

PROYECTO FINAL DE CARRERA

# ESTUDIO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LOSAS POSTESADAS



Alumno

*Ángel Cerdá Castells*

Profesor Tutor

*Enrique David LLácer*



*Dedicado a todas aquellas personas que han hecho posible que mi camino llegue hasta aquí, donde nunca hubiera podido llegar sin su apoyo y ánimos, gracias a mis abuelos, a mis padres a mi hermano, gracias por haber tenido la suficiente paciencia como para no dejarme salir del camino y en especial gracias a mi amiga, compañera y pareja, por tener la fe en mí que ni yo mismo tuve y gracias a la cual me encuentro hoy escribiendo estas palabras. Gracias a todos mis compañeros de aventuras académicas y vitales, parte de este proyecto también es vuestro y nunca olvidaré los momentos que compartimos.*

*Gracias también a mi tutor de proyecto con el que he podido disfrutar de la agradable experiencia de compartir horas de trabajo en la obra y que además me ha guiado durante el proceso final de mi carrera, y como no, gracias a mi tutor de prácticas por permitirme que pudiera adquirir una experiencia profesional que de ningún otro modo hubiera podido alcanzar. De nuevo, GRACIAS A TODOS.*



# ÍNDICE

<b>1. Introducción</b>	<b>01</b>
<b>2. Forma de trabajo</b>	<b>03</b>
2.1. Forjados postesados con tendones adherentes	08
2.2. Forjados postesados con tendones no adherentes	09
<b>3. Proceso de ejecución y puesta en obra</b>	<b>11</b>
3.1. Características de los materiales	11
3.2. Características de los equipos utilizado	17
3.3. Trazado del tendón en alzado	18
3.4. Trazado de los tendones en planta	19
3.5. Armadura longitudinal mínima	22
3.6. Armadura transversal mínima	25
3.7. Armado de capiteles	26
3.8. Armado en bordes y zonas de muros	27
3.9. Armado en zona de anclajes	28
3.10. Durabilidad	29
3.11. Juntas	32
3.12. Huecos	35
3.13. Patologías	37
3.14. Proceso de ejecución	39
<b>4. Ventajas e inconvenientes frente a otros tipos de forjados de losa de hormigón armado</b>	<b>53</b>
<b>5. Ejemplo de aplicación en la biblioteca municipal de Alzira</b>	<b>57</b>
<b>6. Comparativa económica</b>	<b>65</b>

# 1- INTRODUCCIÓN

El proyecto surge de la necesidad de dar a conocer una tipología de forjado relativamente desconocida, los forjados de losas postesadas con tendón no adherente, tanto a nivel educacional como profesional, intentado ofrecer una perspectiva lo suficientemente amplia de la misma como para que el estudiante/profesional sea capaz de conocer su proceso constructivo con el fin de llegar a comprender cuales son las ventajas e inconvenientes que tiene este tipo de forjados frente otros tipos de losa utilizados actualmente en edificación.

Las losas postesadas consisten en unas losas con armaduras activas, las cuales, se tesan una vez fraguado el hormigón y alcanzada la resistencia necesaria para resistir las tensiones inducidas. El tesado de la armadura activa induce unas tensiones en la losa generalmente de signo opuesto a las acciones gravitatorias aplicadas (peso propio, sobrecargas...etc.) con lo que se obtiene un mejor comportamiento de la estructura. Las cargas transmitidas por el tesado se resumen en fuerzas que comprimen la estructura en los anclajes y fuerzas de desviación inducidas por el trazado curvilíneo de los tendones. Las fuerzas inducidas en los anclajes (compresión) tienen como finalidad contrarrestar las tensiones, generalmente de tracción, que posteriormente se producirán en dichos puntos de la estructura.

Aunque en Europa se tenía ya experiencia en el uso del postesado en puentes y otras tipologías constructivas, en edificación fue EEUU el pionero en la utilización del postesado como sistema constructivo. El primer ejemplo de utilización de losas postesadas en edificios data de 1955, en edificios construidos mediante el sistema "lift-slab" que consiste en hormigonar las losas en planta baja sirviendo unas de encofrado de las otras y posteriormente izarlas hasta su posición definitiva. En estos primeros ejemplos el postesado surgió de la necesidad de aligerar el peso reduciendo las flechas y la fisuración del hormigón armado. A principios de los 60, Lin introdujo la técnica del "Load Balancing" o compensación de cargas lo que permitió visualizar el postesado como un sistema de cargas que actuaban en el hormigón en el sentido opuesto a las cargas externas de uso. En los países europeos existieron reticencias al uso de este tipo de forjados debido a la ausencia de Instrucciones para el diseño de las estructuras, ausencia de comparativos económicos de este tipo de

estructuras frente a otras utilizadas hasta entonces, el carácter conservador de proyectistas y constructores así como la especialización que necesita este tipo de estructuras. No fue hasta los 70 cuando se empezaron a poner a punto normativas y recomendaciones que facilitaban el proyecto de las losas postesadas.

