje ℓ_{dh}

De acuerdo con 12.5.2, la longitud de anclaje, ℓ_{dh} , para las barras o alambres con gancho solicitadas a tracción es:

$$\ell_{dh} = \left(\frac{0,02\beta\lambda f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) d_b$$

donde $\beta = 1,2$ si la armadura tiene revestimiento epoxi^{4,3} y $\lambda = 1,3$ si se trata de hormigón de agregados livianos. Para los demás casos $\beta = \lambda = 1,0$.

La Tabla 4-4 indica la longitud de anclaje para las barras con gancho embebidas en hormigón de peso normal, para diferentes resistencias a la compresión especificada y armadura de acero de grado 60.

Tabla 4-4 – Longitud de anclaje ℓ_{dh} de las barras con ganchos normales*
(Barras de acero Grado 60 sin revestimiento) (in.)

Tamaño de la barra No.	f'_c (Hormigón de peso normal), psi					
	3000	4000	5000	6000	8000	10.000
3	82	7,1	6,4	5,8	5,0	4,5
4	11,0	9,5	8,5	7,7	6,7	6,0
5	13,7	11,9	10,6	9,7	8,4	7,5
6	16,4	14,2	12,7	11,6	10,1	9,0
7	19,2	16,6	14,8	13,6	11,7	10,5
8	21,9	19,0	17,0	15,5	13,4	12,0
9	24,7	21,4	19,1	17,5	15,1	13,5
10	27,8	24,1	21,6	19,7	17,0	15,2
11	30,9	26,8	23,9	21,8	18,9	16,9
14	37,1	32,1	28,7	26,2	22,7	20,3
18	49,5	42,8	38,3	35,0	30,3	27,1

* La longitud de anclaje ℓ_{dh} (incluyendo todos los factores de modificación aplicables) no debe ser menor que $8d_b$ ni menor que 6 in.

12.5.3 Factores de modificación

Los factores de modificación para la longitud ℓ_{dh} listados en el artículo 12.5.3 toman en cuenta los siguientes factores:

- Las condiciones favorables de confinamiento que proporciona un mayor recubrimiento de hormigón (12.5.3(a))
- Las condiciones favorables de confinamiento que proporcionan los estribos y los estribos cerrados para resistir el hendimiento del hormigón (12.5.3(b) y (c))
- La presencia de armadura en exceso de la requerida por cálculo (12.5.3(d))

En la Figura 4-2 se ilustran el recubrimiento lateral (perpendicular al plano del gancho) y el recubrimiento sobre la prolongación de la barra más allá de un gancho con un ángulo de 90 grados mencionados en 12.5.3(a).

Observar que el Código 2002 diferencia los requisitos para los ganchos con un ángulo de 90 grados y para aquellos con un ángulo de 180 grados. Las Figuras R12.5.3(a) y R12.5.3(b) ilustran casos en los cuales se puede utilizar el factor de modificación especificado en 12.5.3(b).

La longitud de anclaje, ℓ_{dh} , obtenida luego de multiplicar la longitud de anclaje por todos los factores de modificación aplicables no debe ser menor que $8d_b$ ni menor que 6 in.

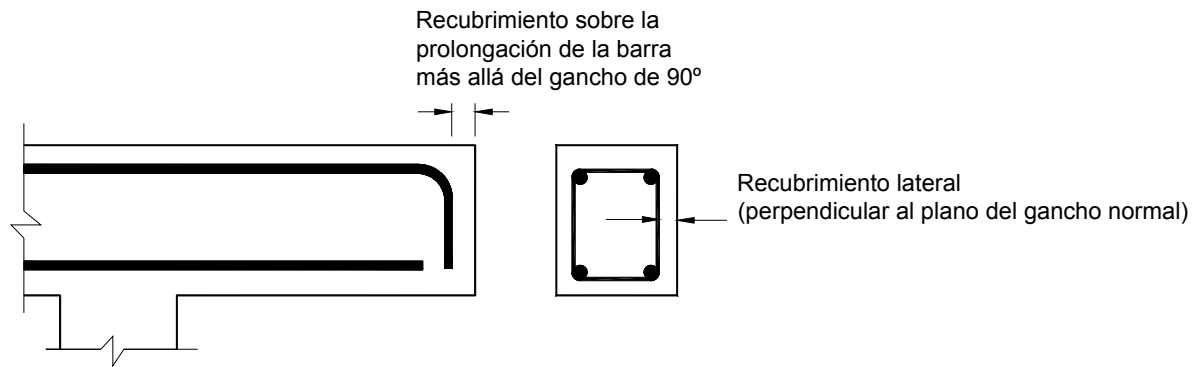


Figura 4-2 – Recubrimientos de hormigón mencionados en 12.5.3(a)

12.5.4 Ganchos normales en los extremos discontinuos de un elemento

El artículo 12.5.4 contiene un requisito específico para las barras que se anclan mediante un gancho normal en los extremos discontinuos de un elemento, como por ejemplo en los extremos de una viga simplemente apoyada, en el extremo libre de un voladizo o en los extremos de los elementos que concurren a un nudo y que no se prolongan más allá de dicho nudo. Si es necesario anclar toda la resistencia de una barra mediante un gancho, y si tanto el recubrimiento a ambos lados del gancho como el recubrimiento en la parte superior (o inferior) del gancho es menor que 2,5 in., el artículo 12.5.4 exige que el gancho esté encerrado por estribos o por estribos cerrados en la totalidad de la longitud de anclaje ℓ_{dh} . La separación de estos estribos o estribos cerrados no debe ser mayor que $3d_b$, siendo d_b el diámetro de la barra. Además, el factor de modificación de 0,8 que se aplica cuando hay confinamiento provisto por estribos o estribos cerrados (12.5.3(b) y (c)) no se aplica al caso especial cubierto por el artículo 12.5.4. En los extremos discontinuos de las losas de hormigón en las cuales el confinamiento es proporcionado por la continuidad de la losa a ambos lados del gancho no se aplican los requisitos del artículo 12.5.4.

12.6 ANCLAJE MECÁNICO

La Sección 12.6 permite anclar las armaduras mediante anclajes mecánicos, siempre y cuando su capacidad para transmitir la tensión de la armadura sin dañar el hormigón haya sido verificada mediante ensayos. El artículo 12.6.3 refleja el concepto de que la armadura se puede anclar mediante una combinación de un anclaje mecánico más una longitud embebida adicional de la armadura. Por ejemplo, si el dispositivo mecánico seleccionado no puede desarrollar la resistencia de diseño de una barra, es necesario proveer una longitud embebida adicional entre el dispositivo mecánico y la sección crítica.

12.7 ANCLAJE DE LAS MALLAS DE ACERO SOLDADAS DE ALAMBRES CONFORMADOS SOLICITADAS A TRACCIÓN

La longitud de anclaje de las mallas de acero soldadas de alambres conformados se mide entre la sección crítica y el extremo del alambre. De acuerdo con el artículo 12.7.1, la longitud de anclaje de una malla de acero soldada de alambres conformados se calcula como el producto entre el valor de ℓ_d obtenido de acuerdo con los artículos 12.2.2 ó 12.2.3 por un factor aplicable a las mallas de acero soldadas de alambres conformados obtenido de acuerdo con los artículos 12.7.2 ó 12.7.3. Si la armadura provista es mayor que la armadura requerida por cálculo, la longitud de anclaje se puede reducir de acuerdo con lo especificado en el artículo 12.2.5. Al aplicar los requisitos de 12.2.2 ó 12.2.3 a las mallas soldadas de alambres conformados revestidas con epoxi se permite utilizar un factor de revestimiento $\beta = 1,0$. La longitud de anclaje resultante ℓ_d debe ser mayor o igual que 8 in., excepto para el cálculo de las longitudes de los empalmes por yuxtaposición (ver 12.18) y el anclaje de la armadura del alma (ver 12.13). La Figura 4-3 ilustra la longitud de anclaje requerida para las mallas de acero soldadas de alambres conformados.

El artículo 12.7.2 se aplica cuando hay como mínimo un alambre transversal ubicado dentro de la longitud de anclaje, a una distancia mayor o igual que 2 in. de la sección crítica. El factor para malla de acero soldada especificado en 12.7.2 es igual al mayor valor que se obtenga de $[(f_y - 35.000)/f_y]$ ó $[5d_b/s_w]$, pero siempre menor o igual que 1,0.

Si no hay ningún alambre transversal ubicado dentro de la longitud de anclaje, o si el alambre transversal está ubicado a una distancia menor que 2 in. de la sección crítica, la longitud de anclaje de la malla soldada de alambres conformados se debe calcular de acuerdo con los artículos 12.2.2 ó 12.2.3. Para esta condición el factor para dicha malla soldada se debe tomar igual a 1,0 (ver 12.7.3).

De acuerdo con la norma ASTM A 497, las mallas de acero soldadas de alambres conformados pueden estar compuestas exclusivamente por alambres conformados (ASTM A 496) o por una combinación de alambres conformados en una dirección (ASTM A 496) y alambres lisos en la dirección ortogonal (ASTM A 82). En este último caso la malla se debe anclar de acuerdo con la Sección 12.8 (mallas de acero soldadas de alambres lisos solicitadas a tracción).

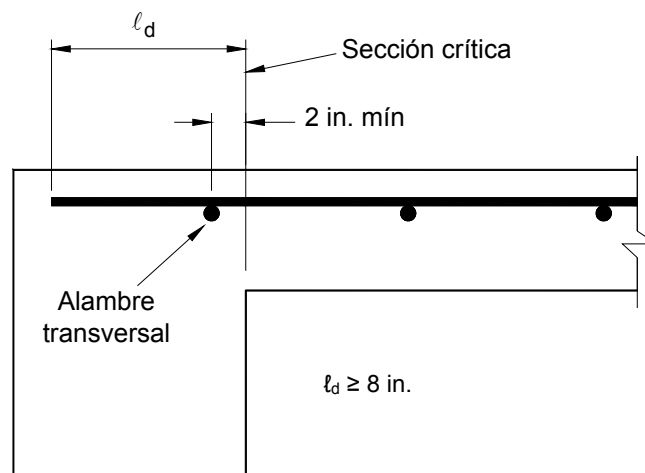


Figura 4-3 – Anclaje de las mallas de acero soldadas de alambres conformados

12.8 ANCLAJE DE LAS MALLAS DE ACERO SOLDADAS DE ALAMBRES LISOS SOLICITADAS A TRACCIÓN

La longitud de anclaje de las mallas de acero soldadas de alambres lisos se mide entre la sección crítica y el alambre transversal más alejado. El anclaje pleno de las mallas de alambres lisos ($A_w f_y$) se logra embebiendo como mínimo dos alambres transversales más allá de la sección crítica, ubicando el alambre transversal más próximo a una distancia mayor o igual que 2 in. de la sección crítica. La Sección 12.8 requiere además que la longitud embebida medida entre la sección crítica y el alambre más alejado sea mayor o igual que $\ell_d = 0,27 A_w f_y \lambda / (s_w \sqrt{f'_c})$ y mayor o igual que 6 in. Si la armadura provista es mayor que la armadura requerida por cálculo, la longitud de anclaje ℓ_d se puede reducir multiplicando por la relación $(A_s \text{ requerida}) / (A_s \text{ provista})$. La longitud de anclaje mínima de 6 in. no se aplica al cálculo de las longitudes de los anclajes por yuxtaposición (ver 12.19). La Figura 4.4 ilustra la longitud de anclaje requerida para las mallas de acero soldadas de alambres lisos.

Para las mallas fabricadas con alambres de menor diámetro, para alcanzar a desarrollar la totalidad de la tensión de fluencia de los alambres anclados generalmente alcanza con disponer un anclaje constituido como mínimo por dos alambres transversales con el alambre más próximo a una distancia de 2 in. o más de la sección crítica. Sin embargo, para las mallas fabricadas con alambres de mayor diámetro (en las cuales la separación libre es pequeña) los alambres necesitarán una mayor longitud embebida ℓ_d .

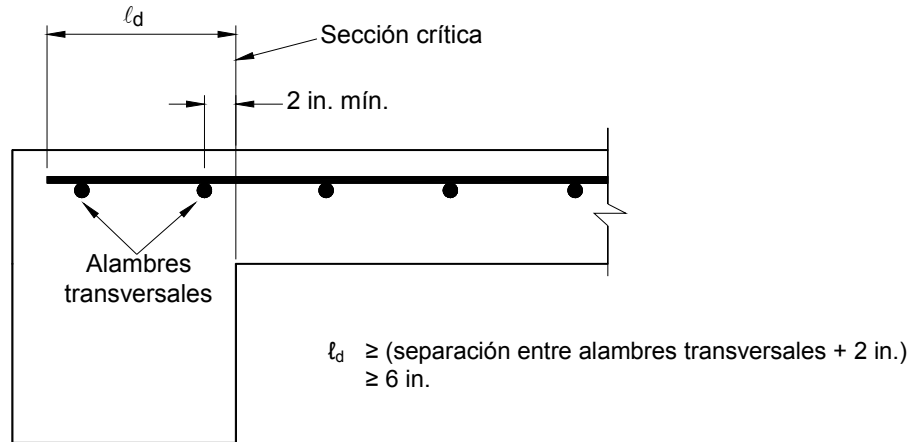


Figura 4-4 – Anclaje de las mallas de acero soldadas de alambres lisos

Por ejemplo, verifiquemos una malla 6×6 -W4 \times W4 con $f'_c = 3000$ psi y $f_y = 60.000$ psi utilizada en un hormigón de peso normal ($\lambda = 1,0$):

$$\begin{aligned}\ell_d &= 0,27 \times (A_w / s_w) \times (f_y / \sqrt{f'_c}) \times \lambda \\ &= 0,27 \times (0,04 / 6) \times (60.000 / \sqrt{3000}) \times 1,0 = 1,97 \text{ in.} \\ &< 6 \text{ in.} \\ &< (1 \text{ separación} + 2 \text{ in.}) \quad \text{Valor determinante}\end{aligned}$$

Embeber dos alambres transversales más 2 in. es satisfactorio (ver Figura 4-5).

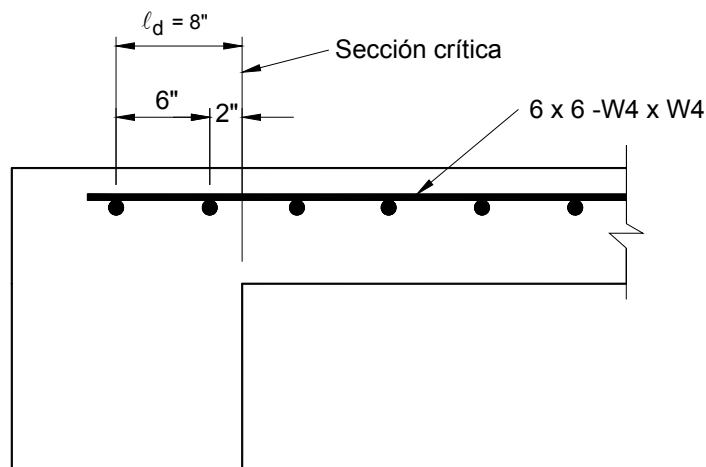


Figura 4-5 – Anclaje de una malla 6×6 -W4 \times W4

Verifiquemos una malla 6×6 -W20 \times W20:

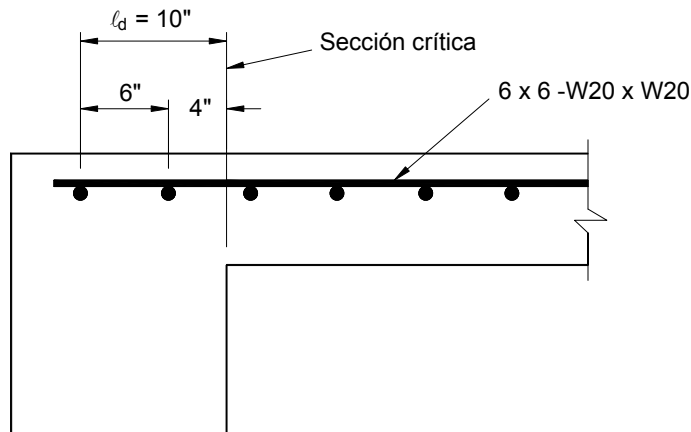
$$\ell_d = 0,27 \times (0,20/6) \times (60.000/\sqrt{3000}) \times 1,0 = 9,9 \text{ in.}$$

$$> 6 \text{ in.}$$

$$> (1 \text{ separación} + 2 \text{ in.})$$

Como se ilustra en la Figura 4-6, para anclar una malla de alambres W20, además de embeber 2 alambres y de las 2 in. requeridas, se deben embeber 2 in. adicionales. Si la separación longitudinal se reduce a 4 in. (malla 4×6 -W20 \times W20), para desarrollar la tensión de fluencia se requerirá como mínimo $\ell_d = 15$ in., es decir, 3 alambres transversales más una longitud de 3 in.

Las Referencias 4.4 y 4.5 contienen ayudas de diseño para las mallas de acero soldadas, incluyendo tablas para determinar la longitud de anclaje tanto para mallas de alambres lisos como para mallas de alambres conformados.



Nota: Si el ancho del apoyo no es suficiente para permitir el anclaje de los alambres rectos, la longitud de anclaje ℓ_d se puede doblar hacia abajo (en forma de gancho) dentro del apoyo.

Figura 4-6 – Anclaje de una malla 6×6 -W20 \times W20

12.9 ANCLAJE DE LOS CORDONES DE PRETENSADO

Los elementos de hormigón pueden ser pretensados o postesados. En las aplicaciones postesadas el anclaje de los cables se logra mediante anclajes mecánicos. Los cables de tesado pueden consistir en cordones, alambres o barras de alta resistencia.

En los elementos pretensados los cables típicamente consisten en cordones de siete alambres. El artículo 12.9.1 especifica que la longitud de anclaje ℓ_d (en pulgadas) de los cordones de pretensado se debe calcular usando la Ecuación (12-2), la cual anteriormente estaba en R12.9:

$$\ell_d = \left(\frac{f_{se}}{3} \right) d_b + (f_{ps} - f_{se}) d_b \quad \text{Ec. (12-2)}$$

donde:

f_{ps} = tensión en la armadura tesa cuando la sollicitación alcanza el valor de la resistencia nominal, ksi

f_{se} = tensión efectiva en la armadura tesa después que han ocurrido todas las pérdidas de pretensado, ksi

d_b = diámetro nominal del cordón de pretensado, in.

Las expresiones que aparecen entre paréntesis se deben utilizar como valores adimensionales.

El término $\left(\frac{f_{se}}{3}\right) d_b$ representa la longitud de transferencia del cordón (ℓ_t), es decir la longitud de cordón que se debe adherir al hormigón para desarrollar en el cordón una tensión igual a f_{se} . El segundo término, $(f_{ps} - f_{se}) d_b$, representa la longitud de adherencia para flexión, es decir la longitud adicional de cordón que se debe adherir de manera que cuando la solicitación alcance el valor de la resistencia nominal del elemento se pueda desarrollar en el cordón una tensión igual a f_{ps} .

Si la adherencia de uno o más cordones no se prolonga hasta el extremo del elemento, las secciones críticas pueden no coincidir con las secciones en las cuales se desarrollará la totalidad de la resistencia de diseño (ver 12.9.2). En estos casos puede ser necesario realizar un análisis más detallado. De manera similar, si hay cargas concentradas importantes actuando sobre la longitud de anclaje de los cordones, las secciones críticas pueden no coincidir con la sección en la cual se desarrollará la totalidad de la resistencia de diseño.

Observar que, si la adherencia del cordón no se prolonga hasta el extremo del elemento (cordones "desadheridos") el artículo 12.9.3 exige duplicar la longitud de anclaje especificada en el artículo 12.9.1 cuando en las consideraciones de diseño se incluyan tensiones de tracción para el estado de carga de servicio en la zona traccionada precomprimida.

