

TEMA 16

EL POSTESADO EN EDIFICACIÓN

El postesado en edificación

Aspectos a considerar en
el proyecto

Dimensionamiento

Aspectos tecnológicos y constructivos

16.1.

EL POSTESADO EN LA EDIFICACIÓN

16.1.1.

Procedimientos de postesado

La técnica del hormigón postesado consiste en tesar la armadura activa, después del fraguado del hormigón del elemento estructural y cuando éste ha alcanzado una resistencia suficiente para soportar las tensiones provocadas por el acero. Las fuerzas del postesado se transmiten al hormigón a través de anclajes especiales que están fijos en los extremos de la pieza.

Existen dos variantes de la técnica: armadura postesa adherente y armadura postesa no adherente.

En el caso de *armadura postesa adherente* se deja embebida una vaina metálica o de plástico, que se replantea en la pieza con el trazado elegido, normalmente formado por tramos parabólicos y rectos, por la que se enfilan, después del hormigonado, los cordones que constituyen el cable. Después del tesado se procede a inyectar con una lechada de cemento a alta presión el espacio que queda entre los cordones del cable y la vaina. Con esta inyección se restituye la adherencia entre el cable de la vaina y el resto de la sección transversal del elemento.

En el caso de *armadura postesa no adherente*, para estructuras de edificación, suele utilizarse un cable con un único cordón que está cubierto con una vaina de plástico que evita que el hormigón se adhiera al acero. En este caso, el cordón se replantea en el elemento estructural, siguiendo el trazado definido, y se hormigona posteriormente. Después de endurecido el hormigón, se tesan los cordones que pueden estirarse libremente. En este caso no se puede restablecer la adherencia porque no es posible inyectar el espacio que queda entre el cordón y la protección de plástico, y la armadura queda sin adherencia.

En países como Estados Unidos o Australia, esta técnica está muy extendida, en Europa su avance ha sido mucho menor. Mientras que el 75% del acero de pretensar usado en Estados Unidos o Australia se ha empleado como postensado, en el caso de Europa el porcentaje sólo alcanza al 10%. Es de esperar un notable avance en el empleo de esta tecnología debido a las ventajas que su uso supone y que se comentarán más adelante.

16.1.2

Campo de aplicación

El pretensado tiene unas condiciones óptimas de utilización que se presentan generalmente para luces superiores a 8,0 m.

Si se comparan distintas alternativas posibles para una situación específica (soluciones armadas, postesadas, mixtas), y teniendo en cuenta todos los aspectos involucrados (costes de materiales, costes de medios necesarios, costes de protección a fuego adicional, etc.), las soluciones postesadas suelen ser las más económicas para luces superiores a los 8,0 m.

La utilización del postesado en forjados supone una cierta limitación en las actuaciones, una vez terminada la estructura. El uso del postesado

requiere que se haya definido, con cierta precisión, el paso de instalaciones para, de esta forma, poder plantear una disposición de cables compatible, que evite actuaciones posteriores.

Sin embargo siempre es posible plantear un trazado de cables concentrado sobre pilares, por ejemplo, que permita dejar extensas áreas libres de cables, y consecuentemente, susceptibles de perforar. Y además puede utilizarse armadura postesa adherente, que, con algunas limitaciones, tiene ventajas en cuanto la práctica de huecos posteriores.

16.1.3.

Ventajas del postesado

Obtención de estructuras muy esbeltas

El uso del pretensado permite la utilización de cantos muy estrictos, con relación canto/luz de 1/30 a 1/45, dependiendo de las condiciones de contorno. Esto conlleva una reducción de la magnitud del peso propio de los forjados, disminuyéndose la carga total del edificio.

Asimismo, la reducción del canto, frente a soluciones convencionales, puede suponer un mejor aprovechamiento de la altura total del edificio, en especial cuando existe un gran número de plantas.

Sin embargo la mayor esbeltez exige un control más cuidado de las deformaciones.

Trazado que compensa parte de las acciones exteriores

Con un trazado adecuado, el efecto estructural del postesado produce unos esfuerzos contrarios al de las fuerzas gravitatorias, permitiendo su compensación total o parcial.