Actualmente y cada vez más los espacios diáfanos van cobrando importancia en nuestras vidas intentando buscar la flexibilidad de usos, así como, diversidad de distribuciones interiores. Este tipo de forjado permite aumentar las luces entre pilares por lo que se reduce el número de éstos con las consiguientes ventajas que ello supone.

Una de las mayores restricciones, sino la mayor, de utilizar grandes luces son los cantos necesarios para los forjados. Estos limitan en gran medida las edificaciones ya que entre un forjado y el siguiente se deben albergar los suelos, las alturas libres de uso, las instalaciones...etc., por lo que cuanto menor sea el canto mayor aprovechamiento de edificabilidad tendremos, ya que para una misma altura podríamos llegar a construir una planta más quedando justificado económicamente el uso de forjado postesado.

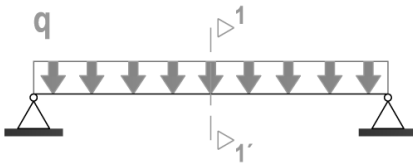
Además del aspecto funcional y económico, como es evidente, debemos centrar la atención en el aspecto resistente. Uno de los defectos mayores del hormigón es la escasa resistencia a tracción lo que hace que aparezcan grietas aún cuando el estado de carga es reducido, lo que afecta directamente tanto a la durabilidad, la resistencia y su deformabilidad, ya que dichas fisuras reducen la rigidez de los elementos que componen la estructura. Esto puede afectar de forma directa al resto del proceso constructivo ya que pueden dar lugar a daños en tabiques, solados, carpinterías...etc.

Esto pone de manifiesto las limitaciones de la utilización del hormigón armado en la construcción de elementos que trabajan a flexión obligándonos a utilizar cantos de grandes dimensiones con el fin de poder aumentar las luces entre pilares, con la consiguiente pérdida de altura entre forjados, además de la utilización hormigones de alta resistencia que sin embargo no evitarán la aparición de las temidas fisuras debido a la fluencia.

## 2- FORMA DE TRABAJO

El postesado introduce un estado de tensiones previos a la carga de la estructura con la finalidad, de disminuir o eliminar las tracciones sufridas por el hormigón al cargar la estructura.

Como primer paso para el estudio de la forma de trabajo de una losa postesada consideraremos una viga isostática con una carga  $q$  uniformemente distribuida:

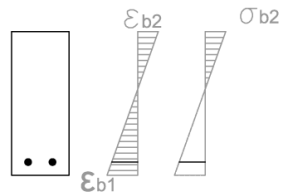


### Diagrama de momentos

$$M_1 = q \cdot l^2 / 8$$



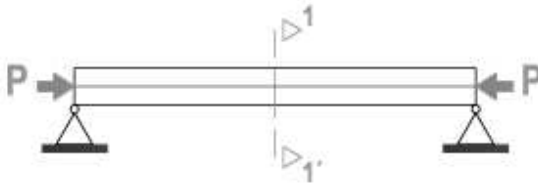
### Diagrama de deformaciones y tensiones



El estado tensional en el punto 1-1' se observa en el diagrama de la derecha, considerando el material ideal, homogéneo, elástico lineal sin soportar tensiones de tracción.

Una primera mejora podría consistir en inducir una fuerza compresiva  $p$  centrada en la sección transversal de la pieza.

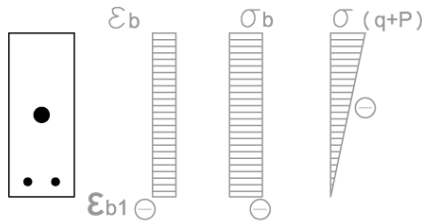




Esta fuerza  $p$  puede ser inducida mediante la introducción de un cable que posteriormente se tensa y se ancla en los extremos de la viga. Se crea de este modo un estado tensional equilibrado, el cable comprime la viga y esta tracciona el cable.

El estado de deformaciones y tensiones en el punto 1-1' de la viga queda de la siguiente forma:

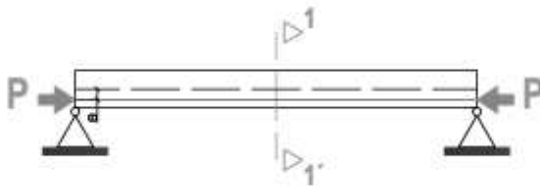
### Diagrama de deformaciones y tensiones



Superponiendo el estado de cargas producido por  $q$  y el producido por  $p$  se puede observar que para un valor adecuado de  $p$  se pueden contrarrestar por completo las tensiones de tracción.