Es posible que en algunas aplicaciones pretensadas la longitud total del elemento sea menor que dos veces la longitud de anclaje requerida. Esto suele ser el caso de los elementos de hormigón pretensado de muy corta longitud. En estos casos los cordones no serán capaces de desarrollar f_{ps} . La máxima tensión utilizable en los cordones cuya longitud embebida es menor que la longitud de anclaje se puede calcular como se ilustra en la Figura 4-7. Para la condición $\ell_t < \ell_x < \ell_d$ la máxima tensión en el cordón, f_{max} , a una distancia ℓ_x del extremo de una viga se puede determinar de la siguiente manera:

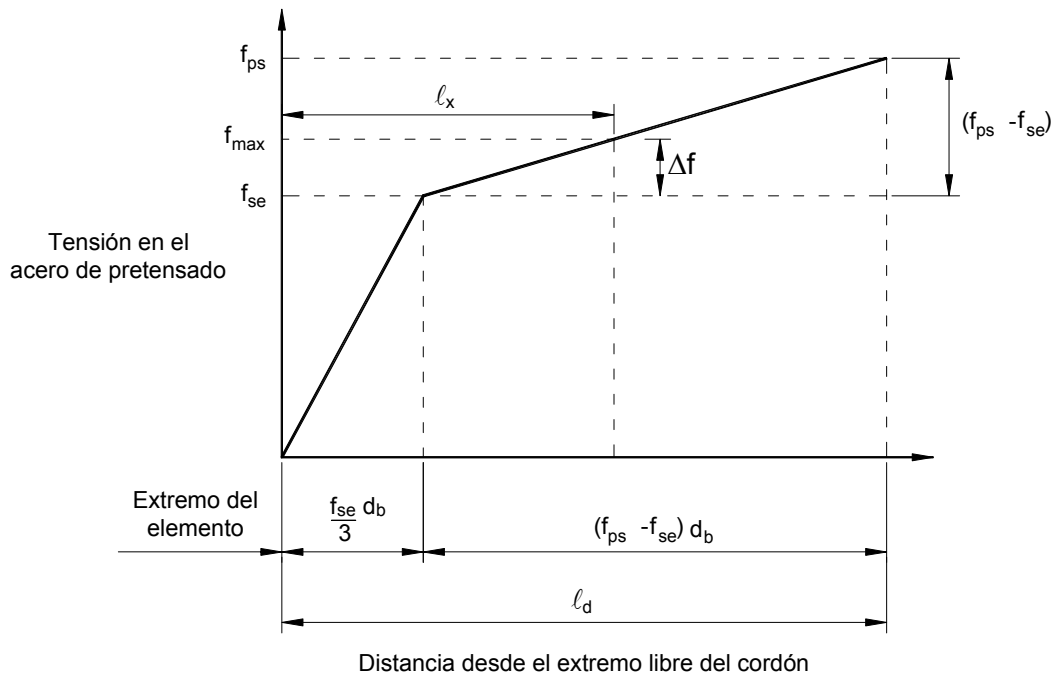


Figura 4-7 – Relación entre la tensión en el acero de pretensado y la distancia desde el extremo libre del cordón

$$\begin{aligned}
f_{\max} &= f_{se} + \Delta f \\
&= f_{se} + \frac{(f_{ps} - f_{se})}{(f_{ps} - f_{se})d_b} \left(\ell_x - \frac{f_{se}}{3} d_b \right) \\
&= f_{se} + \frac{\ell_x}{d_b} - \frac{f_{se}}{3}
\end{aligned}$$

Por lo tanto,

$$f_{\max} = \frac{\ell_x}{d_b} + \frac{2}{3} f_{se}$$

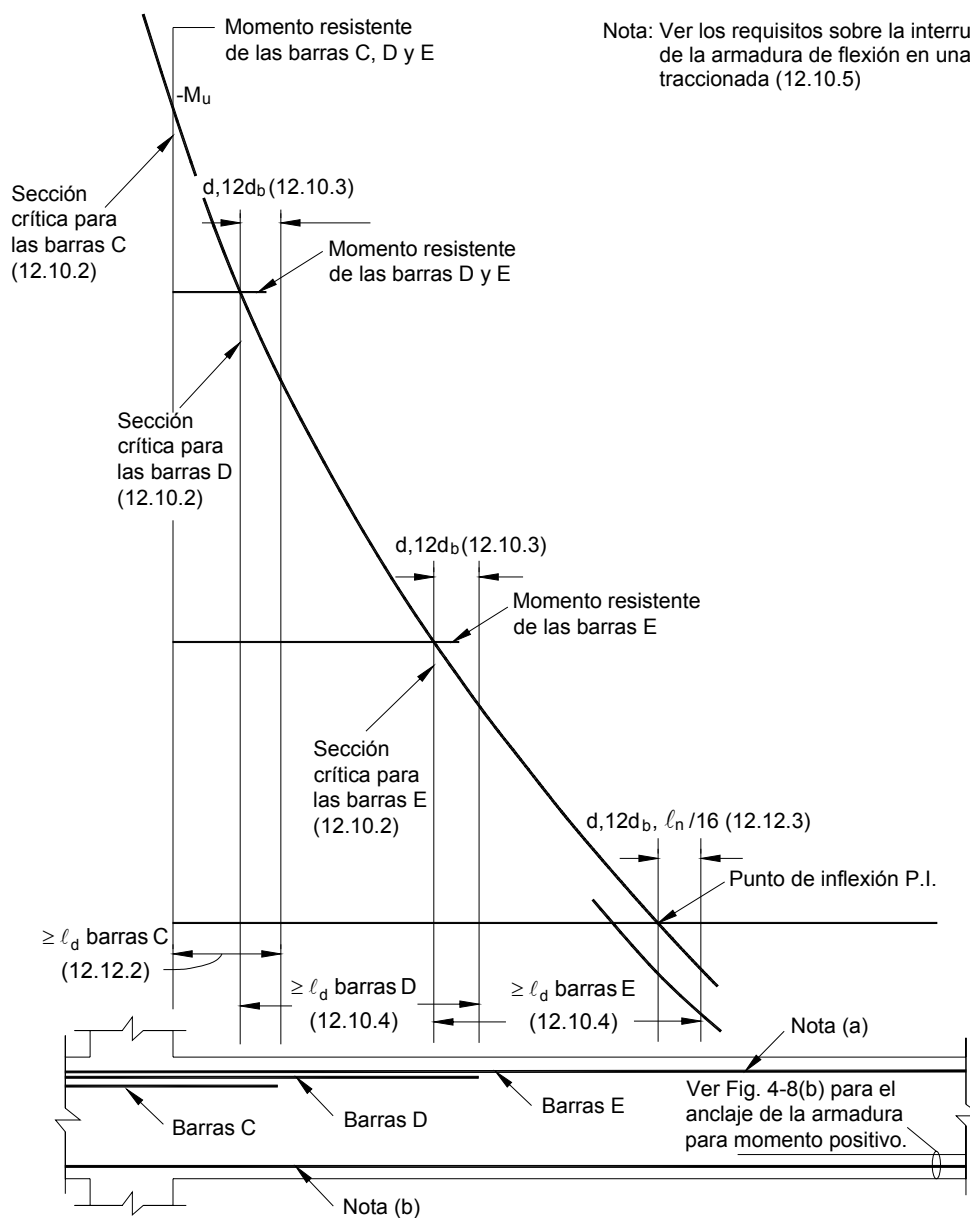
12.10 ANCLAJE DE LA ARMADURA DE FLEXIÓN – REQUISITOS GENERALES

La Sección 12.10 contiene requisitos básicos para determinar el anclaje de la armadura a partir de las secciones de tensión máxima o crítica. Las Figuras 4-8(a) y (b) ilustran las secciones críticas típicas y los requisitos de anclaje y terminación de la armadura de flexión especificados por el Código. Las secciones críticas para el anclaje de la armadura de los elementos solicitados a flexión son las secciones donde los momentos positivos y negativos son máximos (M_u^+ y M_u^-); para estas secciones se debe proveer una longitud de anclaje ℓ_d adecuada. También son secciones críticas las secciones donde se interrumpe o se dobla la armadura del elemento; la armadura continua debe tener una longitud de anclaje ℓ_d adecuada más allá de la sección a partir de la cual las barras dobladas o interrumpidas teóricamente ya no son necesarias para soportar flexión (ver 12.10.4). Observar también que las barras se deben prolongar más allá de la sección en la cual ya no son necesarias para resistir flexión de acuerdo con 12.10.3. El requisito de prolongar la armadura se incluye como una precaución en caso que se produzcan desplazamientos de los momentos máximos de los diagramas de momento debidos a la variación de las cargas, asentamiento de los apoyos y otros cambios imprevistos que puedan afectar los diagramas de momentos. Las longitudes de anclaje ℓ_d se determinan de acuerdo con la Sección 12.2.

Las Secciones 12.10.1 y 12.10.5 se refieren al anclaje de la armadura traccionada en una zona solicitada a compresión. Investigaciones realizadas han confirmado la necesidad de limitar la interrupción de la armadura en las zonas solicitadas a tracción, ya que cuando la armadura termina en las zonas traccionadas las fisuras por flexión tienden a abrirse en forma anticipada. Si tanto la tensión de corte en la zona donde se interrumpe la armadura como la tensión de tracción en las barras restantes se aproximan a sus respectivos valores límites, tienden a desarrollarse fisuras diagonales de tracción a partir de las fisuras de flexión. Para limitar las fisuras diagonales de tracción se debe satisfacer alguna de las tres alternativas indicadas en la Sección 12.10.5. El artículo 12.10.5.2 indica que se debe disponer un área de estribos cerrados mayor que el área requerida para corte y torsión. Los requisitos de la Sección 12.10.5 no se aplican a los empalmes de tracción.

La Sección 12.10.6 se aplica al anclaje de los extremos de la armadura traccionada de ciertos elementos especiales solicitados a flexión, como por ejemplo las ménsulas, los elementos de altura variable y otros elementos en los cuales la tensión en la armadura, f_s , no es directamente proporcional al momento.

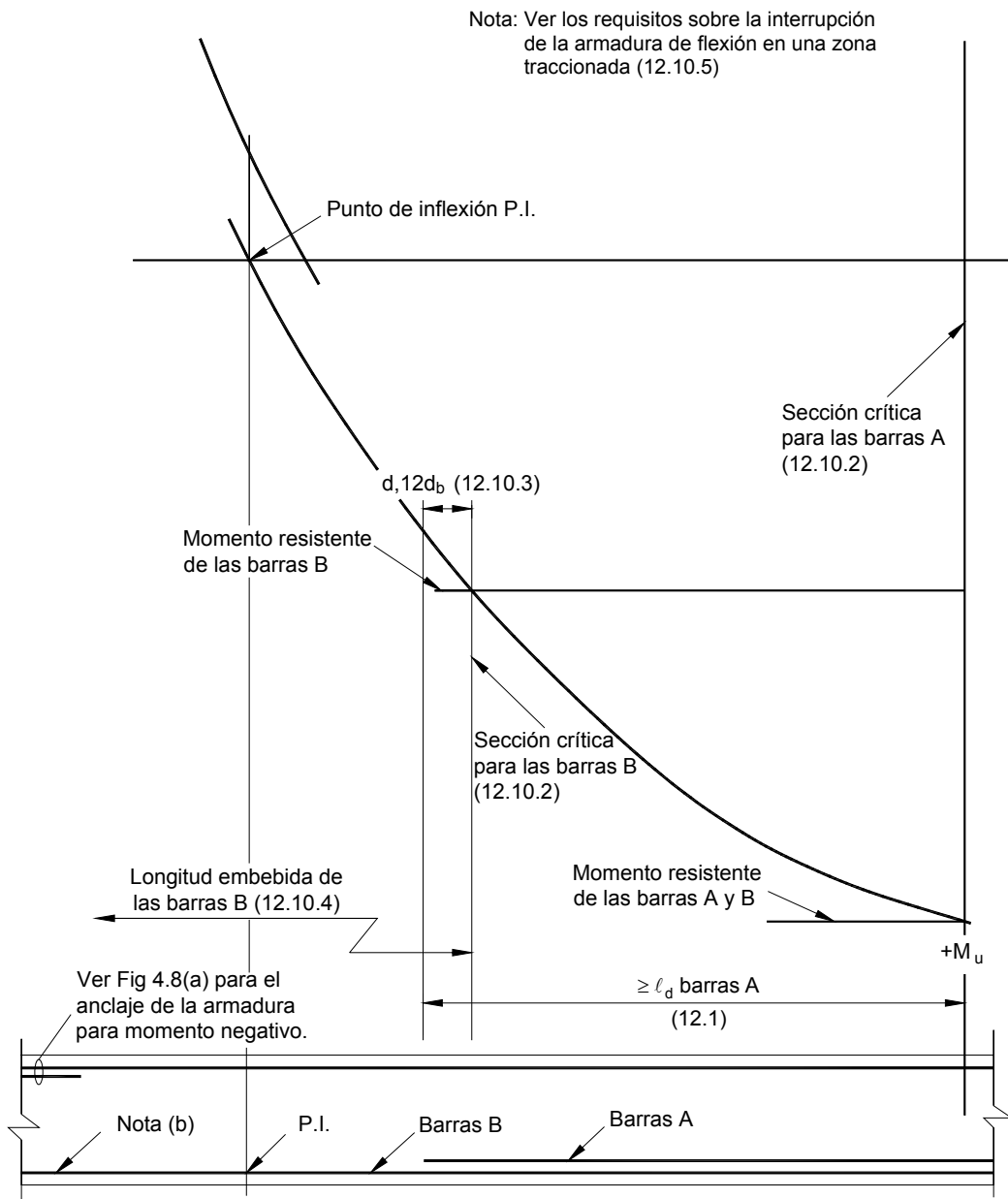
Para la ménsula ilustrada en la Figura 4-9, la longitud de anclaje ℓ_d en el interior del apoyo es probablemente menos crítica que la longitud de anclaje requerida. En estos casos la seguridad depende fundamentalmente del anclaje en el extremo cargado. Una barra transversal soldada, de igual diámetro, debería proporcionar un anclaje efectivo en el extremo. La disposición de un gancho extremo en el plano vertical puede no ser una solución efectiva, ya que el hormigón en la proximidad de las cartas aplicadas puede ser esencialmente hormigón simple y esto podría provocar una falla localizada. Si la ménsula es ancha y las cargas no se aplican cerca de las esquinas, las barras en forma de U en un plano horizontal proporcionan ganchos extremos efectivos, resolviendo satisfactoriamente el anclaje en el extremo libre.



Nota (a) Una parte de la armadura para momento negativo (A_s^-) debe ser continua (o estar empalmada mediante un empalme Clase A o un anclaje mecánico o soldado que satisfaga los requisitos de 12.14.3) en toda la longitud de las vigas perimetrales (7.13.2.2).

(a) Armadura para momento negativo

Figura 4-8 – Anclaje de la armadura de flexión



Nota (b) Una parte de la armadura para momento positivo (A_s^+) debe ser continua (o estar empalmada mediante un empalme Clase A o un anclaje mecánico o soldado que satisfaga los requisitos de 12.14.3) en toda la longitud de las vigas perimetrales y de las vigas que no tienen estribos cerrados (7.13.2.2). Ver también el artículo 7.13.2.4.

(b) Armadura para momento positivo

Figura 4-8 – Anclaje de la armadura de flexión

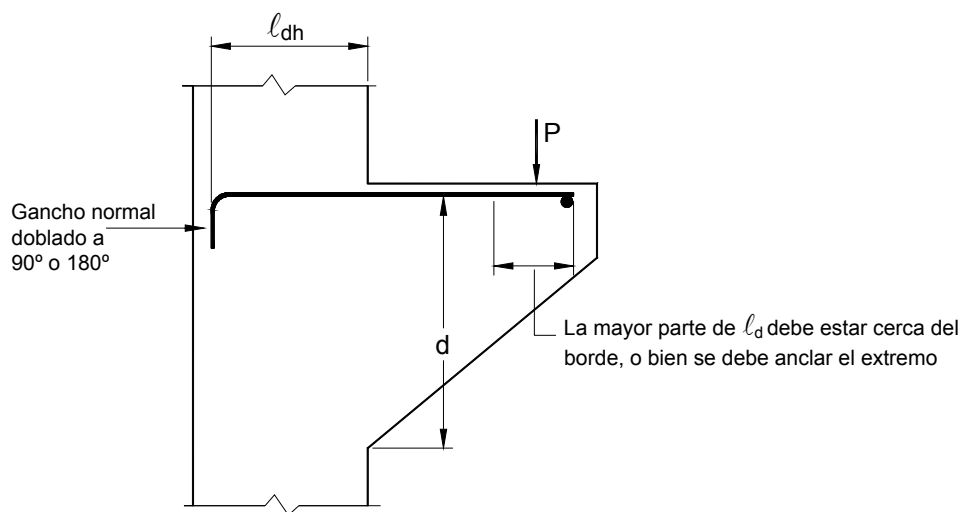


Figura 4-9 – Elementos especiales que dependen fundamentalmente del anclaje

12.11 ANCLAJE DE LA ARMADURA PARA MOMENTO POSITIVO

Como una precaución adicional para en caso que por alguna causa se desplacen los momentos máximos de los diagramas de momento, el artículo 12.11.1 requiere que una cantidad específica de la armadura total para momento positivo se prolongue a lo largo del elemento hasta el apoyo, y además especifica que en las vigas esta parte de la armadura total se debe prolongar dentro del apoyo una distancia mayor o igual que 6 in. La fracción de la armadura total para momento positivo que se debe prolongar es de un tercio en el caso de los elementos simplemente apoyados y de un cuarto en el caso de los elementos continuos. Por ejemplo, en la Figura 4-8(b) el área de las barras "B" debería ser como mínimo igual a un cuarto de la armadura requerida en la sección de máximo momento positivo M_u^+ .

La intención del artículo 12.11.2 es asegurar una respuesta dúctil de la estructura en caso que se presenten solicitaciones no previstas como las provocadas por vientos extraordinariamente fuertes o por un sismo. En los elementos que forman parte del sistema que resiste las cargas laterales, prolongando una parte de la armadura y anclándola adecuadamente en el apoyo se protege a la estructura en caso que estas cargas extraordinarias provoquen la inversión de los momentos. La armadura para momento positivo se debe anclar de manera tal que en la cara interna del apoyo se desarrolle la totalidad de la tensión de fluencia. Este requisito exige que en los elementos que forman parte del sistema que resiste las cargas laterales las barras inferiores estén yuxtapuestas en los apoyos interiores o que tengan ganchos en los apoyos exteriores. El requisito de desarrollar la totalidad de la tensión de fluencia no se aplica al exceso de armadura provisto en los apoyos.

El artículo 12.11.3 limita el diámetro de las barras usadas como armadura para momento positivo en los extremos simplemente apoyados y en las secciones de momento nulo (puntos de inflexión). De este modo se limita la tensión de adherencia en las áreas donde el momento es pequeño y el corte es elevado. Esta condición podría existir en una viga corta fuertemente cargada, en la cual habría que anclar barras de gran diámetro en una distancia relativamente corta. Las barras se deben limitar a un diámetro tal que la longitud de anclaje ℓ_d calculada para f_y de acuerdo con la Sección 12.2 sea menor o igual que $(M_n/V_u) + \ell_a$ (12.11.3). No es necesario verificar esta expresión cuando la armadura termina más allá del eje de un apoyo simple, mediante un gancho normal o mediante un anclaje mecánico. Los anclajes mecánicos deben ser equivalentes a los ganchos normales.

La longitud (M_n/V_u) corresponde a la longitud de anclaje de la armadura de mayor diámetro obtenida mediante la expresión indicada en el párrafo anterior. La longitud (M_n/V_u) se puede incrementar un 30 por ciento si los extremos de la armadura están confinados por una reacción de compresión, como cuando hay una columna ubicada debajo del elemento, pero no cuando una viga concurre a otra viga.

Para la viga simplemente apoyada ilustrada en la Figura 4-10, la máxima ℓ_d admisible para las barras "a" es igual a $(1,3M_n/V_u + \ell_a)$. Esto limita el diámetro de la armadura para satisfacer el requisito de adherencia por flexión. Aún cuando la longitud de anclaje total a partir de la sección crítica para las barras "a" es mayor que $(1,3M_n/V_u + \ell_a)$, es necesario limitar el diámetro de las barras "a" de manera que se verifique $\ell_d \leq 1,3M_n/V_u + \ell_a$. Observar que M_n es el momento resistente nominal de la sección transversal (sin el factor ϕ). Como se mencionó anteriormente, se pueden utilizar barras de mayor diámetro si se utilizan ganchos normales o anclajes mecánicos en el extremo de la barra dentro del apoyo. En los puntos de inflexión (ver Figura 4-11) la armadura para momento positivo debe tener una longitud de anclaje ℓ_d determinada de acuerdo con la Sección 12.2, la cual no debe ser mayor que $(M_n/V_u + \ell_a)$, siendo ℓ_a menor o igual que d ó $12d_b$, cualquiera sea el valor que resulte mayor.

