

CAPÍTULO VI

ELEMENTOS ESTRUCTURALES

6.1. Introducción

Los criterios que se exponen en este capítulo tienen como objetivo conseguir que los puentes situados en zona sísmica tengan las características de ductilidad necesarias, compatibles con la definición de la acción sísmica y los requisitos de comportamiento exigidos.

En estructuras a las que se exige comportamiento dúctil, estos criterios aseguran, en términos de curvaturas y rotaciones, que las zonas donde se prevé la formación de rótulas plásticas tengan una capacidad de deformación suficiente para garantizar dicho comportamiento.

En estructuras a las que se exige un comportamiento con ductilidad limitada, en este capítulo se establecen unos requerimientos mínimos específicos para las zonas críticas. En estructuras con comportamiento elástico, aunque estrictamente no requieran detalles específicos, se recomienda la aplicación de algunas condiciones mínimas.

Los criterios contenidos en este capítulo son aplicables a las pilas y a los nudos de unión entre éstas y la cimentación o el tablero. Los aspectos específicos de los apoyos y los conectores sísmicos se tratan en el capítulo 7 y los relativos a cimientos y estribos, en el capítulo 8.

6.2. Elementos estructurales de hormigón

Los elementos estructurales de hormigón deberán cumplir los requisitos que figuran en la Instrucción EHE para estructuras sometidas a la acción sísmica. En concreto, se tendrán en cuenta los aspectos siguientes:

- Criterios generales de armado en zona sísmica.
- Exigencias dimensionales para pilas huecas, que limiten la esbeltez de las paredes.
- Criterios para la armadura longitudinal en pilas, que permitan conseguir la ductilidad prevista.
- Armadura transversal de confinamiento en pilas. En el caso de estructuras con comportamiento dúctil o de ductilidad limitada, deberá disponerse una armadura transversal de confinamiento en las zonas de rótulas plásticas, con unas exigencias específicas en cuanto a su cuantía mecánica, disposición geométrica y anclaje.
- Armado de nudos de unión entre pilas y tablero o cimentación. Los detalles de armado y la solución de anclaje de barras se realizarán teniendo en cuenta que, durante la actuación del sismo, se puede producir la inversión de esfuerzos. En el caso de pilas empotradas en el tablero, será necesario estimar un ancho de tablero que será efectivo para la transmisión de momentos.

6.3. Elementos estructurales metálicos

Las uniones situadas en zonas de disipación de energía, zonas de rótulas plásticas, deberán proyectarse y ejecutarse de forma que se minimice la concentración de deformaciones plásticas, la generación de tensiones residuales y la aparición de defectos de fabricación. Las uniones soldadas situadas en estas zonas serán a tope con penetración total.

En las zonas de disipación de energía y en las zonas protegidas por capacidad, todas las uniones atornilladas o con soldaduras en ángulo se proyectarán con una sobre-resistencia de al menos un 20% respecto a lo que establece la normativa de elementos metálicos.

6.4. Elementos estructurales mixtos

Son de aplicación los criterios generales de armado en zona sísmica para elementos estructurales de hormigón, a los que se hace referencia en el apartado 6.2, y los indicados en el apartado 6.3 para elementos estructurales metálicos.

Las pilas mixtas deben cumplir unas exigencias dimensionales que limiten la esbeltez de las paredes metálicas en función de la ductilidad prevista para la estructura.

Cuando las chapas no dispongan de conexión específica con el hormigón, sólo podrá considerarse su contribución a la capacidad resistente de la sección mixta si se encuentran en la zona comprimida de la sección.

En el caso de pilas con sección cajón o tubos rellenos de hormigón, la parte metálica de la sección podrá considerarse, en la zona de rótulas plásticas, como armadura transversal de confinamiento mencionada en el apartado 6.2. En este caso, si además se ha considerado la sección metálica contribuyendo a resistir tensiones longitudinales deberá comprobarse el estado de tensiones bidimensional generado.

Comentarios

C.6.1. Introducción

La mayoría de los criterios que se establecen en este capítulo son un conjunto de requisitos dimensionales y de disposición de armaduras que aseguran un comportamiento dúctil, de acuerdo con la experimentación disponible y el comportamiento real de estructuras sometidas a sismo. Como generalmente no se permite la formación de rótulas plásticas en el tablero, no es necesario definir criterios específicos para el mismo.