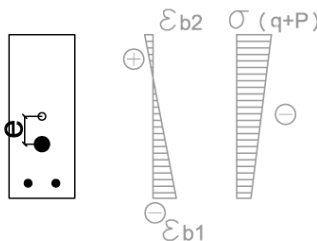
Aunque como se muestra en el diagrama el material no trabaja de forma uniforme, ya que hay zonas con tensiones nulas y otras con compresiones elevadas.

Para compensar e igualar la forma de trabajo bastaría con aplicar la fuerza  $p$  con una excentricidad  $e$ :



En estas condiciones la fuerza  $p$  somete a compresión y flexión a la viga con el estado tensional siguiente:

**Diagrama de deformaciones y tensiones**



Ajustando ahora tanto los valores de  $p$  como de  $e$  se puede obtener un diagrama tensional en el que se observa un trabajo más uniforme de la viga con respecto al caso anterior donde la fuerza  $p$  estaba aplicada en el eje de la viga.

Todos estos estados tensionales han sido estudiados en la sección central de la viga por lo que los valores y excentricidad de  $p$  han sido calculados para anular las tensiones en la sección central de la viga, por lo que en los extremos de la viga quedarían como tensiones dominantes las producidas por la carga  $p$  ya que los diagramas de axiles (N) y de momentos flectores (M) de  $p$  son constantes mientras que los de  $q$  no lo son.

Diagrama de momentos flectores producidos por  $q$ .

### Diagrama de momentos

$$M_1 = q \cdot l^2 / 8$$

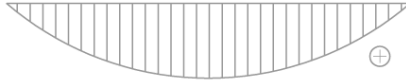


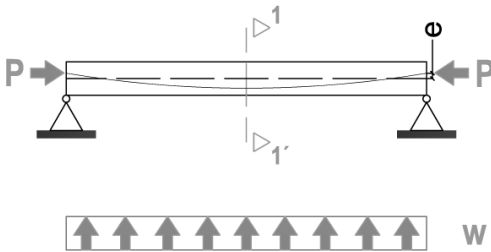
Diagrama de axiles producidos por  $p$ .

### Diagrama de axiles

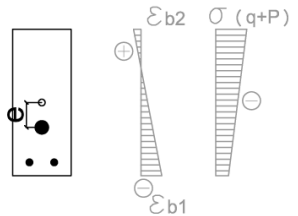
$$N = -P$$



Con el fin de mejorar la forma de trabajo de la viga en todas sus secciones damos una curvatura calculada al cable:



### Diagrama de deformaciones y tensiones

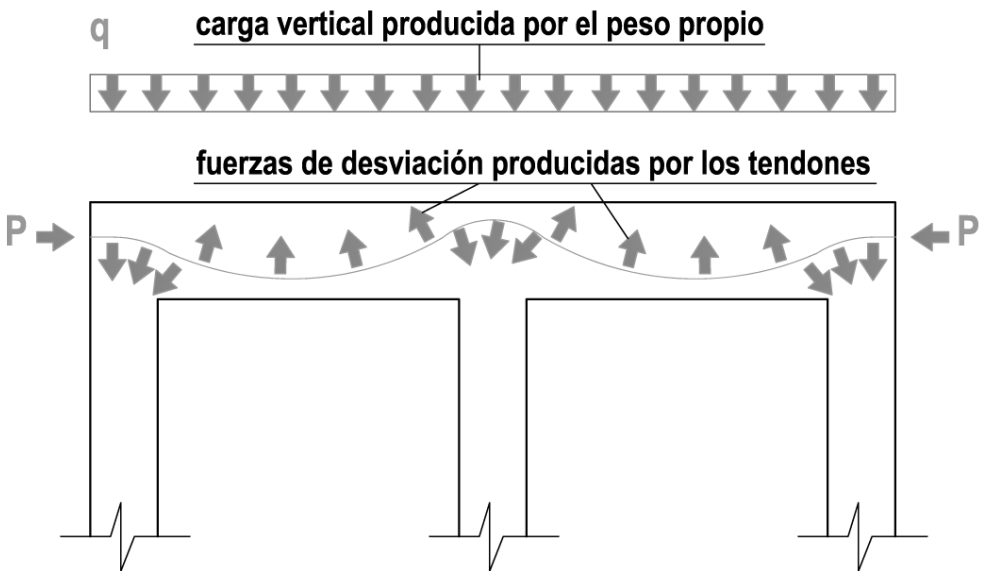


Como se observa en el diagrama anterior ahora tenemos, aparte de la carga en los extremos producida por  $p$ , una fuerza  $w$  de sentido contrario a  $q$ , produciendo el diagrama de flectores  $M^{(p)}$  que permite una distribución más homogénea de las tensiones a lo largo de la viga.