Como criterio de diseño de la armadura activa suelen compensarse las cargas permanentes, en un porcentaje entre 70 y el 100%, en función de la magnitud de las sobrecargas. Para menores sobrecargas respecto a las cargas permanentes, la carga compensada por el pretensado suele ser mayor.

Además el trazado del pretensado permite reducir los esfuerzos efectivos de cortantes y punzonamiento actuantes.

Control de la fisuración y deformaciones

Debido al estado de esfuerzos resultante producido por el postesado más las cargas permanentes, las secciones más solicitadas no se fisuran, lo que permite mantener intacta la rigidez y, consecuentemente, controlar las deformaciones instantáneas con toda la inercia que ofrece la sección. Además el postesado puede introducir deformaciones contrarias a las producidas por las cargas exteriores de manera que también la flecha diferida puede reducirse.

Incremento de resistencia

Se incrementa la resistencia frente a flexión, cortante y punzonamiento.

El hecho de que la técnica del pretensado con armaduras postesas apenas se utilice en la edificación, frente al uso extensivo en obras de ingeniería civil no debe considerarse una situación obligada o inalterable. Las ventajas que proporciona esta técnica, de uso muy extendido en el ámbito de la edificación en otros países europeos, justifican sobradamente el impulso que se merece, estimulando el proyecto y la construcción de elementos pretensados con armadura postesa en la edificación.

16.2.

ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL PROYECTO

16.2.1.

Tipo de armadura

En cuanto a la utilización de armadura adherente o no adherente, la elección tiene que tomarse fundamentalmente teniendo en cuenta la magnitud de la sobrecarga.

Sobrecarga de uso importante respecto a la carga total

La armadura adherente permite importantes ahorros de armadura activa y pasiva.

Sobrecarga de uso pequeña respecto a la carga total

Ambas soluciones son adecuadas. Muy frecuente en edificación la no adherente.

La razón fundamental del uso de tendones no adherentes en edificación está en los cantos estrictos que se manejan, que no permiten la disposición de vainas con el diámetro suficiente como para que la inyección pueda circular por ellas.

16.2.2.

Disposiciones de armado

Para la distribución de los cables en planta existen distintas posibilidades (*figura 16.1*).

Las soluciones a) y d) son las situaciones extremas para losas de luces similares en ambas direcciones. En general, la a) tiene más ventajas tanto desde el punto de vista resistente como al permitir dejar un espacio muy importante de la estructura sin cables, con las ventajas que ello comporta en relación a la posibilidad de realizar huecos y cambios posteriores a la construcción.

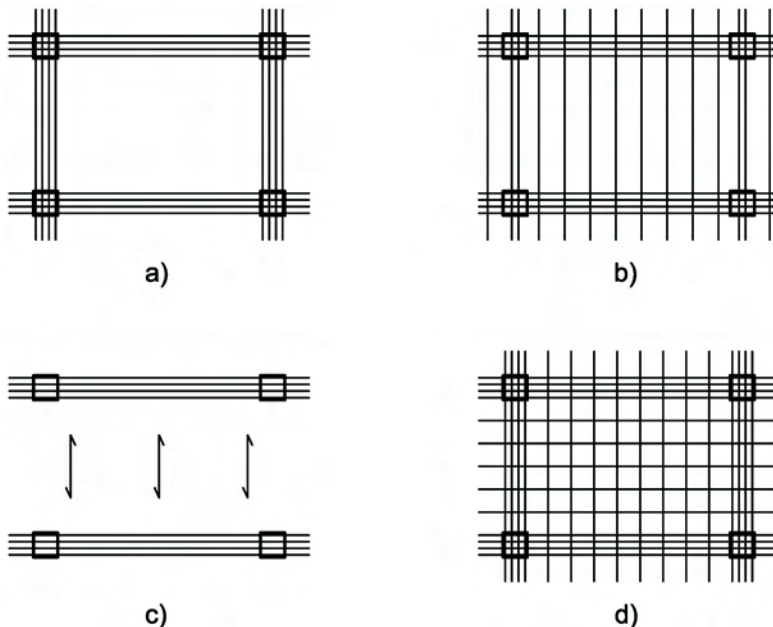


Figura 16.1. Distintas distribuciones de la armadura activa en planta.