En estructuras de hormigón, los requisitos relativos a dimensiones mínimas o a cuantías máximas están, en general, establecidos para evitar una excesiva concentración de armaduras o una inadecuada ejecución de las zonas de mayor responsabilidad estructural. Los requisitos relativos a armaduras longitudinales, tanto en lo que se refiere a cuantías mínimas en secciones como a la distribución de armadura a lo largo del elemento, están establecidos teniendo en cuenta principalmente la reversibilidad de momentos y la modificación de las leyes de esfuerzos en el elemento debido al comportamiento no lineal previsto.

Los requisitos relativos a las armaduras transversales están establecidos, principalmente, con el fin de confinar el hormigón comprimido, evitar el pandeo de la armadura comprimida y aumentar la resistencia a cortante.

Por último, los criterios generales relativos a las condiciones de anclaje se establecen para tener en cuenta el deterioro de estas características resistentes debido a la acción de cargas cíclicas alternadas.

C.6.2. Elementos estructurales de hormigón

A falta de otras prescripciones en la normativa vigente, se puede considerar que la compatibilidad entre las características de ductilidad necesarias y la definición de la acción sísmica y los requisitos de comportamiento exigidos, queda asegurada si se cumplen los criterios recogidos a continuación.

A efectos de la aplicación de dichos criterios, se consideran pilas, es decir, elementos trabajando fundamentalmente a compresión, aquéllos en los que el axil reducido h_k para la situación sísmica, según la expresión (4.2), sea $\eta_k \geq 0,08$.

— Criterios generales de armado

El diámetro mínimo tanto de armaduras longitudinales como transversales es de 10 mm.

La longitud de anclaje de las armaduras se aumenta en 10 diámetros respecto a la necesaria en situación no sísmica.

Los empalmes de armaduras están alejados, en lo posible, de las zonas en donde se prevea la formación de rótulas plásticas.

— Exigencias dimensionales para pilas huecas

En pilas huecas de sección cajón, mono o multicelular, la esbeltez de las paredes es menor que los valores que se indican en la tabla C.6.1.

donde:

- q Factor de comportamiento.
- b Longitud libre de la pared.
- t Espesor de la pared.

TABLA C.6.1

Valores límite de la esbeltez de paredes en pilas huecas

| Factor de comportamiento | b/t |
|--------------------------|-------|
| $q > 1,5$ | 8 |
| $1,5 \geq q > 1,0$ | 10 |
| $q = 1,0$ | 15 |

En pilas huecas de sección circular, son válidos los límites indicados en la tabla anterior, siendo b el diámetro interior de la sección.

— Criterios para la armadura longitudinal en pilas

Para estructuras proyectadas con comportamiento dúctil, la cuantía geométrica de armadura longitudinal cumple:

- En zonas en que no se realicen solapes:

$$1\% \leq \frac{A_s}{A_c} < 3\%$$

siendo A_s el área de la armadura longitudinal y A_c el área de la sección de hormigón.

- En las zonas de solape de armaduras, se admite un valor máximo de cuantía del 6%.
- La separación máxima de las barras longitudinales no excede 250 mm.

Para estructuras proyectadas con ductilidad limitada o con comportamiento elástico, son de aplicación los criterios para estructuras en zonas no sísmicas.

— Armadura transversal de confinamiento en pilas

En el caso de estructuras con comportamiento dúctil o de ductilidad limitada, el adecuado comportamiento de las zonas de rótulas plásticas podrá asegurarse mediante la disposición de una armadura transversal de confinamiento no menor que los valores indicados en este comentario.

No será necesaria armadura de confinamiento en pilas huecas si el axil reducido es $\eta_k \leq 0,2$.

Adicionalmente, no será necesaria armadura de confinamiento en pilas huecas si, para la combinación sísmica, se puede alcanzar una ductilidad en términos de curvatura de valor $\mu_c \geq 13$, para puentes con comportamiento dúctil, o bien $\mu_c \geq ntes$ con ductilidad limitada, con una deformación unitaria máxima del hormigón comprimido menor que $\epsilon_w = 0,35\%$.

La cuantía mecánica de la armadura transversal de confinamiento ω_{wd} debe cumplir las condiciones siguientes:

- En el caso de cercos rectangulares y horquillas:

$$\omega_{wd,r} \geq \max \left[\omega_{w,req}, \frac{2}{3} \omega_{w,min} \right]$$

donde:

$$\omega_{w,req} = \frac{A_c}{A_{cc}} \lambda \eta_k + 0,13 \frac{f_{yd}}{f_{cd}} (\rho_L - 0,01)$$

siendo:

- $\omega_{w,min}$ Factor especificado en la tabla 6.2.
- A_c Área de la sección de hormigón.
- A_{cc} Área del núcleo confinado de la sección.
- λ Factor especificado en la tabla 6.2.
- η_k Axil reducido.
- ρ_L Cuantía geométrica de la armadura longitudinal.