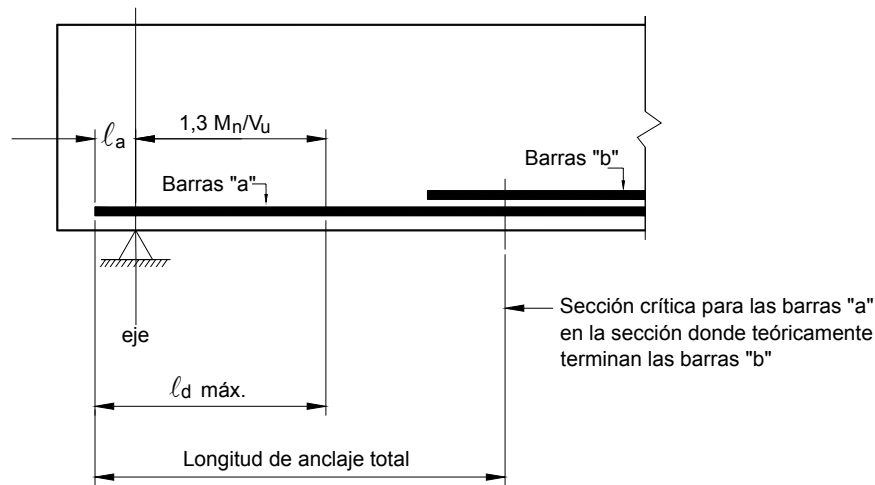


Figura 4-10 – Longitud de anclaje requerida en un extremo simplemente apoyado (barras rectas)

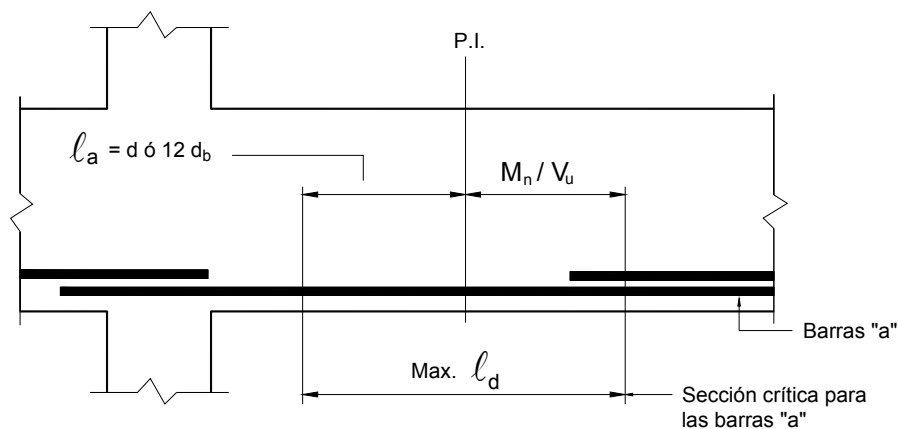
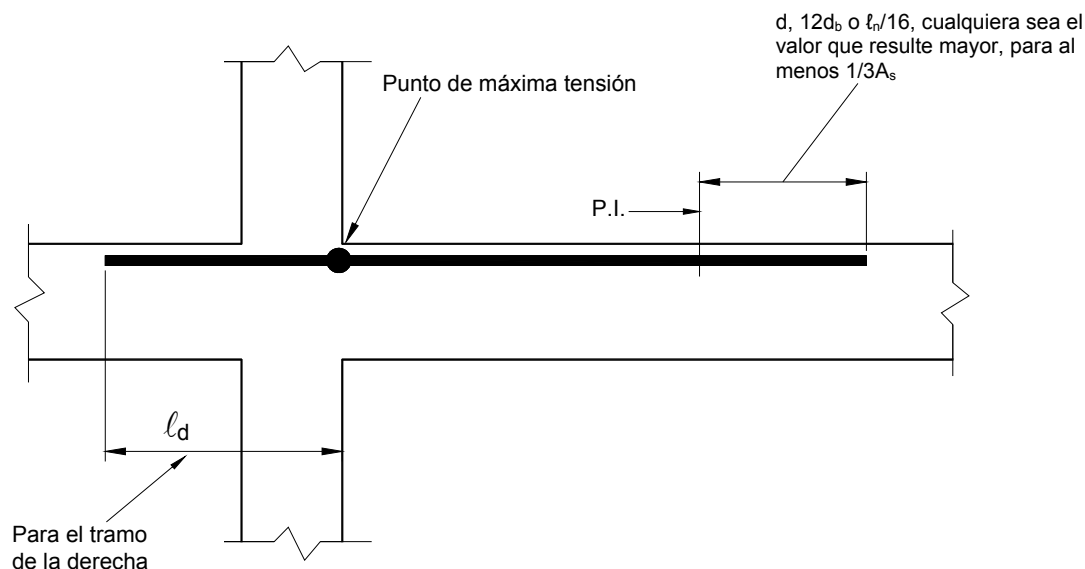


Figura 4-11 – Criterio para determinar el tamaño máximo de las barras "a" en el punto de inflexión (12.11.3)

Los artículos 12.11.4 y 12.12.4 se refieren al anclaje de la armadura para momento positivo y negativo en los elementos de gran altura solicitados a flexión. Los requisitos establecen que, en los extremos simplemente apoyados de las vigas de gran altura solicitadas a flexión, la armadura para momento positivo traccionada se debe anclar de manera tal que en la cara del apoyo se desarrolle la tensión de fluencia especificada, f_y . Sin embargo, si la viga se diseña utilizando el método de las bielas y tirantes del Apéndice A, esta armadura se debe anclar de acuerdo con el artículo A.4.3. En los apoyos interiores de las vigas de gran altura solicitadas a flexión, tanto la armadura para momento positivo como la armadura para momento negativo se deben continuar o empalmar con la de los tramos adyacentes.

12.12 ANCLAJE DE LA ARMADURA PARA MOMENTO NEGATIVO

Los requisitos del artículo 12.12.3 tienen en cuenta los posibles corrimientos o desplazamientos del diagrama de momentos en los puntos de inflexión. Como mínimo un tercio de la armadura para momento negativo provista en un apoyo se debe prolongar más allá del punto de inflexión, a lo largo del elemento, hasta el apoyo. La longitud embebida debe igual a la profundidad efectiva del elemento d , $12d_b$, ó $l_n/16$ de la luz libre del tramo, como se ilustra en las Figuras 4-8 y 4-12. El área de las barras "E" de la Figura 4-8(a) debe ser mayor o igual que un tercio del área de la armadura provista para $-M_u$ en la cara del apoyo. El anclaje de la armadura superior traccionada más allá de los apoyos interiores de un elemento continuo generalmente se utiliza como parte de la armadura superior del tramo adyacente, tal como se ilustra en la Figura 4-12.



(Generalmente estos anclajes forman parte de la armadura de la viga adyacente)

Figura 4-12 – Anclaje en una viga adyacente

Los ganchos normales constituyen una manera efectiva de anclar las barras superiores traccionadas en los apoyos interiores, como se ilustra en la Figura 4-13. Los requisitos para el anclaje de los ganchos normales ya fueron discutidos en la Sección 12.5.

12.13 ANCLAJE DE LA ARMADURA DEL ALMA

Los estribos se deben anclar correctamente de manera que la totalidad de la resistencia a la tracción del estribo se pueda desarrollar en el plano medio del elemento o cerca del plano medio del elemento. Para que puedan funcionar correctamente, los estribos se deben disponer tan cerca de las caras de compresión y tracción del elemento como lo permitan las exigencias de recubrimiento y la proximidad de otras armaduras (12.13.1). También es importante anclar los estribos tan cerca de la cara comprimida del elemento como sea posible, ya que en la cara traccionada se inician fisuras de tracción por flexión que se extienden hacia la zona comprimida del elemento a medida que el elemento se aproxima a su carga última.

Los detalles de anclaje de los estribos del Código ACI son el resultado de una evolución gradual, y se basan fundamentalmente en experiencias anteriores y ensayos realizados en laboratorio. Las barras No. 5 y menores se deben anclar mediante un gancho normal (doblado a 90 grados más una prolongación de $6d_b$ en el extremo libre de la barra)* alrededor de una barra longitudinal (12.13.2.1). El mismo detalle de anclaje se permite para las barras No. 6, No. 7 y No. 8, siempre que se trate de acero Grado 40. Observar que cuando las barras tienen mayores diámetros los ganchos doblados a 90 grados requieren una prolongación de $12d_b$ en el extremo libre de las barras (7.1.3(b)). La Figura 4-14 ilustra los requisitos de anclaje para los estribos en U fabricados de barras o alambres conformados.

* En la estructuras ubicadas en regiones de peligrosidad sísmica elevada, los estribos cerrados se deben anclar mediante un gancho doblado a 135 grados más una prolongación de $6d_b$ (pero nunca menor que 3 in.). Ver la definición de gancho sismorresistente en la Sección 21.1.

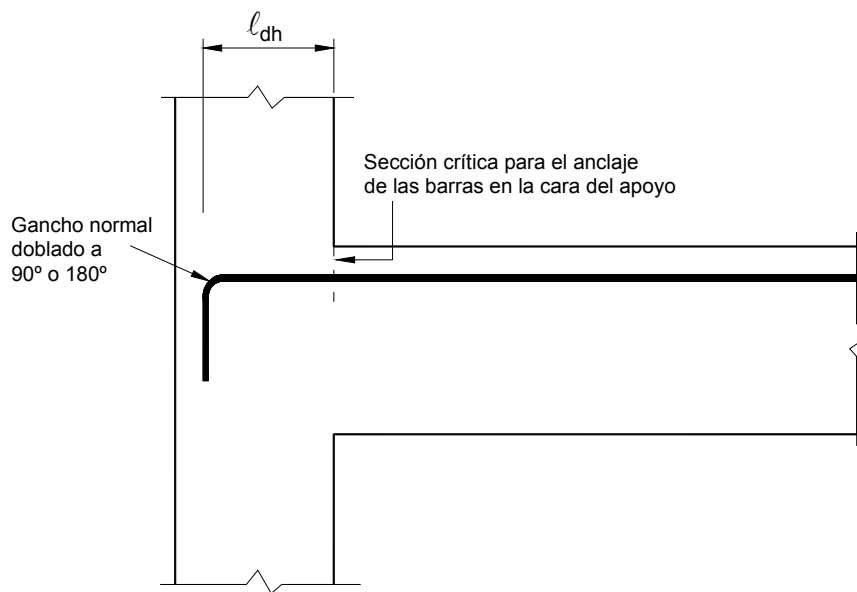


Figura 4-13 – Anclaje en un apoyo exterior mediante un gancho normal

Para las barras de mayor diámetro (No. 6, No. 7 o No. 8) de acero Grado 60, además del gancho normal es necesario disponer una longitud embebida de $0,014 d_b f_y / \sqrt{f'_c}$ entre la altura media del elemento y el extremo exterior del gancho. Se debe verificar la longitud embebida disponible, designada ℓ_t , para asegurar que el anclaje sea adecuado (ver 12.13.2.2). La longitud embebida se ilustra en la Figura 4-14, y sus valores se dan en la Tabla 4-5. La Tabla 4-6 indica la altura mínima de un elemento requerida para utilizar estribos No. 6, No. 7 o No. 8 fabricados de acero Grado 60. En las vigas de dimensiones habituales en las cuales la magnitud de las cargas requiere utilizar para la armadura de corte barras No. 6, No. 7 o No. 8, generalmente es fácil satisfacer la longitud embebida requerida y, para asegurar el correcto anclaje de los extremos, el diseñador sólo se debe preocupar de colocar un gancho normal de estribo alrededor de una barra longitudinal.

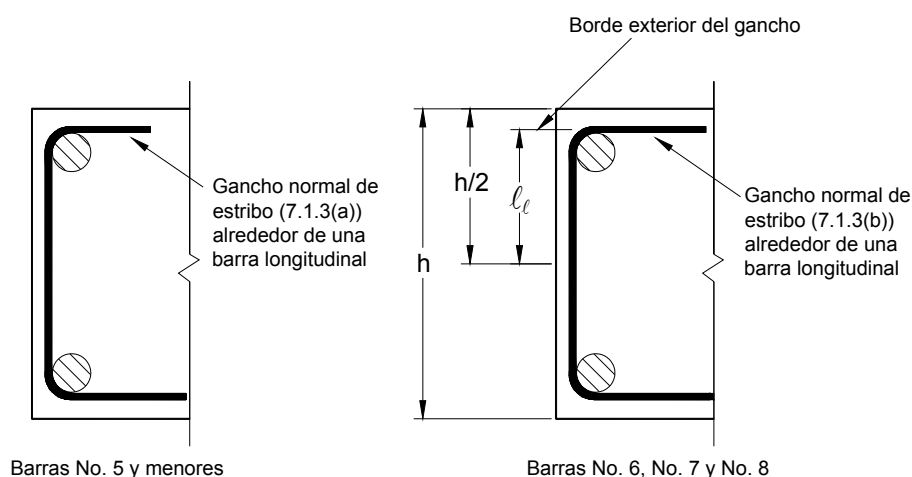


Figura 4-14 – Detalles de anclaje para los estribos en U (barras y alambres conformados)

Los requisitos del artículo 12.13.2.3 referidos al uso de mallas de acero soldadas de alambres lisos como estribos en U se ilustran en la Figura 4-15. Los requisitos para el anclaje de los estribos de una rama realizados con una malla de acero

soldada de alambre liso o conformado se ilustran en la Figura 4-16. El anclaje es proporcionado fundamentalmente por los alambres longitudinales. En la actualidad el uso de mallas de alambre soldadas como armadura de corte se ha popularizado en la industria del hormigón prefabricado pretensado.

Tabla 4-5 – Longitud embebida l_e para los estribos de acero Grado 60, in.

Tamaño de las barras No.	Resistencia a la compresión del hormigón, f'_c , psi					
	3000	4000	5000	6000	8000	10.000
6	11,5	10,0	8,9	8,1	7,0	6,3
7	13,4	11,6	10,4	9,5	8,2	7,4
8	15,3	13,3	11,9	10,8	9,4	8,4

Tabla 4-6 – Altura mínima de un elemento requerida para utilizar estribos No. 6, No. 7 o No. 8 fabricados de acero Grado 60, in.

Recubrimiento libre hasta el estribo (in.)	Tamaño de las barras No.	Resistencia a la compresión del hormigón, f'_c , psi					
		3000	4000	5000	6000	8000	10.000
1-1/2	6	26	23	21	20	17	16
	7	30	27	24	22	20	18
	8	34	30	27	25	22	20
2	6	27	24	22	21	18	17
	7	31	28	25	23	21	19
	8	35	31	28	26	23	21

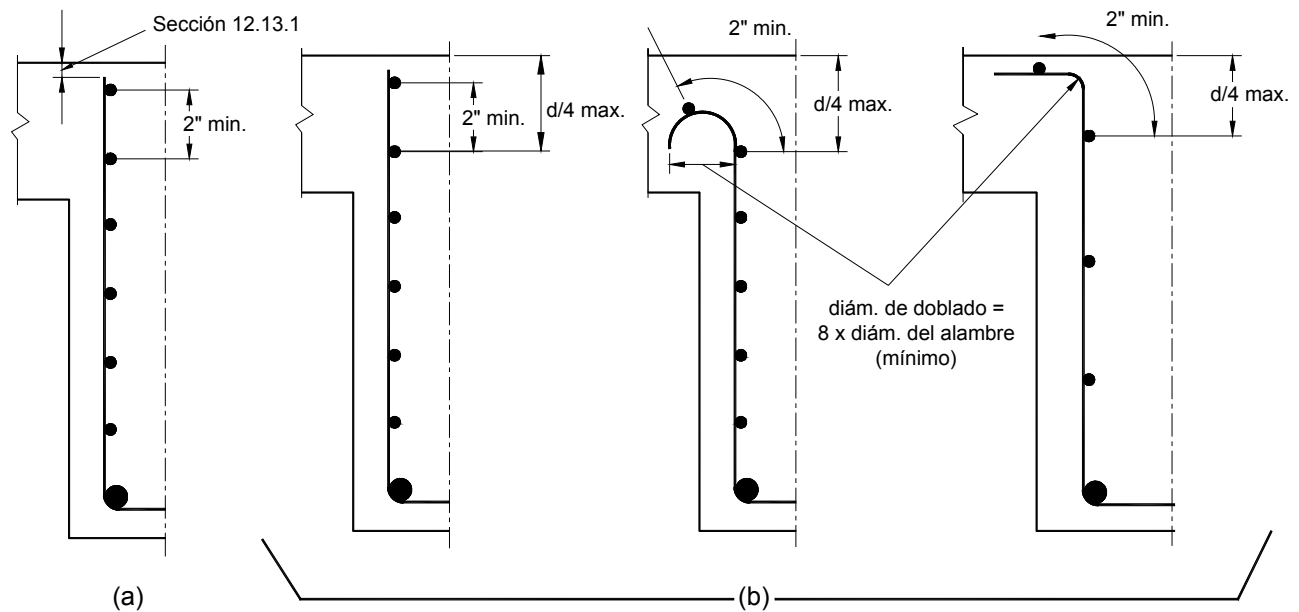


Figura 4-15 – Detalles de anclaje para estribos en U realizados con mallas de acero soldadas de alambres lisos (12.13.2.3)

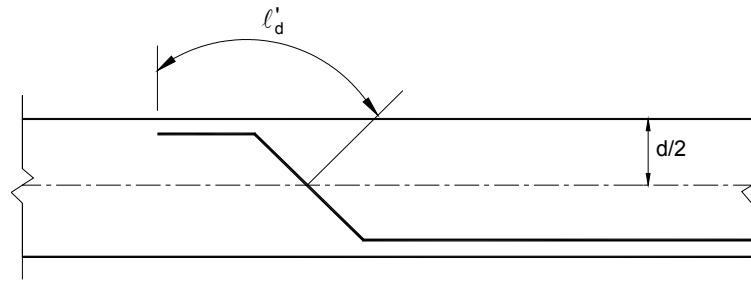


Figura 4-17– Anclaje de las barras longitudinales dobladas

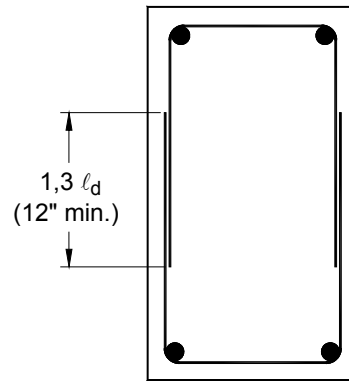
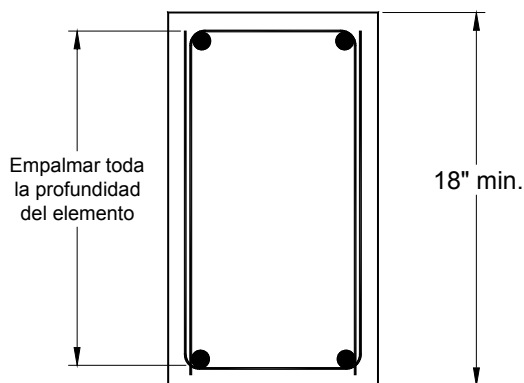


Figura 4-18 – Empalme de dos estribos en U para formar una unidad cerrada

Alternativamente, si la altura de un elemento no permite un empalme por yuxtaposición de $1,3\ell_d$ de longitud, siempre que la profundidad del elemento sea mayor o igual que 18 in., se pueden usar estribos en U dobles si se satisfacen las siguientes condiciones: (a) cada una de las ramas se extiende en la totalidad de la altura disponible del elemento y (b) la fuerza en cada rama no es mayor que 9000 lb ($A_b f_y \leq 9000$ lb; ver Figura 4-19).



No. 3: $0,11 (40.000) = 4400$ lb
 No. 4: $0,20 (40.000) = 8000$ lb
 No. 5: $0,31 (40.000) = 12.400$ lb

No. 3: $0,11 (60.000) = 6600$ lb
 No. 4: $0,20 (60.000) = 12.000$ lb

Si los estribos se diseñan para la totalidad de la tensión de fluencia, f_y , solamente los estribos No. 3 y No. 4 de acero Grado 40 y los estribos No. 3 de Grado 60 satisfacen la limitación de las 9000 lb.

Figura 4-19 – Alternativa para el empalme de dos estribos en U

12.14 EMPALMES DE LA ARMADURA – REQUISITOS GENERALES

El Código especifica que los empalmes de la armadura sólo se pueden realizar cuando en la documentación de la obra están detallados clara y exhaustivamente. Los planos de obra, planillas de armadura y especificaciones técnicas deben mostrar o describir todas las ubicaciones de los empalmes, los tipos de empalmes permitidos o requeridos y, para el caso de los empalmes por yuxtaposición, la longitud de empalme requerida. El ingeniero no puede simplemente especificar que todos los empalmes deben satisfacer los requisitos del Código ACI 318. Esto se debe a que existe una gran cantidad de factores que afectan los empalmes de las armaduras. Algunos de los factores que afectan los empalmes yuxtapuestos de barras conformadas solicitados a tracción son:

- el tamaño de las barras
- la tensión de fluencia de las barras
- la resistencia a la compresión del hormigón
- la ubicación de las barras (barras superiores u otras barras)
- el uso de hormigón de peso normal u hormigón de agregados livianos
- la separación y el recubrimiento de las barras empalmadas
- la presencia de armadura transversal de confinamiento
- el uso de revestimiento epoxi
- el número de barras empalmada en una sección.

Es virtualmente imposible que la persona a cargo de fabricar las armaduras sepa qué tipo de empalme se requiere en una ubicación determinada, a menos que el ingeniero ilustre o defina explícitamente los requisitos del anclaje. El artículo 12.14.1 dice: "Los empalmes de la armadura sólo se pueden realizar según lo requerido o permitido en los planos de diseño, o en las especificaciones técnicas, o cuando el ingeniero los autorice en forma expresa."

Como material de referencia para el correcto empalme de la armadura se sugieren dos publicaciones muy utilizadas por la industria. La Referencia 4.4 contiene información útil cuando se utilizan mallas de acero soldadas, incluyendo tablas que listan las longitudes de anclaje y empalme tanto para mallas de alambres lisos como para mallas de alambres conformados. La Referencia 4.5 presenta las prácticas aceptadas para empalmar la armadura, describe el uso de empalmes por yuxtaposición, mecánicos y soldados, e incluye datos para una determinación simplificada de las longitudes de los empalmes por yuxtaposición.

12.4.2 Empalmes por yuxtaposición

No se permite utilizar empalmes por yuxtaposición para barras mayores que la No. 11 solicitadas a tracción o compresión, salvo que:

- Las barras No. 14 y No. 18 solicitadas a compresión solamente se pueden empalmar por yuxtaposición con barras No. 11 o menores (12.16.2), y
- Las barras No. 14 y No. 18 solicitadas a compresión solamente se pueden empalmar por yuxtaposición con barras en espera de menor diámetro en zapatas o cabezales (15.8.2.3).