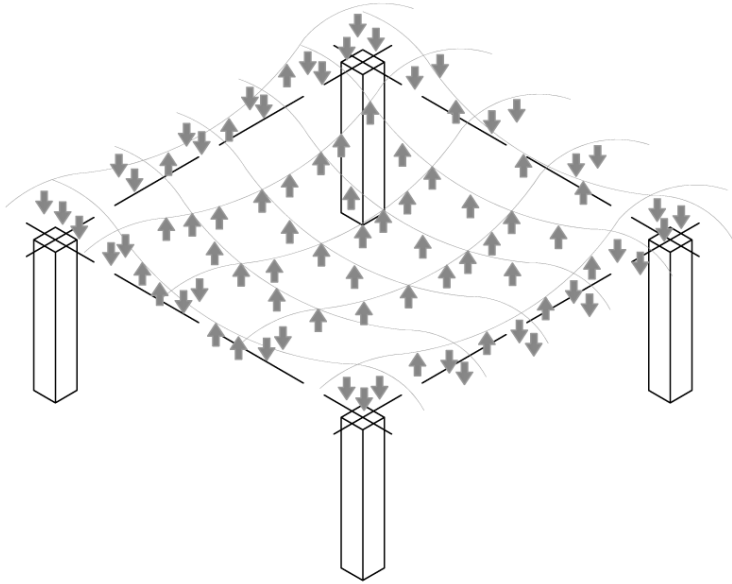
## Diagrama de momentos



Una vez observados los resultados y extrapolando el caso de viga biapoyada isostática al de viga continua apoyada sobre pilares hiperestática, observamos que el trazado del cable debe seguir el trazado del diagrama de momentos flectores de la viga, teniendo en cuenta que a su paso por la parte superior de los pilares se crean tensiones.



El caso de la losa sería similar al visto anteriormente pero trabajando en las dos direcciones tal y como observamos en el siguiente gráfico:



Existen dos tipos de forjados postesados según el tipo de tendón utilizado:

- Forjados postesados con tendones adherentes.
- Forjados postesados con tendones no adherentes.

## 2.1- FORJADOS POSTESADOS CON TENDONES ADHERENTES

Los sistemas adherentes necesitan, a diferencia de los no adherentes, en la zona de longitud libre del tendón una vaina corrugada global metálica o de PP, que cumple dos funciones, la primera la alojar los cordones y segunda proporcionar mediante sus corrugas la adherencia necesaria entre la lechada de cemento y el hormigón. La vaina puede ser circular u ovalada. En este sistema los cordones no están enfundados con el fin de facilitar la adherencia de los mismos con la lechada que se inyecta posteriormente. Para su ejecución primero se colocan las vainas replanteadas en el forjado según proyecto y una vez hormigonado se introduce el cordón procediendo al tesado del mismo y a la introducción a presión de una lechada de cemento la cual rellena el espacio entre la vaina y el cordón garantizando la adherencia del conjunto con el hormigón.

La tipología adherente restringe el canto del forjado, ya que las vainas suelen ser de mayor tamaño que las utilizadas para la ejecución de postesados no adherentes, por lo que resulta menos interesante su utilización en edificación, además también necesita de la inyección de lechada en el interior de la vaina lo que limita su utilización, ya que necesita de grandes espacios y maquinarias muy incómodas de utilizar en edificación, el tipo de postesado adherente es más propio de construcciones civiles tales como puentes.



*Imagen de tendón adherente.*

## **2.2- FORJADOS POSTESADOS CON TENDONES NO ADHERENTES**

Los forjados de losas postesadas con tendones no adherentes están formadas por armaduras pasivas y armaduras activas, estas últimas constituidas por cordones de acero de alto límite elástico, engrasados y embutidos en una vaina de polietileno de alta densidad.



*Imagen de tendón no adherente.*



# 3- PROCESO DE EJECUCIÓN Y PUESTA EN OBRA

## 3.1- CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

**Armaduras pasivas:** Son las mismas que las utilizadas en las losas de hormigón armado tradicionales. Están compuestas por barras corrugadas de acero B 400 S/SD o B 500 S/SD así como mallas electrosoldadas.