TABLA C.6.2

| Comportamiento estructural | λ | $\omega_{w,min}$ |
|----------------------------|-----------|------------------|
| Dúctil | 0,37 | 0,18 |
| Ductilidad limitada | 0,28 | 0,12 |

Esta condición debe verificarse en las dos direcciones transversales.

- En el caso de cercos circulares o espirales:

$$\omega_{wd,c} \geq \max [1,4 \omega_{w,req}, \omega_{w,min}]$$

con $\omega_{w,req}$ según la expresión anterior y $\omega_{w,min}$ según la tabla C.6.2.

La cuantía mecánica de la armadura de confinamiento se define mediante la expresión siguiente:

$$\rho_w = \rho_w \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

donde:

- ρ_w Cuantía geométrica de confinamiento.
- f_{yd} Valor de cálculo del límite elástico del acero.
- f_{cd} Resistencia de cálculo del hormigón.

La definición de ρ_w depende del tipo de sección transversal de las pilas.

- Para secciones rectangulares:

$$\rho_{w,r} = \frac{A_{sw}}{s \cdot b}$$

donde:

$\rho_{w,r}$ Cuantía geométrica de confinamiento para secciones rectangulares.

A_{sw} Área total de cercos y horquillas en la dirección de confinamiento estudiada (cuando los cercos o horquillas estén inclinados un ángulo α a respecto de la dirección de confinamiento considerada, se contabilizará un área igual al área de la barra multiplicada por $\cos \alpha$).

s Separación de los cercos y horquillas en la dirección del eje de la pila, con las limitaciones siguientes:

$s \leq 6$ veces el diámetro de la armadura longitudinal.

$s \leq 1/5$ de la menor dimensión del núcleo confinado.

b Dimensión del núcleo confinado perpendicular a la dirección de confinamiento estudiada.