El artículo 12.14.2.2 especifica los requisitos para empalmar por yuxtaposición las barras que forman un paquete de barras (solicitado a tracción o compresión). Las longitudes de empalme por yuxtaposición requeridas para las barras individuales que componen un paquete se deben incrementar un 20 por ciento y un 33 por ciento, respectivamente, para los atados de tres y cuatro barras. No se permite empalmar en una misma sección las barras individuales que forman un paquete de barras. No se permite empalmar por yuxtaposición dos paquetes de barras como si se tratara de dos barras individuales.

Las barras de los elementos solicitados a flexión se pueden empalmar mediante empalmes por yuxtaposición en los cuales las barras no están en contacto entre sí. Cuando en un empalme las barras están demasiado separadas entre sí se origina en ese espacio una sección no armada; por este motivo el artículo 12.14.2.3 limita la máxima distancia entre las barras a un quinto de la longitud de empalme requerida o 6 in., cualquiera sea el valor que resulte menor. Se prefieren los empalmes en los cuales las barras están en contacto entre sí, ya que en este caso las barras son más fáciles de asegurar para evitar que se desplacen durante la colocación del hormigón.

12.14.3 Empalmes mecánicos y soldados

La Sección 12.4.3 permite el uso de empalmes mecánicos o empalmes soldados. Los empalmes totalmente mecánicos deben anclar, en tracción o compresión, como mínimo 125 por ciento de la tensión de fluencia especificada de la barra (12.14.3.2). Los empalmes totalmente soldados deben anclar en tracción como mínimo 125 por ciento de la tensión de fluencia especificada de la barra (12.14.3.4). La norma ANSI/AWS D1.4 permite soldaduras indirectas cuando las barras no están a tope. Observar que ANSI/AWS D1.4 indica que, siempre que sea posible, para las barras No. 7 y mayores se prefieren los empalmes a tope directos. Los anclajes mecánicos o soldados que anclan menos de 125 por ciento de la tensión de fluencia especificada de la barra se limita a las barras No. 5 y menores (12.14.3.5) ubicadas en regiones en las cuales las tensiones calculadas son bajas. Los anclajes mecánicos y soldados que no satisfacen los requisitos de los artículos 12.14.3.2 y 12.14.3.4 se limita a las barras No. 5 y menores debido a la naturaleza potencialmente frágil de estas soldaduras.

El artículo 12.14.3.3 especifica que todas las soldaduras de la armadura deben satisfacer los requisitos de ANSI/AWS D1.4 (*Structural Welding Code - Reinforcing Steel*). La Sección 3.5.2 exige que la armadura a soldar debe estar especificada en los planos, y que también se debe especificar el procedimiento de soldadura. Para poder satisfacer estos requisitos del Código correctamente, se recomienda que el ingeniero esté familiarizado con los requisitos de ANSI/AWS D1.4 y con los requisitos de las especificaciones ASTM para barras de armadura.

Las especificaciones ASTM A 615 y A 617 no se ocupan de la soldabilidad del acero. Estas especificaciones no establecen límites para los elementos químicos que pueden afectar la soldabilidad del acero. Un parámetro fundamental de ANSI/AWS D1.4 es el carbono equivalente. Las temperaturas mínimas de precalentamiento especificadas en ANSI/AWS D1.4 se basan en el carbono equivalente y en el tamaño de las barras. Por este motivo, de acuerdo con lo especificado en 3.5.2 y R3.5.2, cuando es necesario soldar la armadura las especificaciones ASTM A 615, A 616 y A 617 se deben suplementar exigiendo un informe de la composición química de las barras, para poder asegurar que el procedimiento de soldadura especificado sea compatible con las mismas.

Las barras de acero ASTM A 706 son aptas para las soldaduras. La especificación ASTM A 706 contiene límites para los diferentes componentes químicos, incluyendo el carbono, y limita el carbono equivalente a 0,55 por ciento. La composición química y el carbono equivalente deben ser informados. Al limitar el carbono equivalente a 0,55 por ciento, ANSI/AWS D1.4 requiere un nivel de precalentamiento bajo o nulo. Por lo tanto, no será necesario que el ingeniero suplemente la especificación ASTM A 706 cuando se han de soldar las barras. Sin embargo, antes de especificar barras de acero ASTM A 706 se debería investigar su disponibilidad en el mercado local.

La Referencia 4.5 presenta una discusión detallada de los empalmes soldados. También discute otros requisitos importantes, tales como la inspección en obra, la supervisión de los procedimientos de soldadura y el control de calidad de los empalmes soldados.

ANSI/AWS D1.4 solamente se ocupa de la soldadura de las barras. Las soldaduras entre alambres, o las soldaduras entre un alambre o una malla soldada de alambres y una barra de armadura u otro elemento de acero estructural, deben satisfacer los requisitos aplicables de ANSI/AWS D1.4 y los requisitos suplementarios especificados por el ingeniero. Además, el ingeniero debe saber que existe la posibilidad de que un alambre de bajo contenido de carbono estirado en frío pierda tensión de fluencia y ductilidad si el alambre se suelda aplicando un procedimiento diferente a la soldadura de resistencia controlada utilizado para fabricar las mallas de acero soldadas.

En la discusión de la Sección 7.5 incluida en el Capítulo 3 de este documento se observó que se prohíbe utilizar soldaduras como método de fijación de las barras de armadura que se cruzan (soldaduras de punto) a menos que el ingeniero lo autorice específicamente. Un ejemplo de soldaduras de punto sería el de una jaula de armadura para una columna en la cual los estribos se fijan a las barras longitudinales mediante pequeñas soldaduras eléctricas. Este tipo de soldadura puede provocar un defecto en las barras longitudinales, y consecuentemente afectar la resistencia de las barras. Las soldaduras de punto parecen ser particularmente perjudiciales para la ductilidad (resistencia al impacto) y para la resistencia a la fatiga. La Referencia 4.5 recomienda: "Nunca permitir soldar las barras transversales en obra (soldaduras de punto, etc.). Siempre es mejor atar las barras con alambre, ya que esto no producirá daños."

12.15 EMPALMES DE LAS BARRAS Y ALAMBRES CONFORMADOS SOLICITADOS A TRACCIÓN

Los empalmes por yuxtaposición de las barras y alambres conformados solicitados a tracción se clasifican como Clase A o Clase B, y su longitud del empalme por yuxtaposición es un múltiplo de la longitud de anclaje en tracción, ℓ_d . La intención de la clasificación de los empalmes en dos categorías (Clases A y B) es alentar a los diseñadores a empalmar las barras en los puntos donde la tensión es mínima y a no empalmar varias barras en una misma sección, para así mejorar el comportamiento de los detalles críticos.

La longitud de anclaje ℓ_d (12.2) utilizada para calcular la longitud de empalme debe ser la correspondiente a la totalidad de f_y , ya que las clasificaciones de los empalmes ya reflejan cualquier exceso de armadura en la sección donde se realiza el empalme (no se debe aplicar el factor por exceso de armadura especificado en el artículo 12.2.5). La mínima longitud de empalme permitida es de 12 in.

Para los empalmes por yuxtaposición de la armadura de losas y tabiques, la separación libre efectiva entre las barras que se empalman en una misma sección se toma como la separación libre entre las barras empalmadas (R12.15.1). Este criterio para determinar la separación libre se ilustra en la Figura 4-20(a). La separación para los empalmes por yuxtaposición sin contacto entre las barras (separación entre las barras yuxtapuestas menor o igual que $(1/5)$ de la longitud yuxtapuesta ó 6 in.) se debe considerar igual que para los empalmes por yuxtaposición con contacto entre las barras. Para los empalmes por yuxtaposición de las barras de una columna o viga, la separación libre efectiva entre las barras que se empalman dependerá de la orientación de las barras empalmadas; ver las Figuras 4-20(b) y (c), respectivamente.

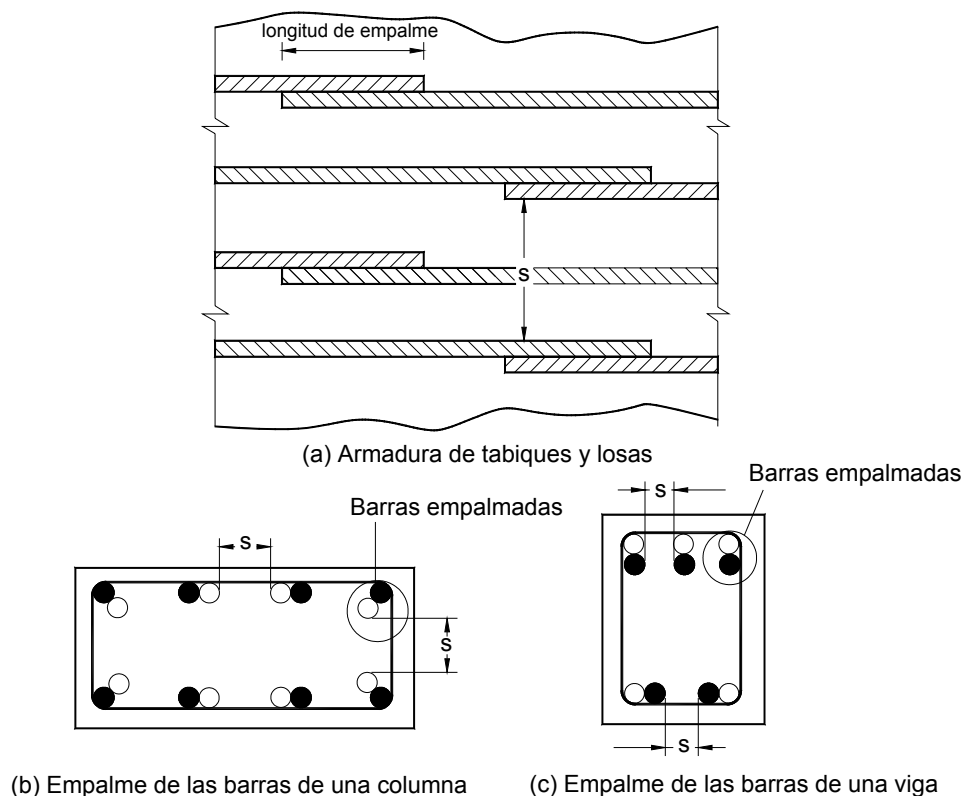


Figura 4-20 – Separación libre efectiva de las barras empalmadas

El diseñador debe especificar la clase de empalme de tracción a utilizar. La clase de empalme depende de la magnitud de la tensión de tracción en la armadura y del porcentaje de la armadura total que se ha de empalmar por yuxtaposición en una determinada longitud de empalme, tal como se indica en la Tabla 4-7. Si el área de la armadura de tracción provista en la ubicación del empalme es mayor que dos veces el área requerida por resistencia (baja tensión de tracción) y si está empalmada la mitad o menos de la armadura total dentro de la longitud de empalme requerida, se permite utilizar un empalme Clase A. Observar que estas dos condiciones se deben satisfacer simultáneamente; si no se satisfacen se deberán

especificar empalmes Clase B. En otras palabras, si el área de la armadura provista en la ubicación del empalme es menor que dos veces el área requerida por resistencia (elevada tensión de tracción) y/o si está empalmada más de la mitad de la armadura total dentro de la longitud de empalme requerida, obligatoriamente se deben utilizar empalmes Clase B.

Tabla 4-7 – Condiciones en un empalme de tracción (en la ubicación del empalme)

CLASE A... $1,0\ell_d$	CLASE B... $1,3\ell_d$
$(A_s \text{ provista}) \geq 2 (A_s \text{ requerida})$ y porcentaje de A_s empalmada ≤ 50	Todas las demás condiciones

En lugar de empalmes de tracción por yuxtaposición se pueden utilizar empalmes mecánicos o soldados que satisfagan los requisitos especificados en 12.14.3. El artículo R12.15.3 aclara que no es necesario que estos empalmes estén escalonados, aunque es aconsejable disponer un escalonamiento si el área de la armadura provista es menor que el doble de la requerida por cálculo.

La Sección 12.15.4 enfatiza que el uso de empalmes mecánicos o soldados que no satisfagan los requisitos establecidos en los artículos 12.14.3.2 y 12.14.3.4, respectivamente, se limita a las barras No. 5 y menores, y solamente cuando se satisfagan ciertas condiciones (ver 12.15.4.1 y 12.15.4.2).

Los empalmes en los elementos predominantemente traccionados (tensores) se deben realizar mediante conexiones totalmente mecánicas o uniones completamente soldadas, y los empalmes en las barras adyacentes deben estar escalonados como mínimo una distancia igual a 30 in. Ver la definición de "elemento predominantemente traccionado" en el artículo R12.15.5).

12.16 EMPALMES DE LAS BARRAS CONFORMADAS SOLICITADAS A COMPRESIÓN

Como el comportamiento por adherencia de las barras comprimidas no se ve afectado por el problema de la fisuración originada por la tracción transversal, los empalmes de las armaduras comprimidas no requieren de disposiciones tan estrictas como las establecidas para los empalmes de las armaduras traccionadas. Ensayos realizados han demostrado que la resistencia de los empalmes de las barras comprimidas depende fundamentalmente de la resistencia proporcionada por el apoyo en el extremo de la barra; por lo tanto la resistencia de estos empalmes no aumenta de forma proporcional aunque se duplique la longitud del empalme. Es por esto que el Código exige longitudes de empalme significativamente mayores para las barras que poseen una tensión de fluencia superior a 60.000 psi.

12.16.1 Empalmes por yuxtaposición de las barras comprimidas

A partir del Código 1989 se simplificó el cálculo de los empalmes por yuxtaposición de las barras comprimidas, ya que se eliminaron los cálculos que se requerían para determinar la longitud de anclaje en compresión. Para los empalmes por yuxtaposición de las barras comprimidas, el artículo 12.16.1 simplemente especifica que, para $f_y \leq 60.000$ psi, la longitud de empalme debe ser mayor o igual que $0,0005d_b f_y$, pero nunca menor que 12 in. Para las barras con una tensión de fluencia superior a 60.000 psi la longitud de empalme debe ser mayor o igual que $(0,0009f_y - 214)d_b$, pero nunca menor que 12 in. Las longitudes de los empalmes por yuxtaposición se deben incrementar en un tercio cuando se utiliza hormigón con una resistencia a la compresión especificada menor que 3000 psi.

Como se observó en la discusión de la Sección 12.14.2, las barras No. 14 y No. 18 se pueden empalmar por yuxtaposición solamente cuando trabajan a compresión, y solamente se pueden empalmar con barras No. 11 o menores o con las barras de menor diámetro en espera de zapatas o cabezales. El artículo 12.16.2 requiere que, cuando se empalmen por yuxtaposición barras comprimidas de diferente diámetro, la longitud del empalme debe ser mayor que la longitud de anclaje en compresión de la barra de mayor diámetro o que la longitud de empalme en compresión de la barra de menor diámetro, cualquiera sea el valor que resulte mayor.

12.16.4 Empalmes por contacto a tope

La Sección 12.16.4 especifica los requisitos para los empalmes por contacto a tope. Los empalmes por contacto a tope solamente están permitidos en los elementos que tienen estribos cerrados o zunchos (12.16.4.3). El artículo R12.16.4.1 advierte al ingeniero sobre el uso de empalmes por contacto a tope en barras inclinadas respecto de la vertical. Los empalmes por contacto a tope se utilizan casi exclusivamente en las barras de las columnas y se pretende limitar su uso a barras verticales o casi verticales, ya que resulta difícil lograr un buen contacto a tope cuando las barras están en posición horizontal o tienen una inclinación significativa respecto de la vertical. Las barras comprimidas también se pueden empalmar utilizando empalmes mecánicos o soldados, siempre que estos empalmes mecánicos o soldados satisfagan los requisitos establecidos en 12.14.3.2 ó 12.14.3.4, respectivamente.

12.17 REQUISITOS ESPECIALES PARA LOS EMPALMES EN LAS COLUMNAS

Los requisitos especiales para los empalmes en las columnas se simplificaron considerablemente en la revisión efectuada antes de la publicación del Código 1989. Los requisitos para los empalmes en las columnas simplifican los cálculos requeridos en comparación con los requisitos planteados en las ediciones del código anteriores a 1989, ya que asumen que un empalme por yuxtaposición comprimido (12.17.2.1) tiene una capacidad a la tracción como mínimo igual a un cuarto de f_y (R12.17).

Los requisitos para los empalmes en las columnas se basan en el concepto de proveer algo de resistencia a la tracción en todas las secciones en las cuales hay empalmes, aún cuando el análisis indique que solamente habrá compresión. Básicamente la Sección 12.7 establece la resistencia a la tracción requerida para las barras longitudinales empalmadas en una columna. Está permitido utilizar empalmes por yuxtaposición, empalmes soldados, empalmes mecánicos o empalmes por contacto a tope.

12.17.2 Empalmes por yuxtaposición en las columnas

Se permite utilizar empalmes por yuxtaposición en las barras de las columnas solicitadas ya sea a compresión o a tracción. El tipo de empalme a utilizar dependerá de si las tensiones en las barras debidas a todas las combinaciones de cargas mayoradas consideradas en el diseño de la columna son de compresión o de tracción y, si son de tracción, también dependerá de la magnitud de dicha tracción. El tipo de empalme a utilizar será determinado por la combinación de cargas que produzca la mayor tracción en las barras empalmadas. Los requisitos de diseño para los empalmes por yuxtaposición de las barras de las columnas se pueden ilustrar por medio de un típico diagrama de interacción resistencia a la carga axial-resistencia al momento como el de la Figura 4-21.

La tensión en las barras en diferentes puntos de la curva de interacción de resistencias define segmentos de la curva de resistencia en los cuales se pueden utilizar diferentes tipos de empalmes por yuxtaposición. Para las combinaciones de cargas mayoradas que caen sobre la curva de resistencia, la tensión en las barras se puede calcular fácilmente y así determinar el tipo de empalme requerido. Sin embargo, las combinaciones de cargas que no caen exactamente sobre la curva de resistencia (es decir para aquellas que están por debajo de la curva de resistencia) representan un dilema, y para estas condiciones no existe un método exacto sencillo que permita calcular la tensión en las barras.

Un enfoque aparentemente racional consiste en considerar que las combinaciones de cargas mayoradas ubicadas por debajo de la curva de resistencia producen en las barras una tensión del mismo tipo, compresión o tracción, y de aproximadamente la misma magnitud que la que se produce sobre el segmento de la curva de resistencia intersecada por una línea radial (líneas de igual excentricidad) que atraviesa el punto correspondiente a la combinación de cargas considerada. La exactitud de esta hipótesis aumenta a medida que las combinaciones de cargas mayoradas investigadas se aproximan a la curva de interacción real de la columna. Usando este enfoque, se pueden establecer diferentes "zonas de tensión," tal como se ilustra en la Figura 4-21.

Para las combinaciones de cargas mayoradas que corresponden a la Zona 1 de la Figura 4-21, se considera que todas las barras de la columna están comprimidas. Para las combinaciones que corresponden a la Zona 2 de la figura, se considera que la tensión en las barras del lado traccionado de la columna varía entre cero y una tracción de $0,5f_y$. Para las combinaciones de cargas correspondientes a la Zona 3, se considera que la tensión en las barras del lado traccionado de la columna es de tracción, y que esta tracción es mayor que $0,5f_y$. Esto significa que el tipo de empalme a utilizar dependerá de en cuál zona o

zonas están ubicadas todas las combinaciones de cargas mayoradas consideradas en el diseño de la columna. Para determinar el tipo de empalme requerido todo lo que el ingeniero debe hacer es ubicar las combinaciones de cargas mayoradas en el diagrama de interacción de las resistencias correspondiente a la columna y establecer qué tipo de barras utilizará. El uso de este tipo de diagramas simplifica enormemente el diseño de los empalmes de las barras de las columnas. Por ejemplo, si el diseño de la columna es determinado por la combinación correspondiente a las cargas gravitatorias mayoradas – digamos el Punto A de la Figura 4-21– para la cual las tensiones en todas las barras son de compresión, pero hay una combinación de cargas que incluye el viento – digamos el Punto B de la Figura 4-21 – que provoca algo de tracción en las barras, el empalme se debe diseñar para las condiciones correspondientes a la Zona 2 (la tensión en las barras es de tracción, pero esta tracción es menor que $0,5f_y$).

La Tabla 4-8 resume los requisitos de diseño para los empalmes por yuxtaposición en las columnas. Observar que el empalme por yuxtaposición permitido cuando todas las barras están comprimidas (ver 12.17.2.1) considera que la longitud del empalme es adecuada para satisfacer los requisitos de armadura mínima de tracción. El Ejemplo 4.8 ilustra la aplicación de los requisitos para los empalmes por yuxtaposición en las columnas.

Los artículos 12.17.2.4 y 12.17.2.5 especifican factores de reducción que se pueden utilizar para los empalmes por yuxtaposición comprimidos cuando toda la longitud del empalme está confinada mediante estribos (factor de reducción = 0,83) o mediante zunchos (factor de reducción = 0,75). Los zunchos deben satisfacer los requisitos especificados en 7.10.4 y 10.9.3. Si se utilizan estribos para reducir la longitud de un empalme por yuxtaposición, estos estribos deben tener un área efectiva mínima de $0,0015hs$. Para poder aplicar el factor de reducción de 0,83 el requisito de que el área efectiva sea siempre mayor o igual que $0,0015hs$ se debe verificar en ambas direcciones, calculando por separado el área efectiva de las ramas de los estribos en ambas direcciones. Ver la Figura 4-22. Aunque se apliquen estas reducciones, la longitud de empalme resultante debe ser mayor o igual que 12 in.