**Armaduras activas:** Debe cumplir lo exigido en la normativa vigente tanto EHE como UNE- 36094. Trabaja únicamente a tracción y está compuesta por el cordón que, según el artículo 34 de la EHE, es un producto formado por un grupo determinado de alambres enrollados helicoidalmente. Lo que diferencia unos cordones de otros es la cantidad de cables que los componen y que pueden ser 2, 3 o 7, siendo el uso habitual en España de 7 alambres por cordón. Sus características mecánicas obtenidas mediante ensayo según norma UNE-EN ISO 15630-3 deben cumplir las siguientes prescripciones:

·Carga unitaria máxima  $f_{\max}$  será la siguiente según el número de cables que forman el cordón:

Para cordones formados por 2 o 3 alambres:

Designación	Serie de diámetros nominales, en mm	Carga unitaria máxima $f_{\max}$ en N/mm <sup>2</sup> no menor que:
Y 1770 S2	5,6 - 6,0	1770
Y1860 S3	6,5 - 6,8 - 7,5	1860
Y 1960 S3	5,2	1960
Y 2060 S3	5,2	2060

Para cordones formados por 7 alambres:

Designación	Serie de diámetros nominales, en mm	Carga unitaria máxima $f_{\max}$ en N/mm <sup>2</sup>
Y 1770 S7	16	1770



Designación	Serie de diámetros nominales, en mm	Carga unitaria máxima $f_{m\acute{a}x}$ en N/mm <sup>2</sup>
<b>Y1860 S7</b>	9,3 - 13,0 - 15,2 - 16,0	1860

- Límite elástico  $f_y$  comprendido entre 0,88-0,95 de la carga unitaria máxima.
- El alargamiento bajo carga máxima, medido sobre una longitud no inferior a 50 cm, no será inferior a 3,5%.
- La estricción a la rotura será visible a simple vista.
- El módulo de elasticidad tendrá el valor garantizado por el fabricante, con una tolerancia de  $\pm 7\%$ .
- La relajación a las 1000 horas a temperatura de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , y para una tensión inicial de igual al 70% de la carga unitaria máxima real, determinada no será superior al 2,5%.
- El valor medio de las tensiones residuales a tracción del alambre central deberá ser inferior a 50 N/mm<sup>2</sup> al objeto de garantizar un comportamiento adecuado frente a la corrosión bajo tensión.
- El valor del coeficiente de desviación  $D$  en el ensayo de tracción desviada, según UNEEN ISO 15630-3, no será superior a 28, para los cordones con diámetro nominal igual o superior a 13 mm.

La designación de los cordones según la norma UNE es la siguiente:

- Letra C
- Número X que designa el número de alambres seguido del diámetro nominal en mm del alambre.
- Las letras AH y el valor de la resistencia a tracción expresado en MPa.
- El grado de relajación del acero indicado como R2 o R6.

·Así por ejemplo un cordón formado por 7 alambres de diámetro nominal de 13,0 mm, resistencia a tracción de 1860 MPa y una relajación inferior a 6% se designaría como:

**C7-13,0-AH 1860-R6-UNE 36094.**

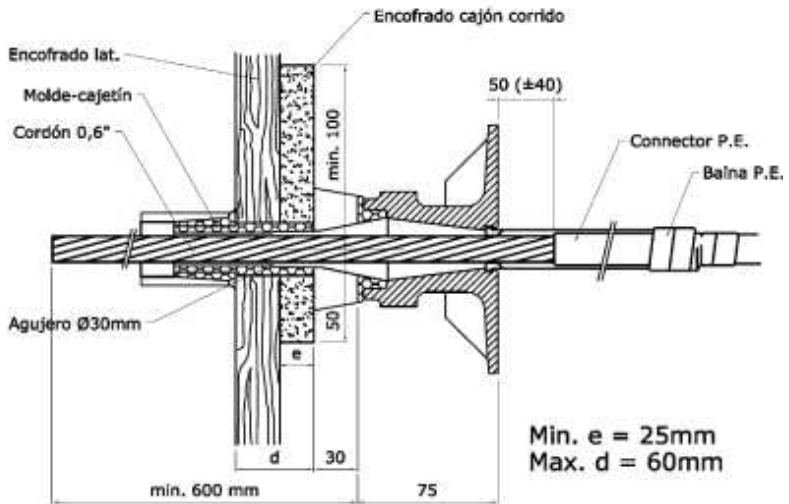
**Hormigón:** Según la EHE-08 la resistencia mínima exigida para un hormigón que se va a emplear en postesados es de 25 N/mm<sup>2</sup>, aunque se recomienda utilizar hormigones con mayores resistencias con el fin de evitar problemas de punzonamientos derivados de la ejecución de grandes luces, sería conveniente utilizar hormigones con una resistencia característica  $f_{ck}$  de 35 N/mm<sup>2</sup> a los 28 días. Este tipo de hormigón exige valores reducidos para la relación agua/cemento así como contenidos superiores a los 350 kg/m<sup>3</sup> y una granulometría muy estudiada. Debido a las características del proceso constructivo se requiere un cemento de alta resistencia inicial el 60-70% de su resistencia a los 28 días en tan solo un plazo de aproximadamente 3 días después del hormigonado.