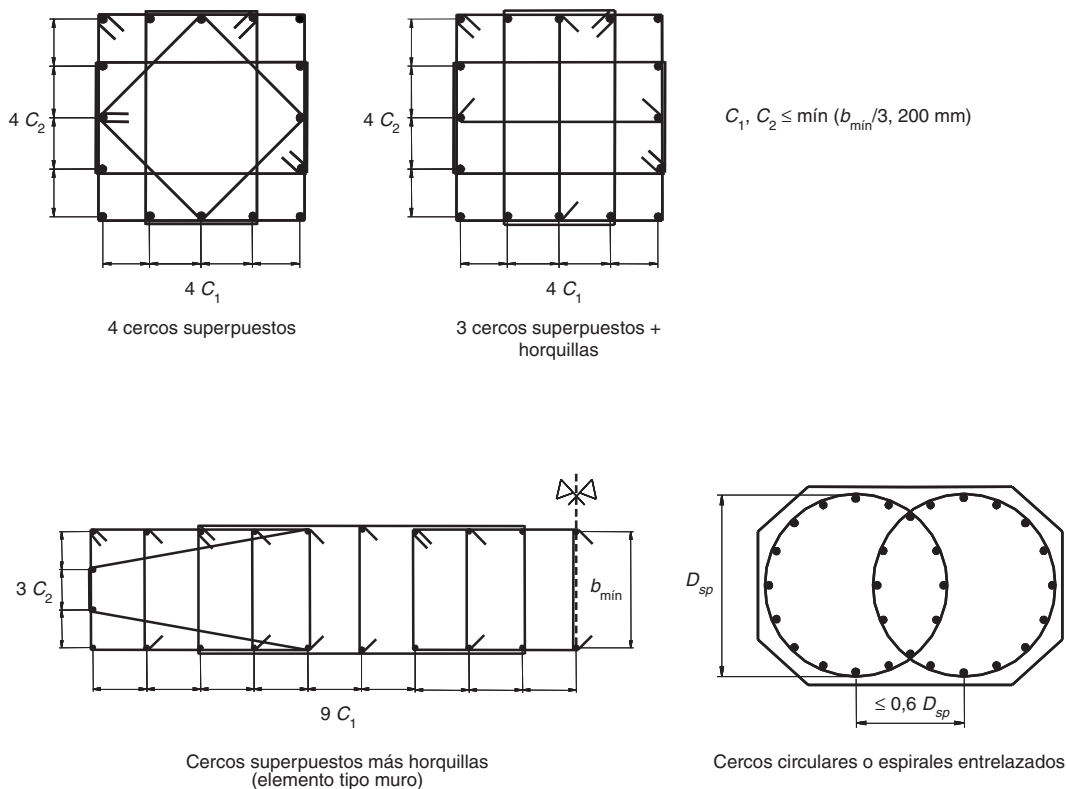


Figura C.6.1. Disposiciones geométricas relativas a las armaduras transversales de confinamiento en zonas de rótulas plásticas

- Para secciones circulares:

$$\rho_{w,c} = 4 \frac{A_{sp}}{D_{sp} \cdot s}$$

donde:

$\rho_{w,c}$ Cuantía geométrica de confinamiento para secciones circulares.

A_{sp} Área de un cerco circular o espiral.

D_{sp} Diámetro de un cerco circular o espiral.

s Separación de los cercos o paso de la espiral, con las limitaciones siguientes:

$s \leq 6$ veces el diámetro de la armadura longitudinal.

$s \leq 1/5$ del diámetro del núcleo confinado.

Además, la armadura transversal de confinamiento debe cumplir las condiciones siguientes:

- La distancia C entre dos ramas de los cercos u horquillas que constituyen la armadura de confinamiento en una sección rectangular no será mayor que $1/3$ de la menor dimensión del núcleo confinado, ni mayor de 200 mm, tal como se indica en la figura C.6.1. Si la armadura está compuesta por cercos circulares o espirales, la distancia entre ellos cumplirá la condición indicada en la figura C.6.1.
- La separación máxima de la armadura transversal de confinamiento fuera de la zona de rótula plástica será, dependiendo de las características de ductilidad exigidas a la estructura, el menor de los valores indicados en la tabla C.6.3.

TABLA C.6.3

Separación máxima de la armadura transversal de confinamiento fuera de las rótulas plásticas

| Comportamiento estructural | Separación máxima | | | |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|--------|--------------------|
| Dúctil $q > 1,50$ | $b/4$ | $6 \varnothing_L$ | 100 mm | $24 \varnothing_T$ |
| Ductilidad limitada $1,50 \geq q > 1$ | $b/3$ | $8 \varnothing_L$ | 150 mm | $24 \varnothing_T$ |

Donde: b Dimensión menor de la sección del elemento estructural.
 \varnothing_L Diámetro de la barra longitudinal de menor diámetro.
 \varnothing_T Diámetro de la barra transversal.

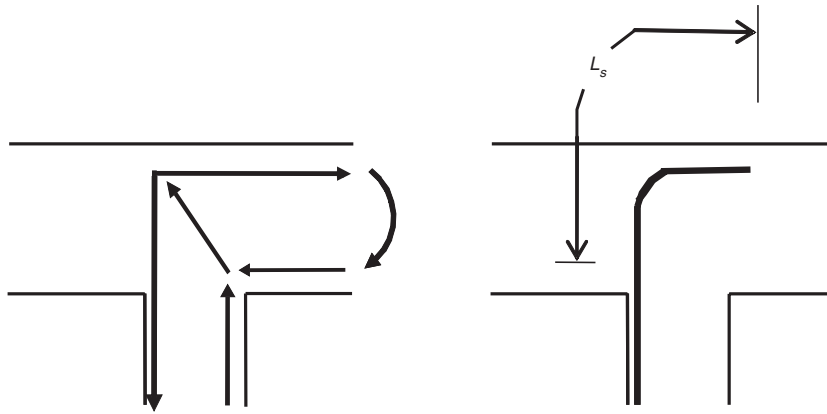


Figura C.6.2. Detalle de anclaje de la armadura de la pila hacia el interior de la misma

Estas separaciones máximas de la armadura transversal se consideran suficientes, asimismo, para evitar el pandeo de la armadura longitudinal.

- La armadura de confinamiento se extenderá a lo largo de una longitud L_h , definida como la longitud de la potencial rótula plástica a efectos de los criterios de armado, que depende de la magnitud del axil reducido actuante.

Cuando el axil reducido sea $\eta_k \leq 0,30$, la longitud L_h puede estimarse como el mayor de los valores siguientes:

- Canto del elemento perpendicular al eje de la rótula.
- Distancia desde el punto de momento máximo a aquél en el que dicho momento se haya reducido en un 20%.