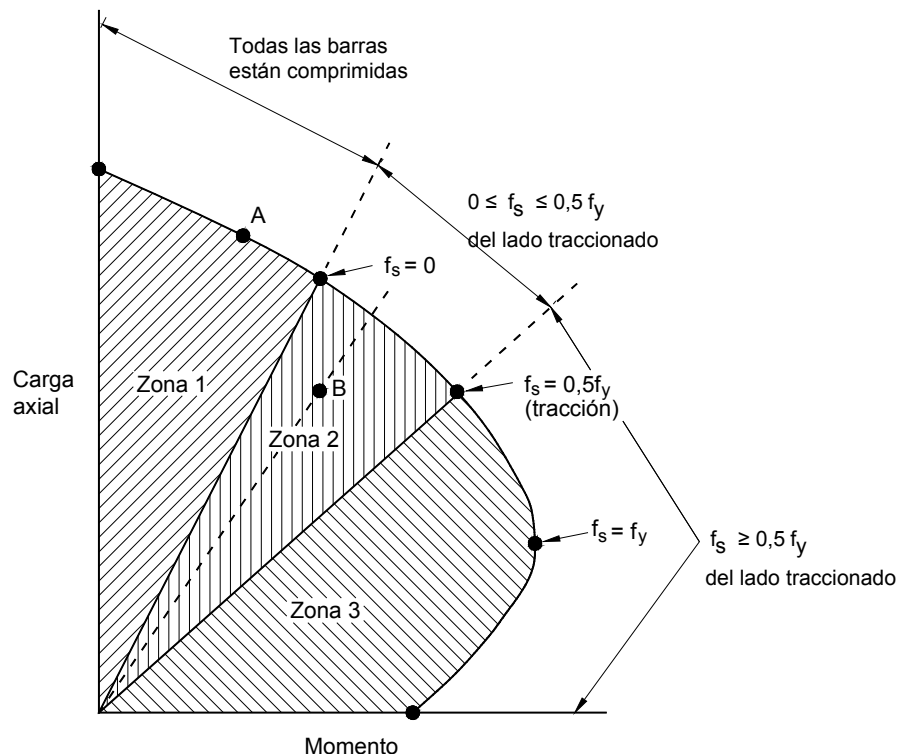
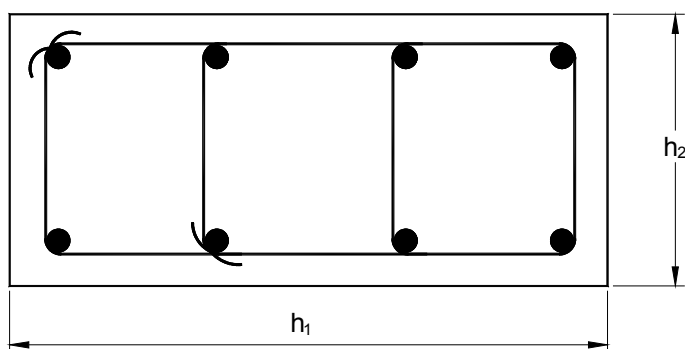


Figura 4-21 – Requisitos especiales para los empalmes en las columnas

Tabla 4-8 – Empalmes por yuxtaposición en las columnas

12.7.2.1 – La tensión en las barras es de compresión (Zona 1)*	Usar empalmes por yuxtaposición (12.16) modificado por el factor 0,83 para considerar la presencia de estribos en toda la longitud del empalme (12.17.2.4) ó 0,75 si hay armadura en forma de zuncho (12.17.2.5).
12.17.2.2 – La tensión en las barras es de tracción, pero esta tracción es $\leq 0,5f_y$ (Zona 2)*	Usar empalmes de tracción Clase B (12.15) si más de la mitad de las barras de la columna se empalman en una misma sección, o Usar empalmes de tracción Clase A (12.15) si en una misma sección no se empalman más de la mitad de las barras de la columna. Escalonar los empalmes una longitud igual a ℓ_d .
12.17.2.3 – La tensión en las barras es de tracción, y esta tracción es $> 0,5f_y$ (Zona 3)*	Usar empalmes de tracción Clase B (12.15).

* La definición de las Zonas 1, 2 y 3 se ilustra en la Figura 4-21.



Perpendicular a la dimensión h_1 : Área de los 4 estribos $\geq 0,0015 h_1 s$
 Perpendicular a la dimensión h_2 : Área de los 2 estribos $\geq 0,0015 h_2 s$

Figura 4-22 – Aplicación del artículo 12.17.2.4

Como la longitud "básica" de empalme de los empalmes por yuxtaposición comprimidos depende del diámetro de las barras d_b y de su tensión de fluencia f_y , y considerando los tres factores de modificación que se aplican cuando se usan estribos cerrados o zunchos y hormigón de baja resistencia, es conveniente establecer la longitud de estos empalmes simplemente como un múltiplo del diámetro de las barras.

Para barras de acero Grado 60.....	30 d_b
confinadas por estribos cerrados	25 d_b
confinadas por zunchos	22,5 d_b
Para barras de acero Grado 75.....	43,5 d_b
confinadas por estribos cerrados	36 d_b
confinadas por zunchos	33 d_b

Pero la longitud de empalme de los empalmes comprimidos nunca puede ser menor que 12 in. Para resistencias f'_c menores que 3000 psi, los valores anteriores se deben multiplicar por 1,33. En base a estos valores se pueden desarrollar tablas de longitudes de empalme para los tamaños de barra más habituales.

12.17.3 Empalmes mecánicos o soldados en las columnas

Se permite empalmar las barras de las columnas mediante empalmes mecánicos o soldados, independientemente de que para todas las combinaciones de cargas mayoradas la tensión en las barras sea de compresión o tracción (Zonas 1, 2 y 3 de la

Figura 4-21). Se deben usar empalmes "totalmente" mecánicos o uniones "completamente" soldadas, es decir, el empalme mecánico o soldado debe desarrollar como mínimo 125 por ciento de la tensión de fluencia de las barras ($1,25A_b f_y$). Se permite usar empalmes mecánicos o soldados de menor resistencia para empalmar barras No. 5 y menores solicitadas a tracción, de acuerdo con la Sección 12.15.4.

12.17.4 Empalmes por contacto a tope en las columnas

Para las barras de las columnas que bajo todas las combinaciones de cargas mayoradas aplicables estarán siempre comprimidas (Zona 1, Figura 4-21) se permite utilizar empalmes por contacto a tope. Aunque según los cálculos se determine que no habrá tracción, cuando se utilizan empalmes por contacto a tope se debe mantener una resistencia mínima a la tracción con barras continuas (no empalmadas). A cada lado de la columna debe haber barras continuas que proporcionen una resistencia a la tracción igual a $A_s f_y / 4$, siendo A_s el área total de las barras en dicho lado de la columna. Por lo tanto, en una sección no se pueden empalmar más de 3/4 de las barras de uno de los lados. Los empalmes a tope deben estar escalonados, o bien se deben agregar barras adicionales si es que se desean empalmar más de 3/4 de las barras.

12.18 EMPALMES DE LAS MALLAS DE ACERO SOLDADAS DE ALAMBRES CONFORMADOS SOLICITADAS A TRACCIÓN

La longitud mínima de empalme por yuxtaposición de las mallas de acero soldadas de alambres conformados es igual a $1,3\ell_d$ y se especifica que este valor debe ser mayor o igual que 8 in. La longitud de empalme se mide entre los extremos de cada panel de mall. La longitud de anclaje ℓ_d es el valor calculado de acuerdo con los requisitos de la Sección 12.7. El código también establece que la yuxtaposición, medida entre los alambres transversales más alejados de cada malla, debe ser mayor o igual que 2 in. La Figura 4-23 ilustra los requisitos para los empalmes por yuxtaposición de las mallas de acero soldadas de alambres conformados.

Si no hay ningún alambre transversal dentro de la longitud del empalme, la longitud de empalme se debe determinar de acuerdo con los requisitos correspondientes a alambres conformados establecidos en la Sección 12.15.

El artículo 12.18.3 especifica requisitos para el empalme de las mallas de acero soldadas en las cuales hay uno o más alambres lisos, incluyendo aquellas en las cuales los alambres en una dirección son conformados y los alambres en la dirección ortogonal son lisos.

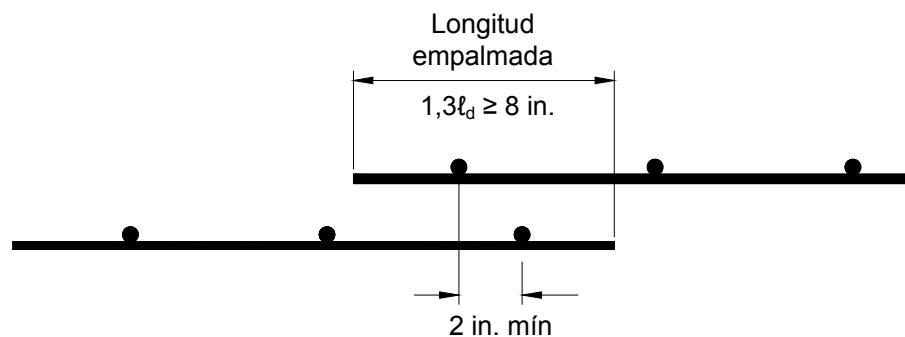


Figura 4-23 – Longitud de un empalme por yuxtaposición para mallas de acero de alambres conformados

12.19 EMPALMES DE LAS MALLAS DE ACERO SOLDADAS DE ALAMBRES LISOS SOLICITADAS A TRACCIÓN

La longitud mínima de empalme por yuxtaposición para las mallas de acero soldadas de alambres lisos solicitadas a tracción depende de la relación entre el área de armadura provista y el área de armadura requerida por cálculo. La longitud de empalme se mide entre los alambres transversales más alejados de cada panel de malla. Las longitudes requeridas para los anclajes por yuxtaposición se ilustran en la Figura 4-24.

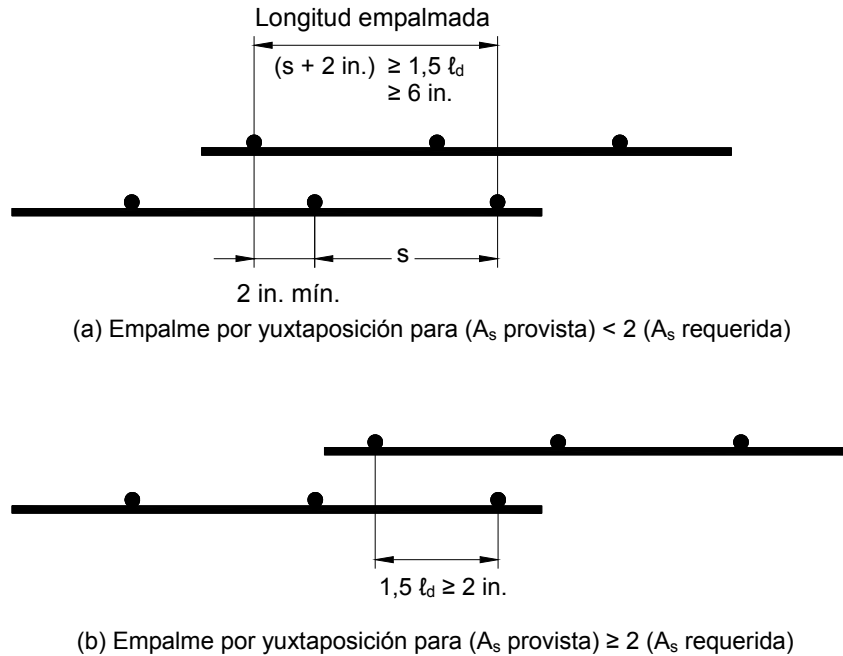


Figura 4-24 – Longitud de un empalme por yuxtaposición para mallas de acero de alambres lisos

COMENTARIOS FINALES

Agregamos un comentario adicional referido a los empalmes de la armadura de temperatura y contracción en las superficies expuestas de tabiques o losas: se debe asumir que la armadura de temperatura y contracción está solicitada a la totalidad de la tensión de fluencia especificada f_y . El propósito de esta armadura es impedir que ocurra una fisuración excesiva. En algún punto del elemento es probable que se produzca fisuración, con lo cual la armadura de temperatura y contracción tomarán toda la tensión. Es por esta causa que se debe asumir que todos los empalmes de la armadura de temperatura y contracción deben ser los requeridos para desarrollar la tensión de fluencia. Para esta armadura siempre se deben utilizar empalmes de tracción Clase B.

REFERENCIAS

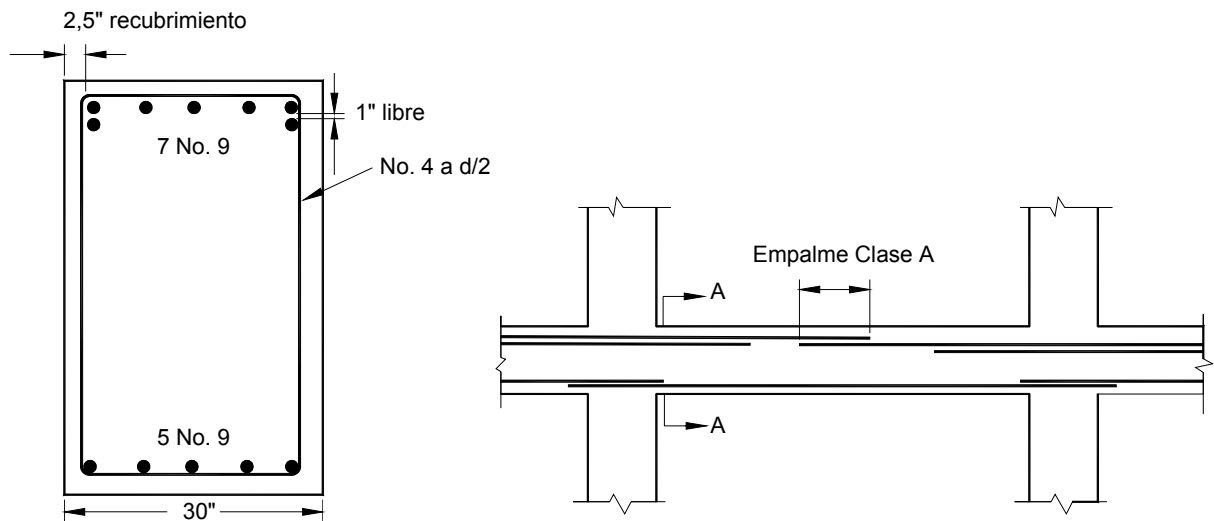
- 4.1 Orangun, C.O., Jirsa, J. O. y Breen, J.E., "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 74, Marzo 1977, pp. 114-122.
- 4.2 Sozen, M.A., y Moehle, J.P., "Selection of Development and Lap-Splice Lengths of Deformed Reinforcing Bars in Concrete Subjected to Static Loads," Report to PCA and CRSI, PCA R&D, No. de Serie 1868, Marzo 1990.
- 4.3 Hamad, B.S., Jirsa, J.O. y D'Abreu, N.I., "Effect of Epoxy Coating on Bond and Anchorage of Reinforcement in Concrete Structures, " Research Report No. 1181-1F., Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, Diciembre 1990, p. 242.
- 4.4 *Manual of Standard Practice, Structural Welded Wire Reinforcement*, WWR-500, 5° Ed., Wire Reinforcement Institute, Findlay, OH, 1999, p. 27.
- 4.5 *Reinforcement Anchorages and Splices*, 4° Ed., Concrete Reinforcing Steel Institute, Schaumburg, IL, 1997.

Ejemplo 4.1 – Anclaje de barras traccionadas

En una viga perimetral de una estructura hay 7 barras superiores No. 9 sobre el apoyo. Los requisitos para integridad estructural requieren que al menos un sexto de la armadura de tracción sea continua, pero la armadura continua no puede consistir en menos de 2 barras (7.13.2.2). Las barras se van a empalmar con empalmes Clase A en la mitad de la luz. Determinar la longitud requerida para el empalme Clase A para los dos casos siguientes:

Caso A – Longitud de anclaje determinada de acuerdo con 12.2.2

Caso B – Longitud de anclaje determinada de acuerdo con 12.2.3



- Datos para el diseño:
- Hormigón liviano
 - Recubrimiento libre para los estribos = 2,5 in.
 - Barras con revestimiento epoxi
 - $f'_c = 4000$ psi
 - $f_y = 60.000$ psi
 - $b = 30$ in.
 - La armadura se distribuye como se ilustra en la figura.

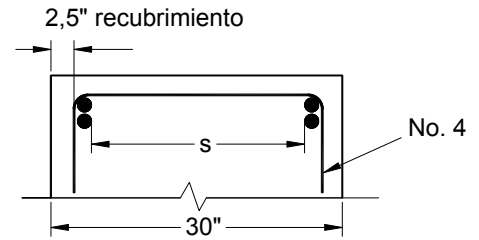
Cálculos y discusión	Referencia del Código
Se asume que se satisface la longitud de anclaje especificada para la armadura para momento negativo y que por lo tanto las barras superiores se interrumpen en una sección alejada del centro de la luz.	12.12.3
El número mínimo de barras superiores que se deben hacer continuas por motivos de integridad estructural es igual a 1/6 de las barras provistas, es decir 7/6 de las barras, o un mínimo de 2 barras. Empalmaremos dos barras de esquina en el centro de la luz.	7.13.2.2
Los empalmes por yuxtaposición Clase A requieren una longitud mínima de $1,0\ell_d$.	12.15.1
Diámetro nominal de una barra No. 9 = 1,128 in.	

Caso A – Sección 12.2.2

Ver Tabla 4-1. Para las barras No. 7 y mayores, se aplican las Ecuaciones B o D. Para determinar cuál de las ecuaciones es determinante debemos calcular el recubrimiento libre y la separación libre para las barras que se están empalmando.

$$\begin{aligned}
 &\text{Separación libre entre las barras empalmadas (barras de esquina)} \\
 &= [30 - 2 (\text{recubrimiento}) - 2 (\text{estribo No. 4}) - 2 (\text{barra No. 9})] \\
 &= [30 - 2 (2,5) - 2 (0,5) - 2 (1,128)] \\
 &= 21,7 \text{ in.} \\
 &= 19,3 d_b
 \end{aligned}$$

$$\text{Recubrimiento libre hasta la barra empalmada} = 2,5 + 0,5 = 3,0 \text{ in.} = 2,7 d_b$$



Como se verifica que (separación libre) > 2d_b y (recubrimiento libre) > d_b debemos aplicar la Ecuación B.

$$\ell_d = \left(\frac{f_y \alpha \beta \lambda}{20 \sqrt{f'_c}} \right) d_b \quad 12.2.2$$

$$\alpha = 1,3 \text{ (barras superiores)} \quad 12.2.4$$

$$\beta = 1,5 \text{ (barras revestidas con epoxi con un revestimiento menor que } 3d_b) \quad 12.2.4$$

$$\alpha \beta = 1,3 \times 1,5 = 1,95. \quad \text{Sin embargo, el producto entre } \alpha \text{ y } \beta \text{ debe ser menor o igual que } 1,7. \quad 12.2.4$$

$$\lambda = 1,3 \text{ (hormigón de agregados livianos)} \quad 12.2.4$$

$$\begin{aligned}
 \ell_d &= \frac{60.000(1,7)(1,3)}{20 \sqrt{4000}} (1,128) \\
 &= 118,3 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

$$\text{Empalme Clase A} = 1,0 \ell_d = 118,3 \text{ in.}$$

Caso B – Sección 12.2.3

Para aplicar la Ecuación (12-1) debemos realizar algunos cálculos adicionales, pero es posible que las longitudes de anclaje obtenidas con esta expresión sean más cortas.

$$\ell_d = \left(\left(\frac{3}{40} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) \frac{\alpha \beta \gamma \lambda}{\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) d_b \quad \text{Ec. (12-1)}$$

El parámetro "c" es el menor de los valores que se obtienen de: (1) la distancia entre el centro de la barra o alambre anclado y la superficie de hormigón más próxima, o (2) la mitad de la separación entre los centros de las barras o alambres que se anclan. Observar que el término $\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)$ debe ser menor o igual que 2,5.

Distancia entre el centro de la barra o alambre anclado y la superficie de hormigón más próxima

= recubrimiento libre hasta la barra empalmada + 1/2 diámetro de la barra

$$= 2,7d_b + 0,5d_b = 3,2d_b$$

Separación entre los centros de las barras = separación libre + $1,0d_b = 19,3d_b + 1,0d_b = 20,3d_b$

Como "c" es el menor de los valores calculados como

$$3,2d_b \text{ ó }$$

$$0,5(20,3d_b) \rightarrow c = 3,2d_b$$

Como c/d_b es mayor que 2,5 no es necesario calcular K_{tr}

$$\gamma = 1,0 \text{ (barras No. 7 y mayores)}$$

$$\ell_d = \frac{3(60.000)(1,7)(1,0)(1,3)}{20\sqrt{4000}}(1,128)$$

$$= 71,0 \text{ in.}$$

Empalme Clase A = $1,0\ell_d = 71,0 \text{ in.}$

Los cálculos adicionales requeridos para satisfacer la Ecuación general (12-1) especificada en la Sección 12.2.3 pueden llevar a una reducción considerable de las longitudes de empalme con respecto a los valores calculados mediante el procedimiento simplificado especificado en la Sección 12.2.2.