**Vaina:** Es el conducto que aloja el tendón y que queda embebido en el hormigón una vez hormigonada la losa. Estas vainas tienen escasa adherencia con el hormigón debido a su superficie lisa e interiormente se engrasa para que el tendón no quede adherido. La capa de grasa sirve también como capa de protección anticorrosión. Las vainas suelen ser de polietileno de alta densidad o de otro tipo de material plástico resistente a la corrosión.

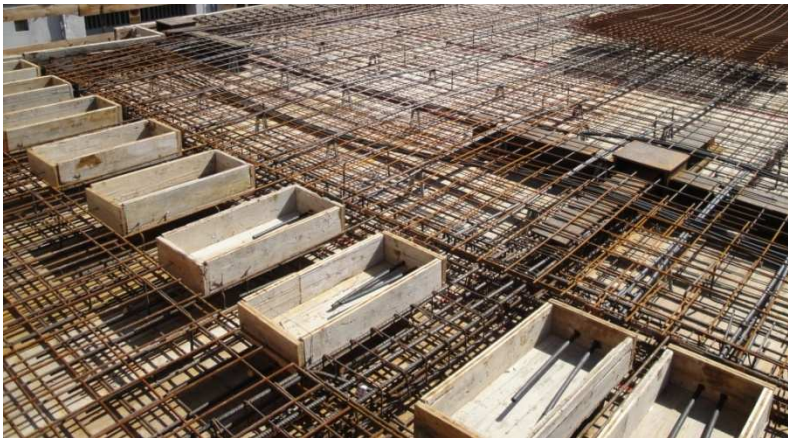
**Anclajes:** Los tendones se anclan a la losa mediante anclajes mecánicos individuales, capaces de desarrollar el 96%, como mínimo, de la carga mínima de rotura del tendón sin que se llegue a romper o deslizar la cuña. Los anclajes se suelen constituir con placas metálicas, cuñas y elementos protegidos frente a la corrosión. La cuña se coloca entre el extremo del tendón y la placa de anclaje una vez tesado el tendón y previamente a la retirada del gato hidráulico, una vez retirado el gato la fuerza del tendón hace que la cuña se clave levemente impidiendo el movimiento del tendón. La máxima penetración de la cuña en los anclajes será de 5 mm para tendones tesados al 75% de su valor máximo. Estos anclajes transmiten al hormigón la fuerza de pretensado concentrada en el extremo del tendón. Existen varios tipos de anclajes:

**Anclajes activos:** Son aquellos que sobresalen de la losa y permiten el tesado del tendón mediante gato hidráulico.

## DETALLE ANCLAJE ACTIVO



*Detalle anclaje activo.*

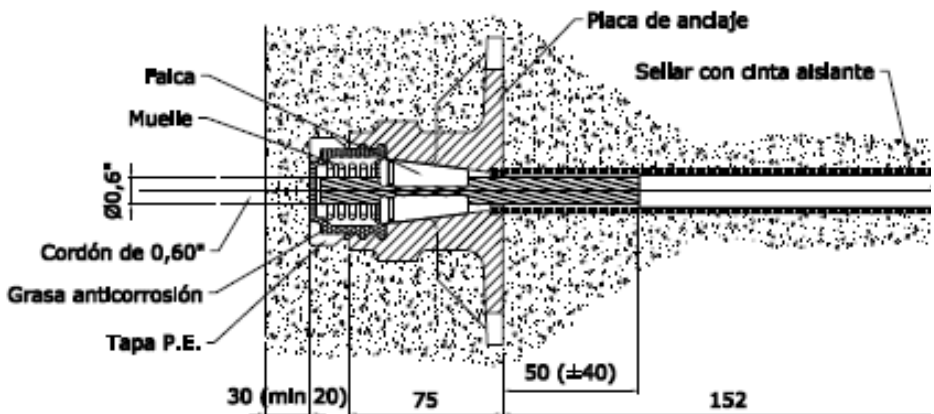


*Imágenes de encofrado para anclajes.*



*Momento del tesado con gato hidráulico.*

*Anclajes pasivos:* Este tipo de anclaje retiene la fuerza del tendón en el extremo opuesto donde se aplica el tesado con el gato hidráulico. Este tipo de anclaje queda embebido en el hormigón sin menoscabar sus prestaciones.