Las soluciones b) y c) corresponden a casos en donde hay una luz mayor en una de las direcciones o, menos frecuentemente, también pueden utilizarse cuando teniendo luces similares en las dos direcciones las condiciones de continuidad son diferentes según los dos ejes, con vanos múltiples en una dirección y un vano único en la otra.

16.2.3.

Interacción con otros elementos de la estructura

En el planteamiento de estructuras de este tipo deben tenerse en cuenta las situaciones de soporte de la losa. En ocasiones, la rigidez de los pilares y demás elementos de soporte verticales (pantallas, muros...) puede conducir a que parte importante de la acción horizontal del postesado se transmita a ellos en lugar de a la losa. Esta situación, que no invalida el uso eficiente del postesado ya que permite seguir contando con las fuerzas de desvío de la armadura activa, requiere que sea tenida en cuenta en el proyecto, tanto desde el punto de vista de la armadura activa como del dimensionamiento de los pilares o elementos de soporte verticales.

16.2.4.

Tipologías usuales de losas postesas

Las losas postesadas, que constituyen la más frecuente aplicación del postesado adherente o no adherente en edificación, pueden plantearse con distintas tipologías:

- Losas con distribución de tendones unidireccional en dos direcciones ortogonales.
- Losas bidireccionales con canto constante.
- Losas bidireccionales con capiteles o forjados aligerados (para luces mayores).
- Losas bidireccionales combinadas con vigas descolgadas en una o dos direcciones.