Ejemplo 4.2 – Anclaje de barras traccionadas

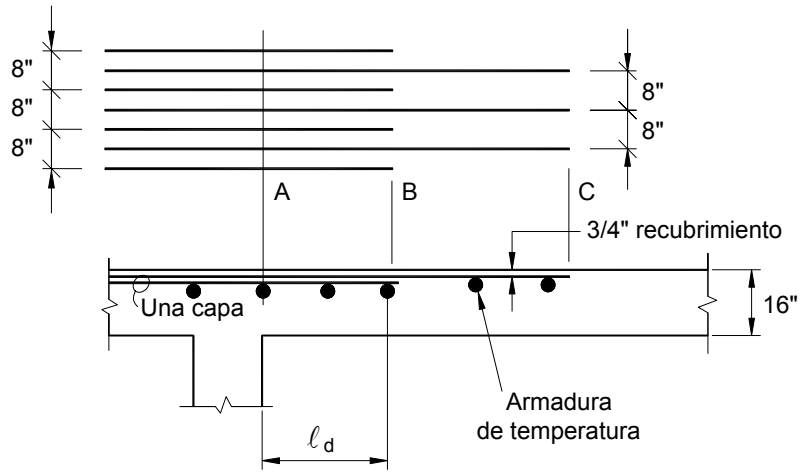
Calcular la longitud de anclaje en tracción requerida para las barras No. 8 (barras cortas alternadas) de la losa armada en una dirección de hormigón de "agregados livianos y arena" ilustrada a continuación.

Datos para el diseño:

$$f'_c = 4000 \text{ psi}$$

$$f_y = 60.000 \text{ psi}$$

Barras sin revestimiento epoxi



Cálculos y discusión

Referencia del Código

En este ejemplo realizaremos los cálculos de acuerdo con las Secciones 12.2.2 y 12.2.3.

Suponer que las barras cortas están ancladas en una longitud AB, mientras que las barras largas están ancladas en la longitud BC.

Diámetro nominal de una barra No. 8 = 1,00 in.

A. Longitud de anclaje de acuerdo con 12.2.2

Separación entre los centros de las barras ancladas = 8 in. = $8d_b$

Recubrimiento libre = 0,75 in. = $0,75d_b$

Como el recubrimiento libre es menor que d_b y la barra es mayor que una barra No. 7, debemos aplicar la Ecuación D de la Tabla 4-1.

$$\ell_d = \left(\frac{3 f_y \alpha \beta \lambda}{40 \sqrt{f'_c}} \right) d_b \quad 12.2.2$$

$\alpha = 1,3$ (barras superiores)

$\beta = 1,5$ (barras sin revestimiento epoxi)

$\lambda = 1,3$ (hormigón liviano)

$$\ell_d = \frac{3(60.000)(1,3)(1,0)(1,3)}{40\sqrt{4000}}(1,0) = 120,3 \text{ in.}$$

B. Longitud de anclaje de acuerdo con 12.2.3

$$\ell_d = \left(\left(\frac{3}{40} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) \frac{\alpha\beta\gamma\lambda}{\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) d_b \quad \text{Ec. (12-1)}$$

$\alpha = 1,3$ (barras superiores)

$\beta = 1,0$ (barras sin revestimiento epoxi)

$\gamma = 1,0$ (barras No. 7 y mayores)

$\lambda = 1,3$ (hormigón liviano)

Separación entre los centros de las barras ancladas = 8 in. = $8d_b$

Separación libre entre las barras ancladas = $8 - 1 = 7 \text{ in.} = 7d_b$

Recubrimiento libre = 0,75 in. = $0,75d_b$

Distancia "c" entre el centro de la barra y la superficie de hormigón = $0,75 + 0,5 = 1,25 \text{ in.} = 1,25d_b$ (valor determinante)

$$= 8d_b / 2 = 4d_b \text{ (separación entre centros / 2)}$$

$c = 1,25d_b$ (valor calculado anteriormente)

$K_{tr} = 0$ (no hay armadura transversal)

$$\ell_d = \frac{3(60.000)(1,3)(1,0)(1,0)(1,3)}{40\sqrt{4000}(1,25)}(1,0) = 96,2 \text{ in.}$$

Ejemplo 4.3 – Anclaje de barras traccionadas

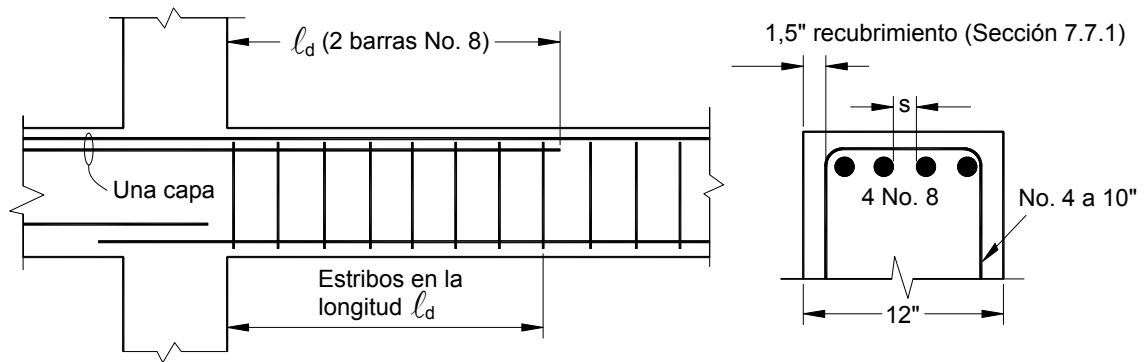
Calcular la longitud de anclaje requerida para las 2 barras No. 8 interiores de la viga ilustrada a continuación. Las 2 barras No. 8 exteriores se harán continuas en toda la longitud de la viga. Los estribos provistos satisfacen los requisitos de armadura de corte mínima para vigas especificados en el Código.

Datos para el diseño:

$$f'_c = 4000 \text{ psi} \quad (\text{hormigón de peso normal})$$

$$f_y = 60.000 \text{ psi}$$

Barras sin revestimiento epoxi



Cálculos y discusión

Referencia del Código

En este ejemplo realizaremos los cálculos de acuerdo con las Secciones 12.2.2 y 12.2.3.

Diámetro nominal de una barra No. 8 = 1,00 in.

A. Longitud de anclaje de acuerdo con 12.2.2

$$\begin{aligned} \text{Separación libre} &= [12 - 2 (\text{recubrimiento}) - 2 (\text{estribo No. 4}) - 4 (\text{barra No. 8})] / 3 \\ &= [12 - 2 (1,5) - 2 (0,5) - 4 (1,00)] / 3 \\ &= 1,33 \text{ in.} \\ &= 1,33 d_b \end{aligned}$$

$$\text{Recubrimiento libre} = 1,5 + 0,5 = 2,0 \text{ in.} = 2d_b$$

Ver la Tabla 4-1. La separación libre entre las barras ancladas es mayor que d_b , el recubrimiento libre es mayor que d_b y la cantidad de estribos es mayor que el mínimo indicado en el Código; por lo tanto se aplica la Ecuación B de la Tabla 4-1.

$$\ell_d = \left(\frac{f_y \alpha \beta \lambda}{20 \sqrt{f'_c}} \right) d_b \quad 12.2.2$$

$$\alpha = 1,3 \quad (\text{barras superiores})$$

$$\beta = 1,0 \quad (\text{barras sin revestimiento epoxi})$$

$\lambda = 1,0$ (hormigón de peso normal)

$$\ell_d = \frac{(60.000)(1,3)(1,0)(1,0)}{20\sqrt{4000}}(1,0) = 61,7 \text{ in.}$$

B. Longitud de anclaje de acuerdo con 12.2.3

$$\ell_d = \left(\left(\frac{3}{40} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) \left(\frac{\alpha\beta\gamma\lambda}{\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) \right) d_b \quad \text{Ec. (12-1)}$$

$\alpha = 1,3$ (barras superiores)

$\beta = 1,0$ (barras sin revestimiento epoxi)

$\gamma = 1,0$ (barras No. 7 y mayores)

$\lambda = 1,0$ (hormigón de peso normal)

Separación libre = $1,33d_b$

Separación entre los centros de barras ancladas = $1,33 + 1,00 = 2,33 \text{ in.} = 2,33d_b$

Recubrimiento libre = $1,50 + 0,50 = 2,0 \text{ in.} = 2,0d_b$

Distancia entre el centro de la barra y la superficie de hormigón = $1,5 + 0,5 + 0,5 = 2,5 \text{ in.} = 2,5d_b$

c = el menor de los valores que se obtienen de: (1) la distancia entre el centro de la barra o alambre anclado y la superficie de hormigón más próxima ($2,5d_b$); o (2) la mitad de la separación entre los centros de las barras o alambres que se anclan ($2,33d_b / 2 = 1,17d_b$).

$$c = 1,17d_b$$

$$K_{tr} = \frac{A_{tr} f_{yt}}{1500 s n}$$

$$A_{tr} (2\text{-No.4}) = 2 \times 0,2 = 0,4 \text{ in.}^2$$

$s = 10 \text{ in.}$ (separación de los estribos)

$n = 2$ (se están empalmado 2 barras)

$$K_{tr} = \frac{0,4(60.000)}{1500(10)(2)} = 0,80 \text{ in.} = 0,80d_b$$

$$\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right) = \frac{1,17 + 0,80}{1,0} = 1,97 < 2,5 \quad \text{VERIFICA}$$

12.2.3

$$\ell_d = \frac{3(60.000)(1,3)(1,0)(1,0)(1,0)}{40\sqrt{4000}(1,97)}(1,0) = 47,0 \text{ in.}$$

Ejemplo 4.4 – Anclaje de la armadura solicitada a flexión

Determinar la longitud de las barras superiores e inferiores para el tramo exterior de la viga continua ilustrada a continuación. La carga mayorada uniformemente distribuida que actúa sobre la viga es $w_u = 6,0$ kips/ft (incluyendo el peso de la viga).

Datos para el diseño:

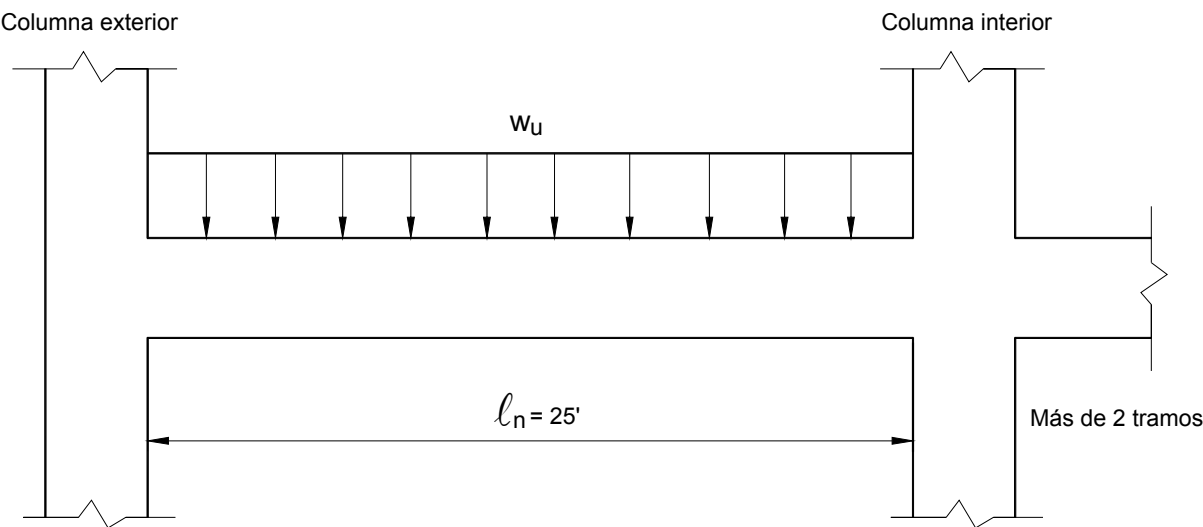
$f'_c = 4000$ psi (hormigón de peso normal)

$f_y = 60.000$ psi (Grado 60)

$b = 16$ in.

$h = 22$ in.

Recubrimiento de hormigón = 1,5 in.



Cálculos y discusión

Referencia del Código

1. Diseño preliminar para la armadura de flexión y corte

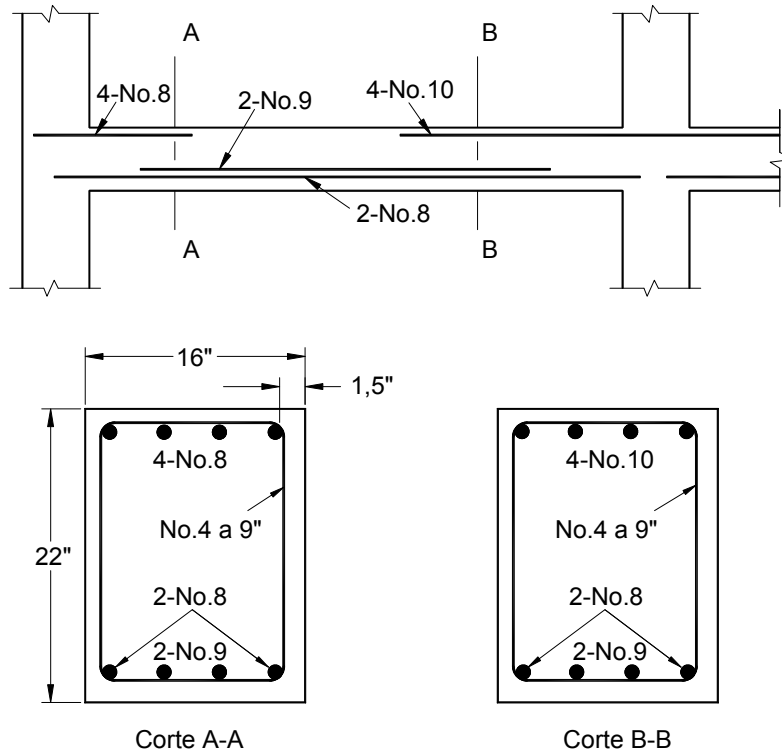
a. Usar el método de análisis aproximado para flexión y corte

8.3.3

Ubicación	Momentos y cortes mayorados
Cara interior de un apoyo exterior	$-M_u = w_u \ell_n^2 / 16 = 6(25^2) / 16 = -234,4$ ft-kips
Tramo exterior, positivo	$+M_u = w_u \ell_n^2 / 14 = 6(25^2) / 14 = 267,9$ ft-kips
Cara exterior del primer apoyo interior	$-M_u = w_u \ell_n^2 / 10 = 6(25^2) / 10 = -375,0$ ft-kips
Cara exterior del primer apoyo interior	$V_u = 1,15w_u \ell_n / 2 = 1,15(6)(25) / 2 = 86,3$ ft-kips

- b. Determinar la armadura requerida usando los procedimientos descriptos en el Capítulo 7 de este documento. Con un recubrimiento de 1,5 in., estribos No. 4 y barras longitudinales No. 9 ó No. 10, $d \approx 19,4$ in.

M_u	A_s requerida	Barras	A_s provista
-234,4 ft-kips	$2,93 \text{ in}^2$	4 No. 8	$3,16 \text{ in}^2$
+267,9 ft-kips	$3,40 \text{ in}^2$	2 No. 8 2 No. 9	$3,58 \text{ in}^2$
-375,0 ft-kips	$5,01 \text{ in}^2$	4 No. 10	$5,08 \text{ in}^2$



- c. Determinar la armadura de corte requerida

V_u a una distancia "d" de la cara del apoyo: 11.1.3.1

$$V_u = 86,3 - 6(19,4/12) = 76,6 \text{ kips}$$

$$\phi V_c = \phi \left(2\sqrt{f'_c} b_w d \right) = 0,75 \times 2\sqrt{4000} \times 16 \times 19,4 / 1000 = 29,5 \text{ kips} \quad 11.1.3.1$$

Intentamos con estribos en U No. 4 con una separación de 7 in. $< s_{\max} = \frac{d}{2} = 9,7$ in. 11.5.4.1

$$\phi V_s = \frac{\phi A_v f_y d}{s} = 0,75(0,40)(60)(19,4)/7 = 49,9 \text{ kips} \quad 11.5.6.2$$

$$\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s = 29,5 + 49,9 = 79,4 > 76,6 \text{ kips} \quad \text{VERIFICA}$$

Distancia a partir del apoyo donde ya no se requieren estribos:

$$V_u < \frac{\phi V_c}{2} = \frac{29,2}{2} = 14,8 \text{ kips}$$

11.5.5.1

$$V_u = 86,3 - 6x = 14,8 \text{ kips}$$

$$x = 11,9 \text{ ft} \approx 1/2 \text{ de la luz}$$

Usar estribos en U No. 4 con una separación de 7 in. (en toda la luz)

2. Longitudes de las barras de la armadura inferior.

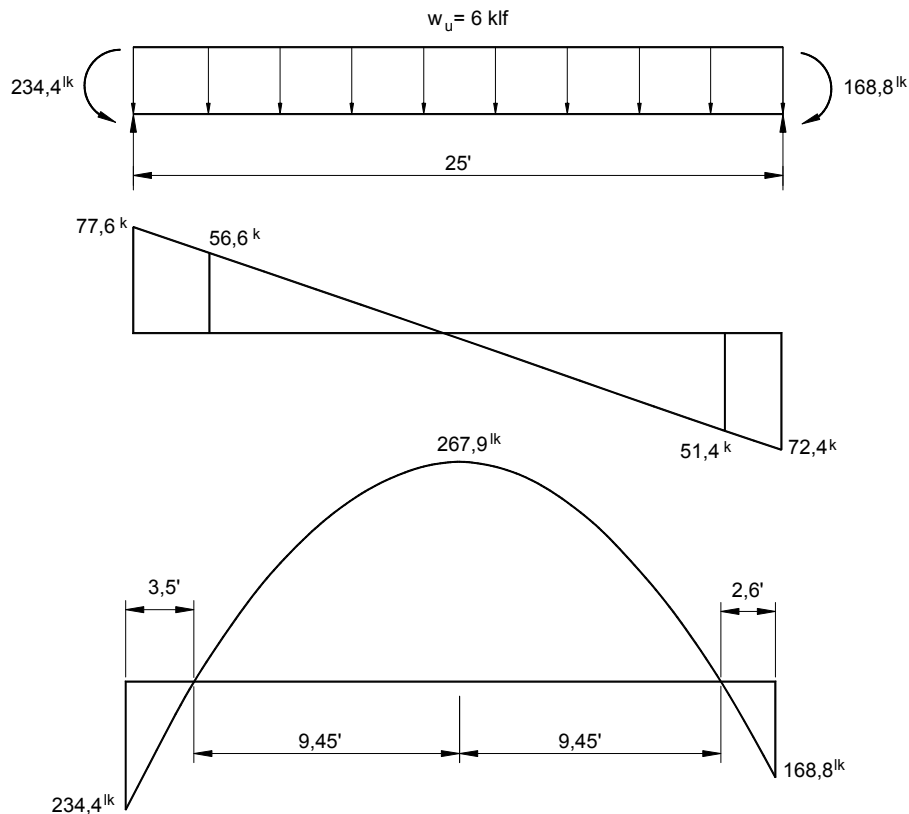
a. Número de barras que se deben prolongar hacia los apoyos.

12.11.1

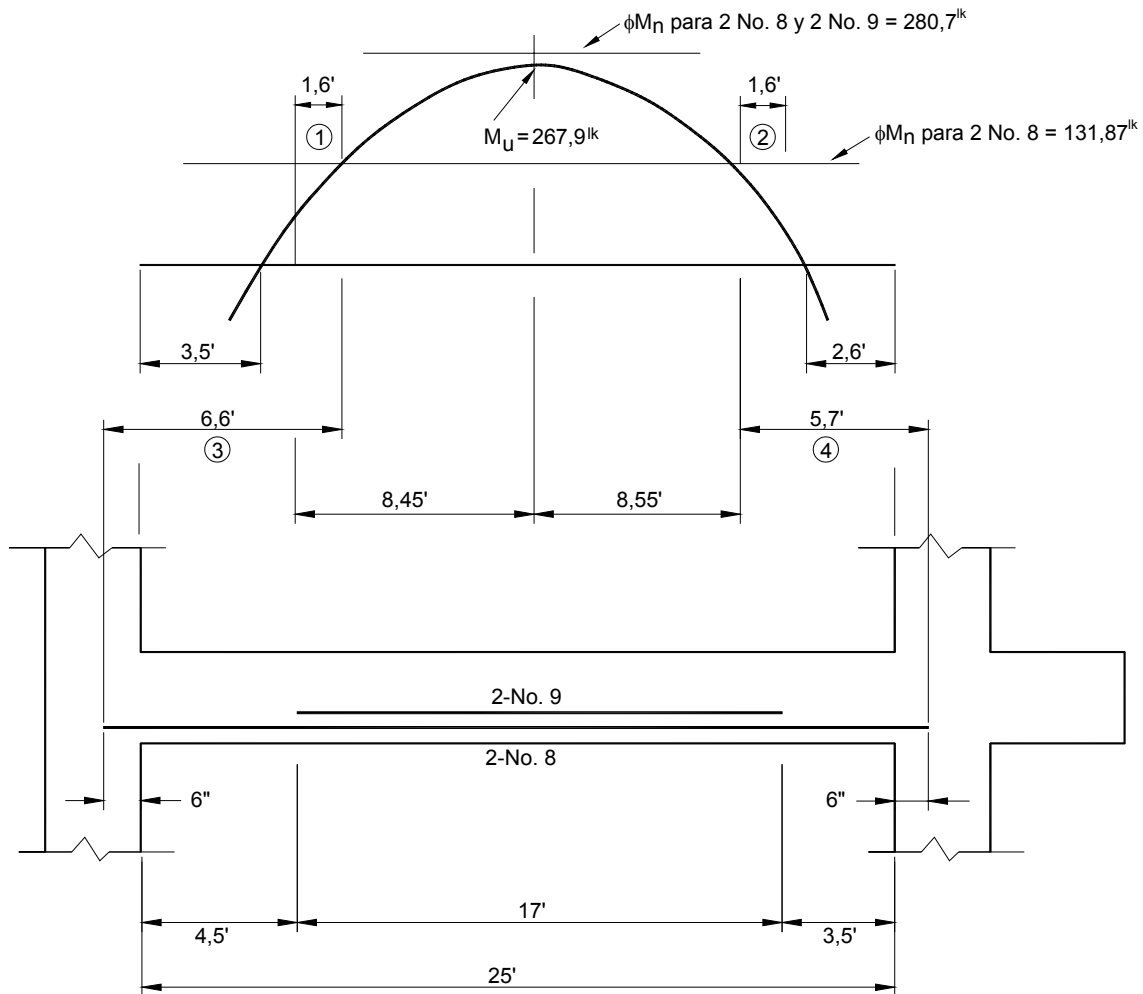
Un cuarto de $(+A_s)$ se debe prolongar dentro del apoyo una distancia mayor o igual que 6 in. Como el artículo 12.13.3 especifica que cada ángulo de doblado de los estribos debe contener una barra o alambre longitudinal, al menos 2 barras se deben prolongar en la totalidad de la longitud del elemento. Prolongar las 2 barras No. 8 en toda la luz (más la prolongación de 6 in. dentro del apoyo), e interrumpir las 2 barras No. 9 dentro del tramo.

b. Determinar la sección donde se interrumpirán las 2 barras No. 9 y verificar los demás requisitos de anclaje.