*Detalle anclaje pasivo.*



*Imagen de anclaje pasivo*

**Sillas:** Es el elemento utilizado como separador del tendón con el encofrado, así como, para dar la curvatura necesaria al tendón a través de la sección de la losa. Pueden ser de plástico o acero e incluso realizarse con ferralla propia de la obra. La separación máxima entre sillas o espaciadores será de 1 m.



*Imagen de silla de plástico.*



*Imagen del empleo de sillas para definir la curvatura de los tendones.*

### **3.2- CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS**

**Bancadas:** Son las superficies sobre las cuales se preparan los tendones, en obra o previamente en fábrica. En las bancadas se cortan y clasifican según su longitud y se preparan para ser utilizados en obra, realizando los premontajes de los anclajes pasivos.

**Gatos hidráulicos:** Son los elementos utilizados para realizar el tesado de los cordones, están accionados mediante las centrales hidráulicas.

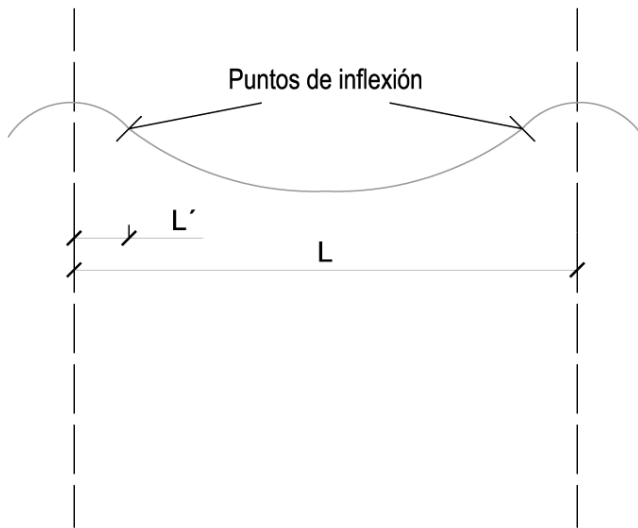


*Imagen de gato hidráulico utilizado para el tesado.*

Los gatos hidráulicos deben ser revisados periódicamente con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del mismo, así como, la transmisión correcta de la fuerza al cordón. Además, es necesario controlar la presión transmitida por la central hidráulica al gato mediante un manómetro.

### 3.3- TRAZADO DEL TENDÓN EN ALZADO

El trazado de los tendones se realiza dándole forma parabólica en los vanos con excentricidad máxima en el centro. Sobre los pilares se realiza la misma forma parabólica pero con curvatura inversa. El punto de inflexión entre ambas curvas se debe situar lo más cerca posible del eje del pilar, a una distancia  $d/2$  de la cara del pilar, de este modo se aprovecha al máximo la influencia del tendón frente al punzonamiento. Los radios máximos de curvatura en alzado deben ser mayores de 2,5 m.



La relación  $L'/L$  debe ser entorno al 0,05-0,10.

La distancia mínima entre diferentes capas de tendones en alzado será la distancia entre tendones.

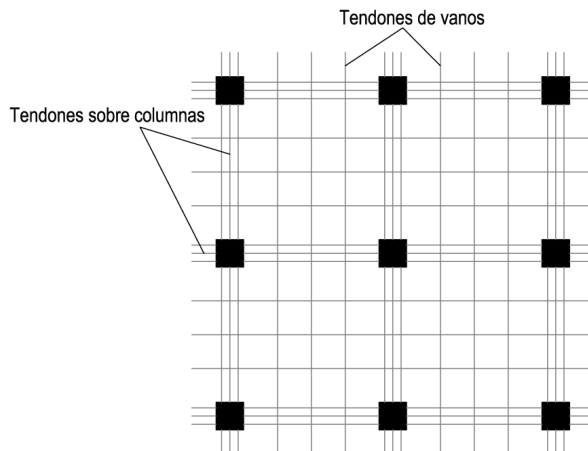
Para losas con cantos  $\geq 20\text{cm}$  y en vigas, se admiten desviaciones en la colocación vertical de hasta 5 mm. En losas  $< 20\text{ cm}$  la desviación permitida será de 2,5% del canto de la losa.

### 3.4- TRAZADO DE LOS TENDONES EN PLANTA

Existen diferentes soluciones para solucionar la disposición en planta de los tendones:

#### ***Tendones distribuidos en dos direcciones***

Este tipo de disposición presenta dificultades constructivas, debido a la dificultad de disponer en las dos direcciones familias de tendones con la misma excentricidad sobre los pilares.