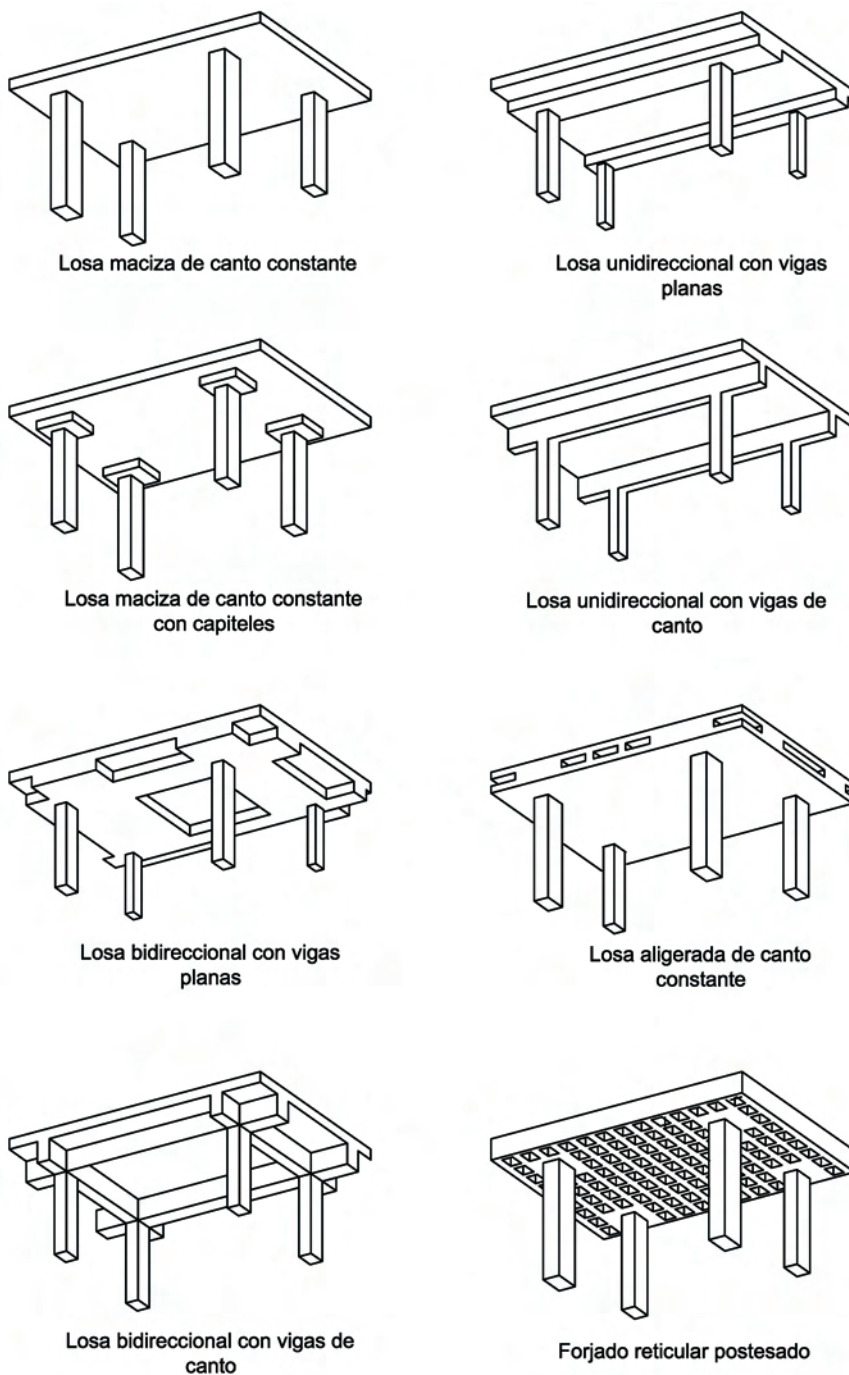


Figura 16.2. Tipología de losas

16.3.

DIMENSIONAMIENTO

16.3.1.

Relación canto - luz

En la *Tabla 16.3.* se muestran relaciones canto/luz recomendadas por la *Guía de aplicación de la Instrucción EHE* para distintos tipos de placas:

Tipo de placas postesadas	Relación canto/luz h/l
Losas unidireccionales	1/48
Losas bidireccionales	1/45
Losas con ábacos ($\text{ábaco} > l/6$)	1/50
Losas bidireccionales con vigas en dos direcciones	1/55
Losas aligeradas con casetones	1/35
Vigas de canto ($b \cong h/3$)	1/20
Vigas de canto ($b \cong 3h$)	1/30

Tabla 16.3. Relaciones canto/luz recomendadas por la Guía de Aplicación de la Instrucción EHE

En la *Tabla 16.4* se muestran relaciones canto/luz recomendadas por el código americano PTI (Post – Tensioning Institute) y ACI – 318 – 02 (Building Code Requirements for Structural Concrete).

	Vanos continuos	Un solo vano
Losa maciza unidireccional	1/50-45	1/45-40
Losa maciza bidireccional (sobre pilares)	1/48-40	---
Losa aligerada bidireccional	1/40-35	1/35-30
Vigas	1/35-30	1/30-26
Nervios unidireccionales	1/42-38	1/38-35

Tabla 16.4. Relaciones canto/luz, recomendadas por el código americano PTI

Las relaciones dadas en la tabla anterior se pueden aumentar cuando las flechas y las vibraciones no son críticas.

16.3.2.

Predimensionado

El dimensionamiento se basa en la obtención, con el trazado, de unas cargas equivalentes actuando sobre la losa que compensen gran parte de la carga permanente.

El reparto de estas cargas equivalentes en la losa depende lógicamente de la disposición de la armadura activa repartida coherentemente con ellos, es decir, en las bandas de soportes y en las bandas centrales según el reparto de esfuerzos que se obtiene.

Ejemplo

Si se utiliza el método directo de cálculo de esfuerzos (debe darse una distribución sensiblemente ortogonal de soportes), el trazado y fuerza de pretensado deberá ser capaz de introducir unas fuerzas equivalentes que contrarresten un gran porcentaje de las cargas permanentes.

En la banda de soportes de un vano intermedio de una losa, en la que las condiciones geométricas permiten poder aplicar el método directo de cálculo de momentos flectores, el momento isostático debido a las acciones exteriores a compensar con el pretensado vendría dado por:

$$M_{\text{ext}} = (0,6 \cdot 0,35 + 0,65 \cdot 0,75) \cdot \frac{(g_d + \alpha \cdot q_d) \cdot l_p l_1^2}{8}$$

donde α es el porcentaje de sobrecarga que se puede considerar permanente y que dependerá del tipo de edificio (por ejemplo en un archivo, gran parte de la sobrecarga se puede considerar permanente).