A continuación ilustramos los diagramas de corte y momento para el estado de carga que provoca el máximo momento positivo mayorado.



La siguiente figura es una ilustración a mayor escala de la parte del diagrama de momentos donde el momento M_u es positivo, incluyendo los momentos resistentes de diseño ϕM_n para la armadura total para momento positivo A_s (2 barras No. 8 y 2 barras No. 9) y para 2 barras No. 8 en forma separada. Para 2 barras No. 8 y 2 barras No. 9: $\phi M_n = 280,7$ ft-kips. Para 2 barras No. 8: $\phi M_n = 131,8$ ft-kips.



Como se puede observar, las 2 barras No. 8 se extienden en la totalidad de la luz, más 6 in. que se prolongan dentro de los apoyos. Las 2 barras No. 9 terminan tentativamente a 4,5 y 3,5 ft de los apoyos exterior e interior, respectivamente. Estas ubicaciones tentativas de las secciones donde se interrumpen las barras No. 9 se determinan de la siguiente manera:

Las dimensiones (1) y (2) deben ser d ó $12d_b$, cualquiera sea el valor que resulte mayor.

12.10.3

$$d = 19,4 \text{ in.} = 1,6 \text{ ft} \text{ (valor determinante)}$$

$$12d_b = 12(1,28) = 13,5 \text{ in.}$$

Las dimensiones (3) y (4) deben ser mayores o iguales que ℓ_d .

12.10.4

Dentro de la longitud de anclaje ℓ_d solamente se están anclando las 2 barras No. 8 (las 2 barras No. 9 ya se anclaron en la longitud de 8,45 ft).

Anclaje para las barras No. 8 ubicadas en las esquinas, ver Tabla 4-2.

$$\ell_d = 47d_b = 47(1,0) = 47 \text{ in.} = 3,9 \text{ ft}$$

Dimensión (3): 6,6 ft > 3,9 ft VERIFICA

Dimensión (4): 5,7 ft > 3,9 ft VERIFICA

Verificar la longitud de anclaje ℓ_d requerida para las 2 barras No. 9. Observar que las 2 barras No. 8 ya están ancladas en la longitud de 4 ft a partir del extremo de las barras.

Separación libre entre las 2 barras No. 9.

$$[16 - 2(1,5) - 2(0,5) - 2(1,0) - 2(1,128)]/3 = 2,58 \text{ in.} = 2,29d_b > 2d_b$$

Para una barra No. 9: $\ell_d = 47d_b$

Tabla 4-2

$$= 47(1,128) = 53 \text{ in.} = 4,4 \text{ ft} < 8,45 \text{ ft} \quad \text{VERIFICA}$$

Para las barras No. 8 verificar los requisitos de anclaje en los puntos de inflexión (P.I.).

12.11.3

$$\ell_d \leq \frac{M_n}{V_u} + \ell_a$$

Ec. (12-3)

Para 2 barras No. 8, $M_n = 131,8/0,9 = 146,4 \text{ ft-kips}$

A la izquierda del P.I.: $V_u = 77,6 - 6(3,5) = 56,6 \text{ kips}$

$$\ell_a = \text{mayor valor entre } 12d_b = 12(1,0) = 12 \text{ in.} \text{ ó } d = 19,4 \text{ in.} \quad (\text{valor determinante})$$

$$\ell_d \leq \frac{146,4 \times 12}{56,6} + 19,4 = 50,5 \text{ in.}$$

Para las barras No. 8: $\ell_d = 47 \text{ in.} < 50,5 \text{ in.}$ VERIFICA

A la derecha del P.I.: $V_u = 56,8 \text{ kips}$; una simple inspección permite determinar que los requisitos de anclaje para las barras No. 8 se VERIFICAN.

Como ambos puntos tentativos de interrupción de la armadura se encuentran en una zona traccionada por flexión se debe satisfacer una de las tres condiciones especificadas en la Sección 12.10.5.

En el punto de interrupción de la izquierda (a 4,5 ft del apoyo):

$$V_u = 77,7 - (4,5 \times 6) = 50,6 \text{ kips}$$

$$\phi V_n = 79,4 \text{ kips} \text{ (estribos en U No. 4 con una separación de 7 in.)}$$

$$2/3(79,4) = 52,9 \text{ kips} > 50,6 \text{ kips} \quad \text{VERIFICA}$$

12.10.5.1

A título ilustrativo, determinar si también se satisface la condición especificada en 12.10.5.3:

$$M_u = 54,1 \text{ ft-kips a } 4,5 \text{ ft del apoyo}$$

$$A_s \text{ requerida} = 0,63 \text{ in.}^2$$

$$\text{Para 2 barras N. 8, } A_s \text{ provista} = 1,58 \text{ in.}^2$$

$$1,58 \text{ in.}^2 > 2(0,63) = 1,26 \text{ in.}^2 \quad \text{VERIFICA} \quad 12.10.5.3$$

$$3/4(79,4) = 59,6 \text{ kips} > 50,6 \text{ kips} \quad \text{VERIFICA} \quad 12.10.5.3$$

Por lo tanto, en la sección donde se interrumpen las barras también se satisface la condición de 12.10.5.3.

En el punto de interrupción de la derecha (a 3,5 ft del apoyo):

$$V_u = 72,4 - (3,5 \times 6) = 51,4 \text{ kips}$$

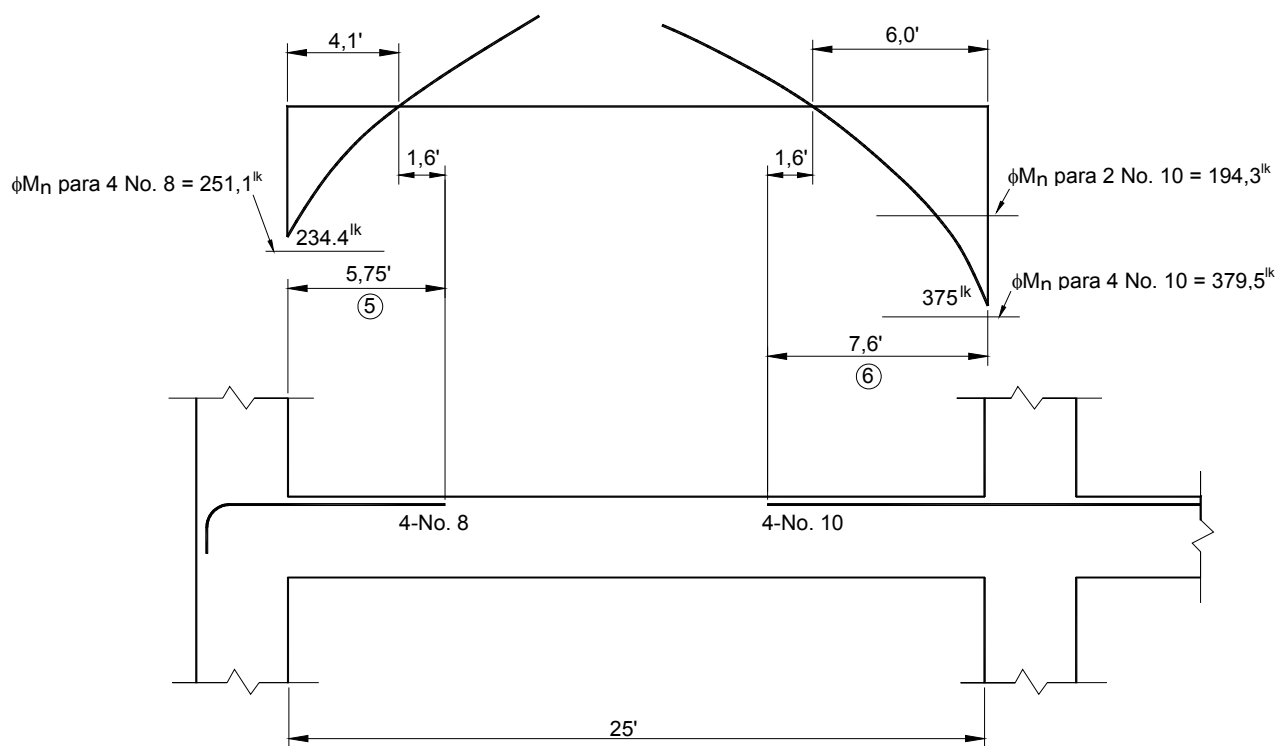
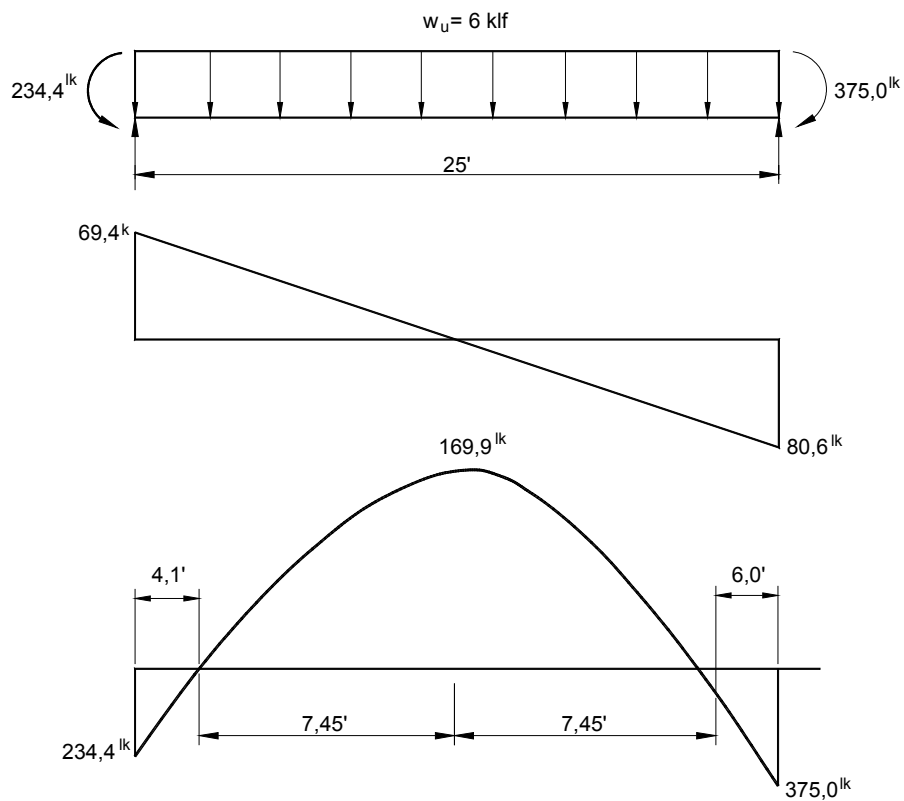
$$2/3(\phi V_n) = 52,9 \text{ kips} > 51,4 \text{ kips} \quad \text{VERIFICA} \quad 12.10.5.1$$

Resumen: Las secciones tentativas elegidas para interrumpir la armadura inferior satisfacen todos los requisitos de anclaje exigidos por el Código. Las 2 barras No. 9 \times 17 ft se tendrían que colocar de forma asimétrica dentro del tramo. Para asegurar la correcta colocación de las barras No. 9 sería prudente especificar para ambas una longitud de 18 ft; de este modo las barras se colocarían de forma simétrica (a 3,5 ft de cada apoyo). En este caso los extremos de estas barras estarían en los puntos de inflexión o próximos a los mismos, con lo cual ya no sería necesario satisfacer las condiciones especificadas en 12.10.5 para el caso de barras que terminan en una zona traccionada. Al final de este ejemplo ilustramos la disposición de armadura recomendada.

3. Longitudes de las barras de la armadura superior.

A continuación ilustramos los diagramas de corte y momento para el estado de carga que provoca los máximos momentos negativos mayorados.

También se ilustran a mayor escala las partes del diagrama de momentos donde el momento M_u es negativo, incluyendo los momentos resistentes de diseño ϕM_n para la armadura total para momento negativo A_s en cada apoyo (4 barras No. 8 en el apoyo exterior y 4 barras No. 10 en el apoyo intermedio) y para 2 barras No. 10 en el apoyo intermedio. Para 4 barras No. 8: $\phi M_n = 251,1 \text{ ft-kips}$. Para 4 barras No. 10: $\phi M_n = 379,5 \text{ ft-kips}$. Para 2 barras No. 10: $\phi M_n = 194,3 \text{ ft-kips}$.



4. Requisitos de anclaje para las 4 barras No. 8 en el apoyo exterior.

a. Número de barras que se deben prolongar.

Como mínimo un tercio de $(-A_s)$ provista en un apoyo se debe prolongar más allá del punto de inflexión una distancia igual al mayor valor entre d , $12d_b$ ó $\ell_n / 16$. 12.12.3

$$d = 19,4 \text{ in.} = 1,6 \text{ ft} \quad (\text{valor determinante})$$

$$12d_b = 12(1,0) = 12,0 \text{ in.}$$

$$\ell_n / 16 = 25 \times 12 / 16 = 18,75 \text{ in.}$$

Como el punto de inflexión está ubicado a apenas 4,1 ft del apoyo, la longitud total de las barras No. 8 será relativamente corta aún con la prolongación de 1,6 ft requerida más allá del punto de inflexión. Verificar la longitud de anclaje requerida ℓ_d para una sección ubicada a 5,75 ft de la cara del apoyo.

La dimensión (5) debe ser mayor o igual que ℓ_d . 12.12.2

Para las barras No. 8, $\ell_d = 47d_b = 47(1,0) = 47 \text{ in.}$ Tabla 4-2

Con 4 barras No. 8 ancladas en la misma sección (cara del apoyo):

Incluyendo el efecto de las barras superiores, $\ell_d = 1,3(47) = 61,1 \text{ in.}$

Para las barras No. 8 superiores, $\ell_d = 61,1 \text{ in.} = 5,1 \text{ ft} < 5,75 \text{ ft}$ VERIFICA

b. Anclaje en la columna exterior.

Las barras No. 8 se pueden anclar en la columna mediante ganchos normales. De la Tabla 4-4, $\ell_{dh} = 19,0 \text{ in.}$ La longitud ℓ_{dh} requerida para el gancho se podría reducir si consideramos el exceso de armadura:

$$\frac{(A_s \text{ requerida})}{(A_s \text{ provista})} = \frac{2,93}{3,16} = 0,93$$

$$\ell_{dh} = 19 \times 0,93 = 17,7 \text{ in.}$$

La profundidad total requerida para la columna sería de $17,7 + 2 = 19,7 \text{ in.}$

5. Requisitos de anclaje para las 4 barras No. 10 en la columna interior.

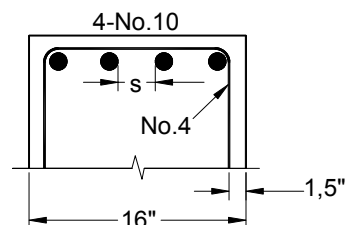
a. Prolongación requerida para un tercio de $(-A_s)$.

12.12.3

$$d = 19,4 \text{ in.} = 1,6 \text{ ft} \quad (\text{valor determinante})$$

$$12d_b = 12(1,27) = 15,24 \text{ in.}$$

$$\ell_n / 16 = 18,75 \text{ in.}$$



$$\begin{aligned}\text{Separación libre para las barras No. 10} &= [16 - 2(1,5) - 2(0,5) - 4(1,27)] / 3 \\ &= 2,31 \text{ in.} = 1,82 d_b > d_b \\ \text{Separación entre centros} &= 2,82 d_b\end{aligned}$$

$$\text{Recubrimiento} = 1,5 + 0,5 = 2,0 \text{ in.} = 1,57 d_b > d_b$$

$$\text{Distancia entre el centro de una barra y la superficie de hormigón} = 1,57 d_b + 0,5 d_b = 2,07 d_b$$

Con la armadura mínima de corte provista e incluyendo el efecto de las barras superiores:

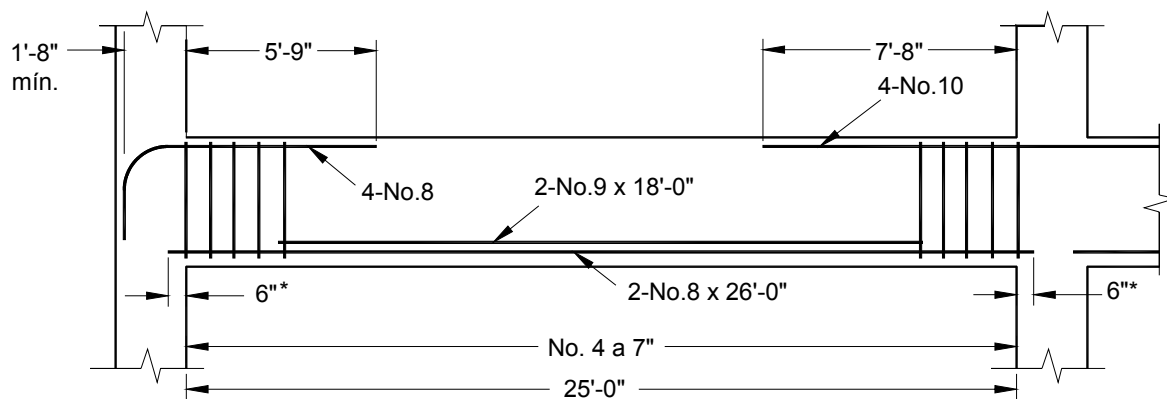
$$\ell_d = 1,3(47 d_b)$$

Tabla 4-2

$$= 1,3(47)(1,27) = 77,6 \text{ in.}$$

$$\text{Dimensión (6)} = 6,0 \text{ ft} + 1,6 \text{ ft} = 7,6 \text{ ft} > \ell_d = 77,6 \text{ in.} = 6,5 \text{ ft} \quad \text{VERIFICA}$$

6. Resumen: La siguiente figura ilustra las longitudes seleccionadas para las barras de la armadura superior e inferior.



* Ver 12.11.1

7. Requisitos suplementarios

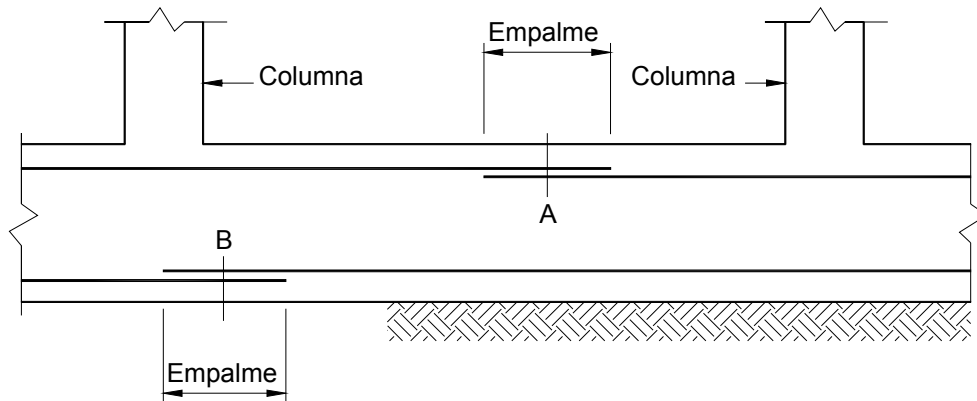
Si esta viga fuera parte del sistema principal que resiste las cargas laterales, las 2 barras inferiores No. 8 que se prolongan dentro de los apoyos se deberían anclar de manera que pudieran desarrollar la tensión de fluencia de las barras en la cara de los apoyos. En la columna exterior el anclaje se puede materializar mediante un gancho normal. El ancho de apoyo mínimo (profundidad total de la columna) requerida para anclar una barra No. 8 terminada en un gancho normal depende de la longitud de anclaje ℓ_{dh} indicada en la Tabla 4-4, y de los factores de modificación aplicables (12.5.3).