Cuando el axil reducido sea $0,30 < \eta_k \leq 0,60$, la longitud L_h deberá incrementarse en un 50% respecto a la definida en el caso anterior.

- Fuera de la longitud L_h , la armadura transversal deberá reducirse gradualmente hasta la cuantía requerida por otros criterios. En una zona de longitud igual a L_h , adyacente al extremo teórico de la rótula plástica, la cuantía de armadura transversal no deberá ser menor del 50% de la armadura de confinamiento.

- Debido al riesgo de pérdida del recubrimiento en las zonas de las rótulas plásticas, las armaduras transversales de confinamiento deberán anclarse mediante una patilla doblada 135° alrededor de una barra longitudinal, con una longitud de al menos 10 veces su diámetro, entrando hacia el núcleo del elemento. Este tipo de anclaje, o bien el empalme por soldadura a tope, también debe efectuarse en el caso de que la armadura de confinamiento esté formada por espirales u horquillas.

La longitud de rótula definida en este comentario debe utilizarse exclusivamente para la disposición de armaduras pero nunca para estimar la capacidad de rotación de la rótula.

— Armado de nudos

En general, el detalle de anclaje de la armadura de las pilas en las cimentaciones o tablero debe estudiarse con un modelo de bielas y tirantes, como puede ser el recogido en la figura C.6.2.

En las conexiones o empotramientos entre pilas y tablero, puede considerarse como zona efectiva del tablero para la transmisión de momentos, un ancho del tablero igual a la dimensión de la pila más dos veces el canto del tablero (figura C.6.3).

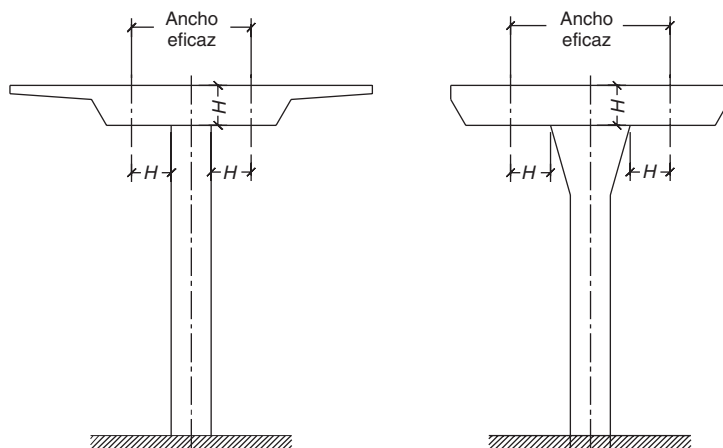


Figura C.6.3. Ancho eficaz de tablero para la transmisión de momentos

En un nudo adyacente a una rótula plástica, si la tensión principal de tracción σ_t , determinada según se indica en el apartado 5.3.1.5, resulta menor que f_{ctd} puede disponerse en el nudo una armadura mínima transversal al eje de la pila de cuantía geométrica ρ_{min} , según la expresión siguiente:

$$\rho_{min} = \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} \quad (6.7)$$

Si la tensión principal de tracción σ_t resulta mayor que f_{ctd} , puede ser suficiente con disponer las siguientes armaduras:

- Cercos verticales a ambos lados de la pila con un área total a cada lado igual al 20% del área de las armaduras de la pila que se anclan en la conexión, extendidos sobre una anchura igual al doble del canto de la pila.
- Cercos o zunchos horizontales colocados alrededor de los cercos verticales y con un área total de armadura igual al 10% del área de las armaduras de la pila que se anclan en el nudo.
- Armaduras horizontales en las caras laterales de la cimentación o del tablero con un área total igual al 10% de la armadura longitudinal inferior o superior (el mayor de los dos valores) de la cimentación o tablero.

Las armaduras longitudinales de la pila deben prolongarse en el elemento transversal (tablero o cimentación) hasta la cara opuesta y terminarse con una patilla. Las armaduras transversales de confinamiento deben prolongarse en el elemento transversal al menos un canto y medio o hasta la cara opuesta.

C.6.3. Elementos estructurales metálicos

Ya se ha indicado en el capítulo 5 que las secciones en las que se prevea la formación de rótulas plásticas deben ser secciones compactas, mientras que las secciones protegidas por capacidad podrán ser elásticas o moderadamente esbeltas.