Llamando δ a la cuerda del trazado parabólico del pretensado en el centro de vano, el momento isostático disponible para compensar el M_{ext} es:

$$M = p \cdot \delta$$

Igualando $M = M_{ext}$ se obtiene una relación para poder estimar δ (trazado) y P (pretensado necesario).

El valor de δ se intenta fijar máximo en función del canto de la losa y los recubrimientos a respetar. De ahí se puede obtener P y por tanto los tendones o cordones a disponer en la banda de soportes de la losa.

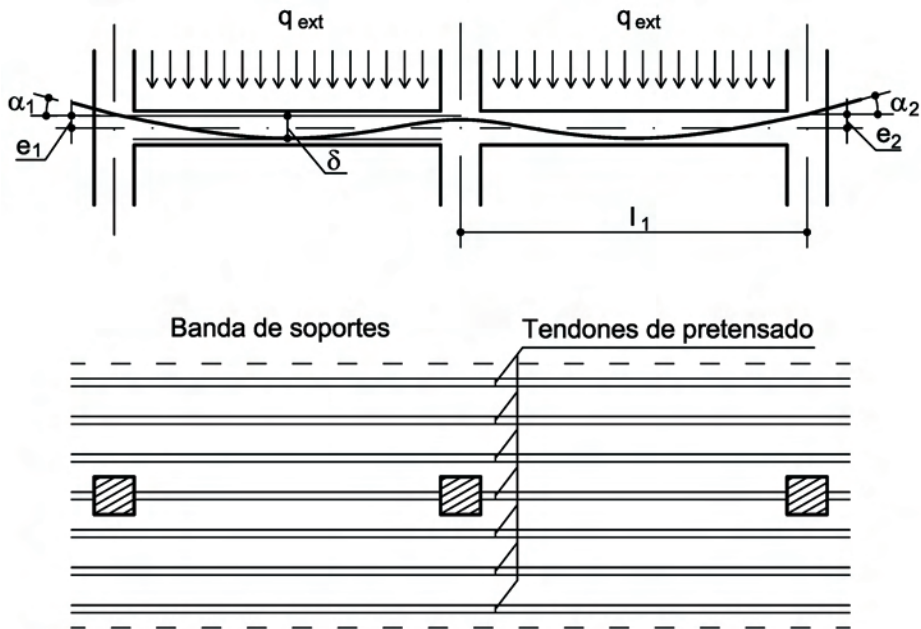


Figura 16.5.

16.3.3.

Comprobación en ELU

Una vez obtenidos los esfuerzos, las comprobaciones en Estados Límites Últimos son las siguientes:

- Flexión: En esta comprobación entran todas las cargas. La contribución a la resistencia a flexión de los tendones no adherentes puede obviarse del lado de la seguridad o bien estimarse teniendo en cuenta la deformación en rotura de la placa.

- Cortante: se utilizará la fórmula correspondiente a losas sin armadura transversal, contando con la compresión introducida por el pretensado y considerando el esfuerzo cortante efectivo.
- Punzonamiento: Es posible reducir el esfuerzo efectivo de punzonamiento F_{1d} restando las fuerzas equivalentes de pretensado dentro del área comprendida en el perímetro crítico.

Ejemplo

Sea la zona de soportes de una losa postesada de forjado. Por el pilar superior baja una carga de $N_{1d} = 675 \text{ kN}$ y por el inferior el axil es $N_{2d} = 1012,5 \text{ kN}$; por lo tanto el esfuerzo F_{0d} a considerar en el punzonamiento sería : $N_{2d} - N_{1d} = 337,5 \text{ kN}$. Pero dicho esfuerzo se ve reducido por la acción vertical del pretensado:

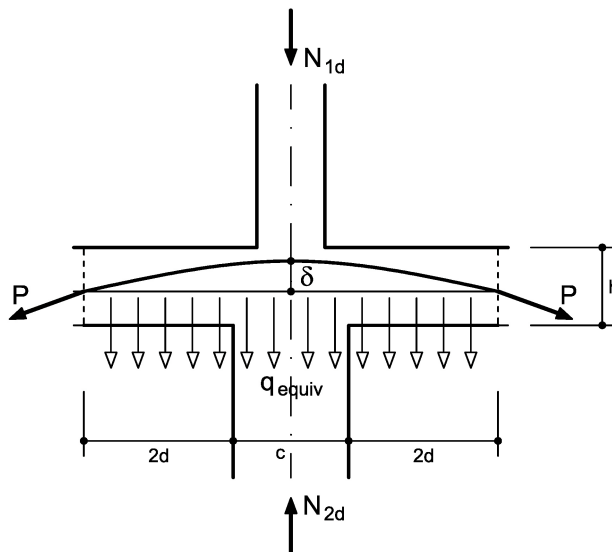


Figura 16.6.

En una de las direcciones principales (en el plano de la figura) el pilar de la planta inferior tiene un ancho c , y en la dirección perpendicular de c' . Las fuerzas verticales equivalentes de pretensado que están incluidas dentro del área definida por el perímetro crítico u_1 , reducen la acción de F_{sd} .

En la dirección del plano de la figura pasan dentro de dicho perímetro 4 tendones, cada uno con una fuerza \mathbf{p} de pretensado, con lo que la fuerza en esa dirección es $\mathbf{P} = 4\mathbf{p}$. Lo mismo en el plano ortogonal.

Las cargas equivalentes en el plano de la figura son:

$$q = \frac{2 \cdot \mathbf{P}}{\mathbf{L}} \cdot \frac{\delta}{\mathbf{L} / 4} = \frac{8 \cdot \mathbf{P} \cdot \delta}{\mathbf{L}^2} = \frac{8 \cdot \mathbf{P} \cdot \delta}{(\mathbf{c} + 4\mathbf{d})^2}$$

Luego la componente total de pretensado que se puede restar a \mathbf{F}_{sd} es:

$$\left(\frac{8 \cdot \mathbf{P} \cdot \delta}{(\mathbf{c} + 4\mathbf{d})^2} + \frac{8 \cdot \mathbf{P}' \cdot \delta'}{(\mathbf{c}' + 4\mathbf{d}')^2} \right) \cdot (\mathbf{c} + 4\mathbf{d}) \cdot (\mathbf{c}' + 4\mathbf{d}') = \mathbf{F}_{pret}$$

Así el esfuerzo de punzonamiento efectivo será:

$$\mathbf{F}_{1d} = \mathbf{F}_{sd,ef} = \beta \cdot (\mathbf{F}_{sd} - \mathbf{F}_{pret})$$

16.3.4.

Armadura pasiva

La EHE no contempla esta tipología y su planteamiento puede inducir a algún error.

El artículo 56.2. describe las losas de hormigón armado y en el caso de placas macizas de espesor constante limita la separación máxima de la armadura a 25 cm o dos veces el espesor de la losa.

Indica que la armadura superior e inferior correspondientes a la dirección menos solicitada en cada recuadro, tendrán al menos el 25% de las armaduras análogas de la dirección principal.

El artículo 42.3.5 obliga a disponer una armadura del 1,8 ‰ para losa, repartida en las dos caras.

La aplicación estricta de estos artículos sin un cierto espíritu crítico conduce, invariablemente, a una solución desproporcionadamente cara frente a la misma solución de hormigón armado.

Resulta obvio que la armadura de pretensar es una armadura que debe formar parte de la armadura total considerada en el articulado anterior.

El empleo de as cuantías mínimas obedece a dos razones fundamentales:

- Cuantía geométrica mínima. El objeto de esta cuantía se define para controlar la fisuración inducida por las deformaciones impuestas por la temperatura y retracción. Resulta evidente que una compresión uniforme de al menos 1 N/mm^2 produce el mismo efecto que la coacción impuesta por la armadura pasiva.

El 1,8 ‰ equivale a una tracción soportada, en una losa de 30 cm, de 240 kN/m

Una compresión de 1 N/mm^2 equivale a una compresión uniforme en la misma sección de 30 cm, de 300 kN/m .

- Cuantía mecánica. El objeto de esta cuantía es evitar la rotura frágil de la pieza en el momento en el que el hormigón se fisura. Por esta razón la sección deberá tener al menos la armadura correspondiente al bloque de tracciones de la sección antes de producirse la fisuración.