12.11.2

En la columna interior, las 2 barras No. 8 se podrían prolongar una distancia ℓ_d más allá de la cara del apoyo hacia el tramo adyacente, o se las podría empalmar por yuxtaposición con la prolongación de las barras del tramo adyacente. Considerar un anclaje por yuxtaposición Clase A adecuado para satisfacer la intención de 12.11.2.

Ejemplo 4.5 – Empalmes por yuxtaposición solicitados a tracción

Diseñar los empalmes por yuxtaposición solicitados a tracción para la viga a nivel del plano de fundación ilustrada.



Datos para el diseño:

$$f'_c = 4000 \text{ psi}$$

$$f_y = 60.000 \text{ psi, barras sin revestimiento epoxi}$$

$$b = 16 \text{ in.}$$

$$h = 30 \text{ in.}$$

$$\text{Recubrimiento de las barras} = 3,0 \text{ in.}$$

$$4 \text{ barras No. 9 superiores e inferiores (continuas)}$$

$$\text{Estribos No. 4 con una separación de 14 in. (toda la luz)}$$

$$+M_u \text{ en B} = 340 \text{ ft-kips}$$

$$-M_u \text{ en A} = 120 \text{ ft-kips}$$

Preferentemente los empalmes se deben ubicar lejos de las zonas fuertemente traccionadas. En una típica viga a nivel del plano de fundación, las barras superiores se deberían empalmar debajo de las columnas, mientras que las barras inferiores se deberían empalmar aproximadamente a la mitad de la distancia entre columnas. Aunque en este ejemplo el empalme en A no se encuentra en la posición recomendada, el momento en A es relativamente pequeño. Para los fines de este ejemplo asumir que los empalmes deben estar en las ubicaciones indicadas en la figura.

Cálculos y discusión

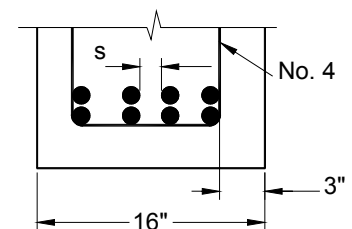
Referencia del Código

En este ejemplo realizaremos los cálculos de acuerdo con la Sección 12.2.3.

Diámetro nominal de una barra No. 9 = 1,128 in.

Suponiendo que todas las barras se empalman en la misma sección,

$$\begin{aligned} \text{Separación libre} &= [16 - 2(\text{recubrimiento}) - 2(\text{estribos No. 4}) - 4(\text{barras No. 9})] / 3 \\ &= [16 - 2(3,0) - 2(0,50) - 4(1,128)] / 3 \\ &= 1,50 \text{ in.} \\ &= 1,33d_b \end{aligned}$$



Separación entre los centros de las barras ancladas = $1,50 + 1,128 = 2,63 \text{ in.} = 2,33d_b$

Recubrimiento libre = $3,0 + 0,5 = 3,5 \text{ in.} = 3,1d_b$

Distancia entre el centro de una barra y la superficie de hormigón = $3,0 + 0,5 + (1,128/2) = 4,1 \text{ in.} = 3,6d_b$

c = el menor de los valores que se obtienen de: (1) la distancia entre el centro de la barra o alambre anclado y la superficie de hormigón más próxima; o (2) la mitad de la separación entre los centros de las barras o alambres que se anclan.

$$c = 3,6d_b$$

$$= 2,33d_b / 2 = 1,17d_b \quad (\text{valor determinante})$$

Empalme por yuxtaposición de la armadura inferior en la Sección B

$$\ell_d = \left(\left(\frac{3}{40} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) \left(\frac{\alpha\beta\gamma\lambda}{\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) \right) d_b \quad \text{Ec. (12-1)}$$

$$\alpha = 1,0 \quad (\text{barras inferiores})$$

$$\beta = 1,0 \quad (\text{barras sin revestimiento epoxi})$$

$$\gamma = 1,0 \quad (\text{barras No. 7 y mayores})$$

$$\lambda = 1,0 \quad (\text{hormigón de peso normal})$$

$$c = 1,17d_b \quad (\text{calculado en el punto anterior})$$

$$K_{tr} = \frac{A_{tr} f_{yt}}{1500 s n}$$

$$A_{tr} = \text{área de 2 estribos No. 4} = 2(0,2) = 0,4 \text{ in.}^2$$

$$s = 14 \text{ in.} \quad (\text{separación})$$

$$n = 4 \quad (\text{se están anclando 4 barras})$$

$$K_{tr} = \frac{0,4(60.000)}{1500(14)(4)} = 0,29 \text{ in.} = 0,26d_b$$

$$\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right) = 1,17 + 0,26 = 1,43 < 2,5 \quad \text{VERIFICA}$$

12.2.3

$$\ell_d = \frac{3(60.000)(1,0)(1,0)(1,0)(1,0)}{40\sqrt{4000}(1,43)}(1,128) = 56,1 \text{ in.}$$

$$A_s \text{ requerida } (+M_u \text{ en B} = 340 \text{ ft-kips}) = 3,11 \text{ in.}^2$$

$$A_s \text{ provista (4 barras No. 9)} = 4,00 \text{ in.}^2$$

$$\frac{A_s \text{ provista}}{A_s \text{ requerida}} = \frac{4,00}{3,11} = 1,29 < 2$$

$$\text{Empalme Clase B requerido} = 1,3\ell_d$$

12.15.1

12.15.2

Nota: Aunque los empalmes estuvieran escalonados (A_s empalmada = 50%), cuando (A_s provista / A_s requerida) < 2 se deben usar empalmes Clase B.

$$\text{Empalme Clase B} = 1,3\ell_d = 1,3(56,1) = 72,9 \text{ in.} = 6,1 \text{ ft}$$

Es mejor que los empalmes estén escalonados. De este modo la separación libre entre las barras empalmadas aumentará, y habrá una potencial reducción de la longitud de anclaje.

$$\text{Separación libre} = 2(1,50) + 1,128 = 4,13 \text{ in.} = 3,66 d_b$$

$$\text{Separación entre los centros de las barras que se empalman} = 3,66 d_b + d_b = 4,66 d_b$$

$$\text{Distancia entre el centro de una barra y la superficie de hormigón} = 3,6 d_b$$

$$\text{Por lo tanto, } c = \frac{4,66 d_b}{2} = 2,33 d_b$$

$$K_{tr} = \frac{2(0,2)(60.000)}{(1500)(14)(2)} = 0,57 \text{ in.} = 0,51 d_b$$

$$\text{Por lo tanto, } \left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right) = 2,33 + 0,51 = 2,84 > 2,5 \quad \text{Usar } 2,5$$

12.2.3

$$\ell_d = \frac{3(60.000)(1,0)(1,0)(1,0)(1,0)}{40\sqrt{4000}(2,5)}(1,128) = 32,1 \text{ in.}$$

$$\text{Empalme Clase B} = 1,3(32,1) = 41,7 \text{ in.} = 3,5 \text{ ft}$$

Usar un empalme por yuxtaposición de 3 ft-6 in. en B, y alternar los demás empalmes.

Empalme por yuxtaposición de la armadura superior en la Sección A

Como la armadura superior y la armadura inferior son del mismo tamaño, las longitudes de anclaje y empalme de las barras superiores serán iguales a las de las barras inferiores, multiplicadas por el factor 1,3 que se aplica cuando se trata de barras superiores. Además, como los momentos mayorados positivos y negativos son

diferentes, es posible que la relación entre la armadura provista y la armadura requerida afecte el tipo de empalme, tal como se demuestra a continuación.

$$A_s \text{ requerida } (+M_u \text{ en A} = 120 \text{ ft-kips}) = 1,05 \text{ in.}^2$$

$$A_s \text{ provista} / A_s \text{ requerida} = 4,00 / 1,05 = 3,81 > 2$$

Si los empalmes se escalonan como mínimo una longitud de empalme de manera que se verifique $A_s \text{ empalmada} = 50\%$:

Se puede usar un empalme Clase A = $1,0\ell_d$

12.15.2

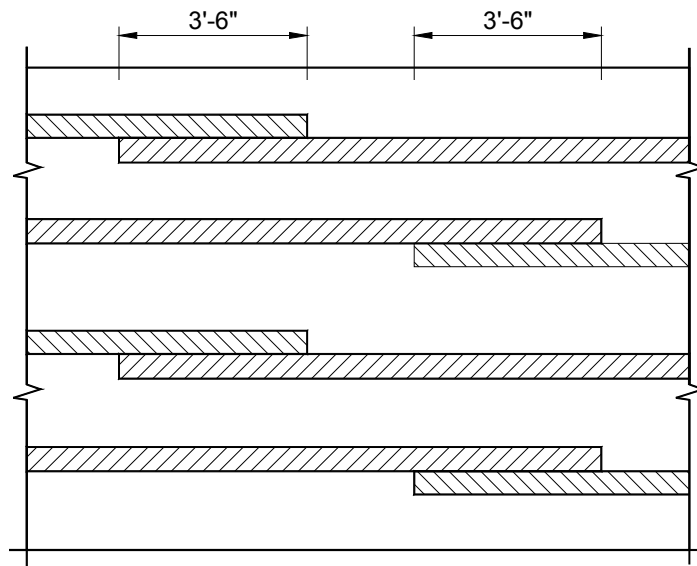
Si todas las barras se empalman en la misma ubicación (dentro de la longitud de empalme requerida):

Se debe usar un empalme Clase B = $1,3\ell_d$

Suponiendo que los empalmes están empalmados en secciones alternadas, el multiplicador para las barras superiores será igual a 1,3.

$$\text{Empalme Clase A} = 1,3(1,0)(32,1) = 41,7 \text{ in.} = 3,5 \text{ ft}$$

Usar un empalme por yuxtaposición de 3 ft-6 in. en la sección A, y alternar los demás empalmes.



Disposición alternada o escalonada de los empalmes
(Nota: Las barras se superponen verticalmente)

Ejemplo 4.6 – Empalmes por yuxtaposición solicitados a compresión

El siguiente ejemplo ilustra los cálculos típicos requeridos para los empalmes por yuxtaposición de las barras de las columnas con estribos cerrados y zunchos.

Cálculos y discusión

Referencia del Código

1. Diseñar un empalme por yuxtaposición comprimido para la columna con estribos cerrados ilustrada a continuación. Asumir que todas las barras están siempre comprimidas para las combinaciones de cargas mayoradas consideradas en el diseño (Zona 1 de la Figura 4-21). Ver también la Tabla 4-8.

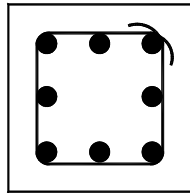
$$b = 16 \text{ in.}$$

$$h = 16 \text{ in.}$$

$$f'_c = 4000 \text{ psi}$$

$$f_y = 60.000 \text{ psi}$$

8 barras No. 9



- a. Determinar la longitud de empalme por yuxtaposición:

12.16.1

Para $f_y = 60.000 \text{ psi}$:

$$\begin{aligned} \text{Longitud de empalme} &= 0,0005 f_y d_b ; \text{ pero nunca menor que } 12 \text{ in.} \\ &= 0,0005 (60.000) 1,128 = 34 \text{ in.} \end{aligned}$$

- b. Determinar los estribos cerrados requeridos para que esté permitido reducir la longitud de empalme multiplicando por 0,83.

12.17.2.4

Estribos cerrados requeridos: Estribos No. 3 con una separación de 16 in. entre sus centros.

7.10.5.2

Separación de los estribos No. 3 requerida para reducir la longitud de empalme:

$$\text{Área efectiva de los estribos} \geq 0,0015 h s$$

$$(2 \times 0,11) \geq 0,0015 \times 16 s$$

$$s = 9,2 \text{ in.}$$

Debemos reducir la separación entre los centros de los estribos a 9 in. en toda la longitud de empalme, para permitir una longitud de empalme igual a $0,83 (34 \text{ in.}) = 28 \text{ in.}$

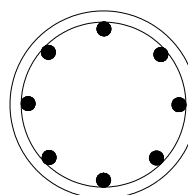
2. Determinar la longitud de empalme por yuxtaposición para la columna zunchada ilustrada a continuación.

$$f'_c = 4000 \text{ psi}$$

$$f_y = 60.000 \text{ psi}$$

8 barras No. 9

Zunchos No. 3



a. Determinar la longitud de empalme por yuxtaposición: 12.16.1

Para las barras confinadas por zunchos, la longitud de empalme "básica" se puede multiplicar por el factor 0,75. 12.17.2.5

Para $f_y = 60.000$ psi :

Longitud de empalme = $0,75(34) = 26$ in.

Nota: También se podrían utilizar empalmes por contacto a tope, empalmes soldados o conexiones mecánicas. 12.16.3
12.16.4

Ejemplo 4.7 – Empalmes por yuxtaposición en una columna

Diseñar un empalme por yuxtaposición para la columna zunchada detallada a continuación.

- Barras que continúan de la columna superior: 4 barras No. 8
- Barras dobladas en espera de la columna inferior: 4 barras No. 8

$$f'_c = 4000 \text{ psi}$$

$$f_y = 60.000 \text{ psi}$$

$$b = h = 16 \text{ in.}$$

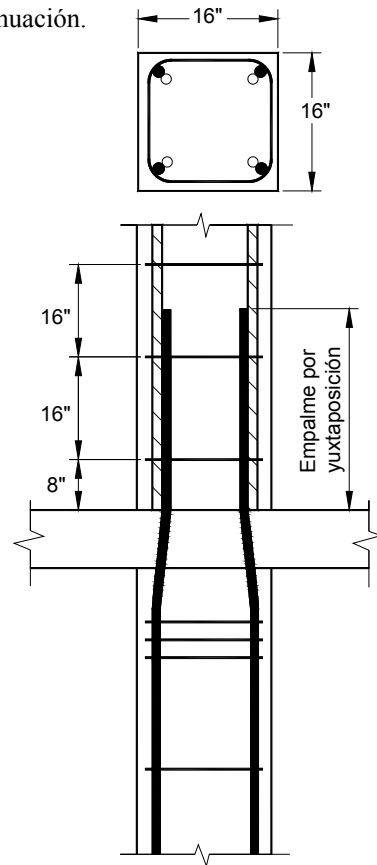
4 barras No. 8 (por encima y por debajo de la losa)

Estribos No. 3 separados 16 in.

Recubrimiento = 1,5 in.

El empalme por yuxtaposición se debe diseñar para las siguientes combinaciones de cargas:

1. $P_u = 465 \text{ kips}$
 $M_u = 20 \text{ ft-kips}$
2. $P_u = 360 \text{ kips}$
 $M_u = 120 \text{ ft-kips}$
2. $P_u = 220 \text{ kips}$
 $M_u = 100 \text{ ft-kips}$



Cálculos y discusión

Referencia del Código

1. Determinar el tipo de empalme requerido.

12.17.2

El tipo de empalme a utilizar depende de la tensión que provocan en las barras en la ubicación del empalme todas las combinaciones de cargas mayoradas consideradas en el diseño de la columna. Para los fines del diseño, el tipo de empalme se determinará considerando en cuál zona o zonas del diagrama de interacción de resistencias están ubicadas todas las combinaciones de cargas mayoradas aplicables. Ver la discusión anterior del punto 12.17.2 y la Figura 4-21. A continuación ilustramos el diagrama de interacción de resistencias para la columna de 16 × 16 in. con 4 barras No. 8, en el cual hemos graficado las tres combinaciones de cargas mayoradas consideradas para el diseño de la columna.

Observar que la combinación (2) fue la que determinó el diseño de la columna (selección de 4 barras No. 8).

Tabla 4-8

Cuando actúa la combinación (1) todas las barras están comprimidas (Zona 1) y se podría utilizar un empalme de compresión. Cuando actúa la combinación (2) la tracción en las barras no es mayor que $0,5f_y$ (Zona 2), por lo cual se requiere un empalme de tracción Clase B, aunque también se podría utilizar un empalme Clase A si los empalmes están escalonados. Para la combinación (3) la tensión en las barras es mayor que $0,5f_y$ (Zona 3), y esto significa que se debe utilizar un empalme Clase B.

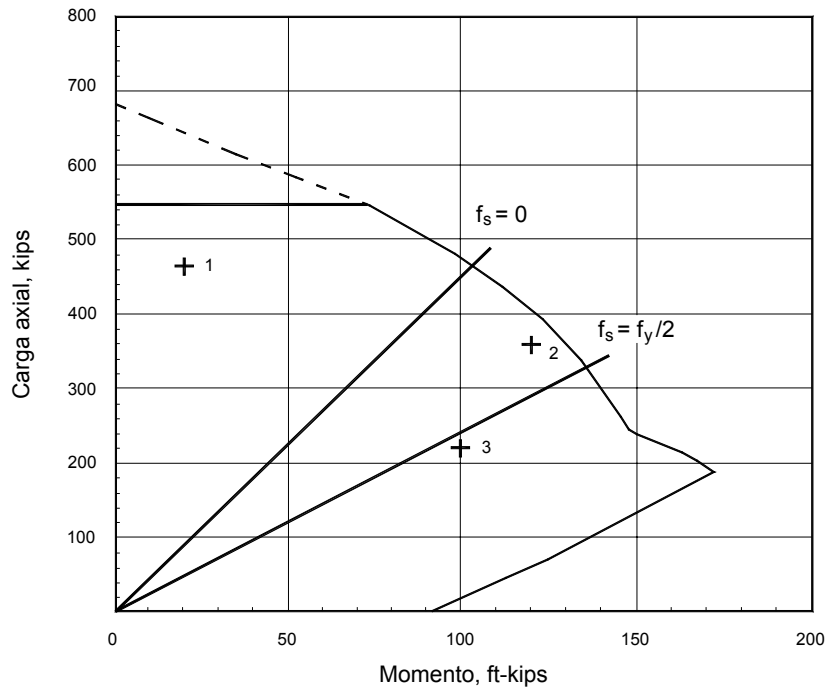


Diagrama de interacción para la columna de 16 × 16 in.

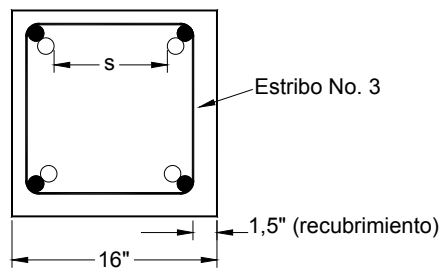
Los empalmes por yuxtaposición requeridos para las 4 barras No. 8 se deben determinar en base a la combinación de cargas que produce la mayor tracción en las barras. Para este ejemplo, será la combinación (3) la que determine el tipo de empalme a utilizar.

$$\text{Empalme Clase B requerido} = \ell_d = 1,3\ell_{db}$$

12.15.1

2. Determinar la longitud de empalme por yuxtaposición.

Determinar la longitud de anclaje en tracción de acuerdo con 12.2.3.



Diámetro nominal de una barra No. 8 = 1,00 in.

La separación libre entre las barras a anclar es grande, y por lo tanto no determinará el diseño.

$$\text{Recubrimiento libre} = 1,5 + 0,375 = 1,875 \text{ in.} = 1,875 d_b$$

$$\text{Distancia desde el centro de una barra hasta la superficie de hormigón} = 1,875 + 0,5 = 2,375 \text{ in} = 2,375 d_b$$

c = el menor de los valores que se obtienen de: (1) la distancia entre el centro de la barra anclada y la superficie de hormigón más próxima; o (2) la mitad de la separación entre los centros de las barras o alambres que se anclan.

$$c = 2,375 d_b$$

$$\ell_d = \left(\left(\frac{3}{40} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) \left(\frac{\alpha \beta \gamma \lambda}{\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) \right) d_b \quad \text{Ec. (12-1)}$$

$$\alpha = 1,0 \text{ (barras verticales)}$$

12.2.4

$$\beta = 1,0 \text{ (barras no revestidas)}$$

$$\gamma = 1,0 \text{ (barras No. 7 y mayores)}$$

$$\lambda = 1,0 \text{ (hormigón de peso normal)}$$

$$c = 2,375 d_b$$

$$K_{tr} = \frac{A_{tr} f_{yt}}{1500 s n}$$

$$A_{tr} = \text{área de 2 estribos No. 3}$$

$$s = 16 \text{ in. (separación)}$$

$$n = 2 \text{ (en una cara de la columna se anclan 2 barras)}$$

$$K_{tr} = \frac{2(0,11)(60.000)}{1500(16)(2)} = 0,275 \text{ in.} = 0,275 d_b$$

$$\left(\frac{c + K_{tr}}{d_b} \right) = 2,375 + 0,275 = 2,65 > 2,5 \quad \text{Usar 2,5} \quad 12.2.3$$

$$\ell_d = \frac{3(60.000)(1,0)(1,0)(1,0)(1,0)}{40\sqrt{4000}(2,5)}(1,00) = 28,5 \text{ in.}$$

$$\text{Empalme Clase B} = 1,3(28,5) = 37 \text{ in.}$$

En el nivel de piso indicado usar empalmes por yuxtaposición de 37 in. en las 4 barras No. 8.