C.6.4. Elementos estructurales mixtos

Los elementos mixtos que se utilizan más frecuentemente para participar en el comportamiento dúctil del puente son secciones metálicas rellenas de hormigón y armadura pasiva. Este es el caso de los fustes mixtos utilizados en pasos superiores o en secciones de arcos mixtos.

En general, en estos casos no se disponen conectores entre las chapas y el hormigón y la conexión se produce por efecto Poisson y rozamiento entre chapa y hormigón. Cuando el hormigón comprimido se expande, produce una compresión sobre la chapa y por fricción se genera una capacidad resistente a las tensiones tangenciales que se producen en la interfase hormigón-acero.

A falta de otras prescripciones en la normativa vigente, se puede considerar que, en el caso de pilas o elementos comprimidos asimilables a las mismas constituidos por cajones o cilindros huecos rellenos de hormigón y armadura o por perfiles embebidos en el hormigón, los valores mínimos que debe cumplir la esbeltez de las paredes metálicas, según el tipo de elemento y la ductilidad de la estructura, son los que se recogen en la tabla C.6.4. El significado de las variables utilizadas es el indicado en la figura C.6.4 con $\varepsilon = (f_y/235)^{0.5}$ siendo f_y el límite elástico del acero expresado en [N/mm²].

TABLA C.6.4
Límites de esbeltez de las chapas en secciones mixtas

| Tipo de elemento | Comportamiento estructural | |
|--------------------|--|--------------------------|
| | Ductilidad limitada $1,50 \geq q > 1$ | Dúctil $q > 1,50$ |
| Tubos rellenos | $d/t < 90 \varepsilon$ | $d/t < 85 \varepsilon$ |
| Cajones rellenos | $h/t < 52 \varepsilon$ | $h/t < 38 \varepsilon$ |
| Perfiles embebidos | $c/t_f < 20 \varepsilon$ | $c/t_f < 14 \varepsilon$ |

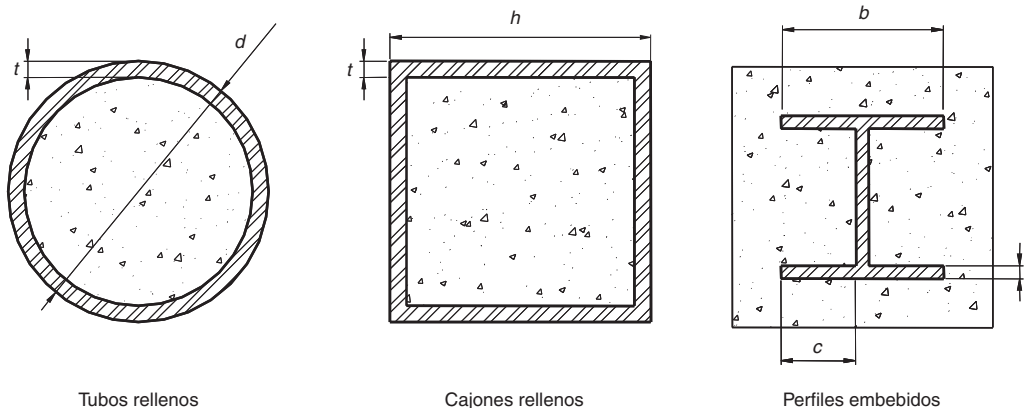


Figura C.6.4. Secciones tipo de pilas mixtas

Los espesores mínimos de las chapas embebidas en el hormigón dependen de la capacidad de arriostamiento de la armadura de confinamiento. Si la separación s entre los cercos cumple la condición $s/c < 1,0$, los límites de esbeltez son los establecidos en la tabla C.6.4. Si la separación es tal que $s/c < 0,5$, los límites establecidos en la tabla pueden aumentarse un 50%. Si la separación es tal que $0,5 < s/c < 1,0$, se puede interpolar linealmente entre los valores anteriores. Adicionalmente, el diámetro de la armadura de confinamiento \varnothing_w debe cumplir la condición siguiente:

$$\varnothing_w \geq \max \left\{ 10 \text{ mm}; \sqrt{\frac{1}{8} \cdot b \cdot t_f \cdot \frac{f_{yd,f}}{f_{yd}}} \right\}$$

donde:

| | |
|------------|---|
| b | Ancho del ala embebida. |
| t_f | Espesor del ala embebida. |
| $f_{yd,f}$ | Valor de cálculo del límite elástico del perfil. |
| f_{yd} | Valor de cálculo del límite elástico de la armadura de confinamiento. |