La fórmula de la instrucción no tiene en cuenta, del lado de la seguridad, el efecto beneficioso del esfuerzo axil.

Resulta obvio entonces que en ningún caso son de aplicación las cuantías tal como se describen explícitamente en la instrucción.

Puestas así las cosas planteamos los criterios de cuantías mínimas indicadas por PTI.

- La armadura mínima **adherente** (activa y pasiva) será, para forjados unidireccionales

$$\Delta_s = 0,04 A$$

siendo A el área de la sección traccionada.

- Para forjados bidireccionales la armadura mínima será:

- No será necesaria en momentos positivos cuando la tensión en servicio de la fibra traccionada es menor de:

$$0,17\sqrt{f_{cd}}$$

- Si $\sigma_s > 0,17\sqrt{f_{ck}}$, la armadura es:

$$\Delta_s = \frac{N_c}{0,5 f_y} \quad \text{y} \quad f_y \leq 413 \text{ N/mm}^2$$

siendo N_c la tracción en el hormigón debido a la carga permanente y la sobrecarga.

- En momentos negativos en soportes el área mínima es:

$$\Delta_s = 0,00075 \Delta_{cf}$$

siendo Δ_{cf} el área de la sección transversal de la banda de soportes. Esta armadura se distribuye en un ancho de 1,5 veces el canto de cada lado del pilar. Al menos se dispondrán cuatro barras y su separación no será mayor de 30 cm.

En el resto de la losa no se dispone ninguna armadura.

16.4.

ASPECTOS TECNOLÓGICOS Y CONSTRUCTIVOS

16.4.1.

Aspectos tecnológicos

Tipos de cables y cordones

Cable monocordón no adherente

Este tipo de armadura es la más frecuentemente utilizada en edificación. Al ser un monocordón, generalmente de 0,6", no requiere grandes recubrimientos y garantiza una gran flexibilidad para la definición del trazado.

Este sistema no adherente presenta ventajas constructivas, ya que no necesita la inyección posterior y las operaciones de tesado son relativamente rápidas, dado que el gato unifilar utilizado es fácilmente manejable. En contrapartida este sistema supone, desde el punto de vista de la capacidad resistente, no disponer en Estado Límite Último de toda la capacidad resistente del acero de la armadura activa.

Cable de cuatro cordones adherentes con vaina oval

Este tipo de cables mantiene las mismas ventajas relativas al recubrimiento y flexibilidad de trazado del sistema anterior. En contrapartida es necesario inyectar el cable para conseguir la adherencia buscada.

Desde el punto de vista mecánico es posible aprovechar la máxima capacidad resistente del acero, en Estado Límite Último. En edificación es también un sistema muy utilizado, especialmente cuando hay cargas elevadas ya que puede contribuir a un ahorro significativo en las cuantías.

Cable adherente en con vaina circular

Este sistema es más frecuentemente utilizado en puentes y sólo es viable en edificación para elementos estructurales con dimensiones importantes, donde la pérdida de recubrimiento debido a la forma y tamaño de la vaina no resulta significativa. Es frecuente su utilización en elementos singulares y vigas de grandes luces.

16.4.2.

Aspectos constructivos

Los aspectos esenciales a tener en cuenta en la ejecución son los propios del hormigón postesado y en general implican un control intenso de la ejecución:

- Uso de materiales adecuados (hormigón de resistencia inicial alta, con buena trabajabilidad, aceros de pretensar de alto límite elástico).
- Disposición correcta de tendones para evitar desviaciones importantes de las cargas de pretensado, recubrimientos adecuados por durabilidad y resistencia al fuego.

- Adecuada puesta en obra, con compactación suficiente y preferentemente mediante regla vibrante y curado adecuado para evitar las fisuras prematuras previas al postesado.
- Introducción de la fuerza de pretensado a partir del instante en que el hormigón adquiere la resistencia mínima, siguiendo un orden predeterminado según la tabla de tesado.
- Descimbrado según un esquema predefinido después del postesado y hormigonado de la zona de anclajes por protección frente a la corrosión.