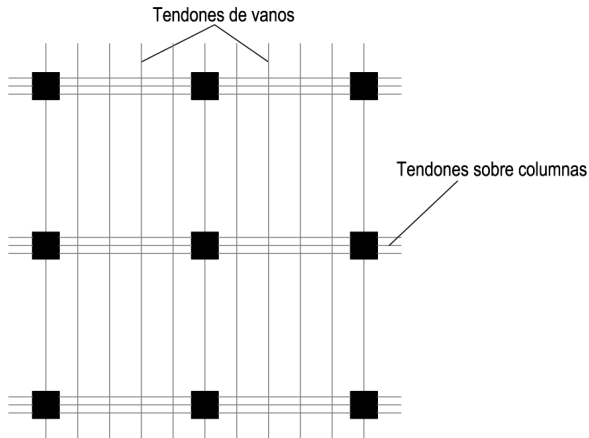


La concentración de tendones sobre pilares hace que mejore la resistencia al punzonamiento y sobre zonas de anclaje evita la aparición de tracciones en dichas zonas.

#### ***Tendones en banda en una dirección y distribuidos en la otra dirección***

Sólo existe intersección de tendones en la banda de soportes.

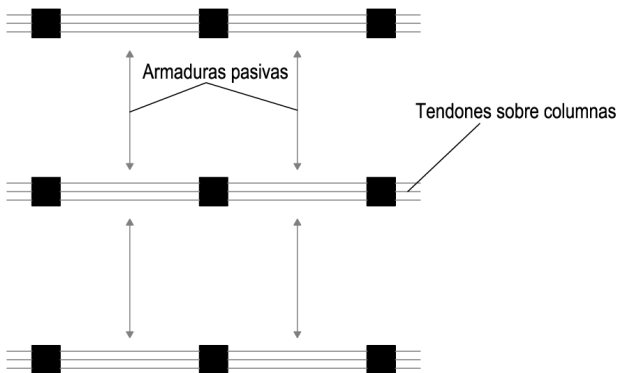




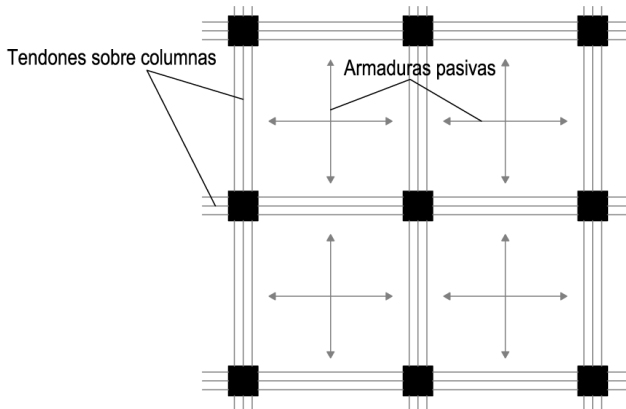
Este tipo de disposición potencia el comportamiento unidireccional de la losa. Se puede asemejar a un forjado unidireccional siendo las viguetas los tendones distribuidos uniformemente y las jácenas los situados en banda de soportes. Esta disposición de tendones consigue una precompresión uniforme de la losa en ambas direcciones, en cambio, crea tracciones en los anclajes necesitando un pretensado de borde para absorberlas.

***Disposiciones mixtas***

Disposición de tendones en banda de soportes y armaduras pasivas en una dirección.



Disposiciones de tendones en ambas direcciones sobre banda de soportes y armaduras pasivas en dos direcciones.



Una de las ventajas de este tipo de disposiciones mixtas reside en la posibilidad de realizar perforaciones, huecos, etc..., en la zona de armaduras pasivas sin peligro para la seguridad estructural del edificio.

El número de tendones agrupados dependerá de la decisión del proyectista hasta un máximo de 4 tendones por grupo.

El distanciamiento máximo entre tendones o grupos de tendones quedará determinado por el mayor de los siguientes valores:

- 7,5 cm.

- El doble de la dimensión horizontal del grupo.

La distancia máxima entre tendones será como máximo de 6 veces el canto de la losa, sin rebasar la distancia de 1,5 m.

Los paquetes de 2 a 4 tendones se atarán con estribos o cercos de  $\varnothing 10$  mm separados 70 cm. Esta aradura se colocará con función de sujeción y fijación durante el montaje, aunque no sea necesaria a efectos resistentes.

En cuanto a la tolerancia en la desviación horizontal de los tendones, hay que tener en cuenta que es el comportamiento de la losa es relativamente insensible a dichas desviaciones, por lo que, se permite hasta 20 mm de desviación horizontal.

### **3.5- ARMADURA LONGITUDINAL MÍNIMA**

#### ***Armadura superior***

En pilares interiores y en pilares de borde la armadura superior de momentos negativos debe cumplir:

$$A_s \geq 0,00075 \cdot h \cdot l$$

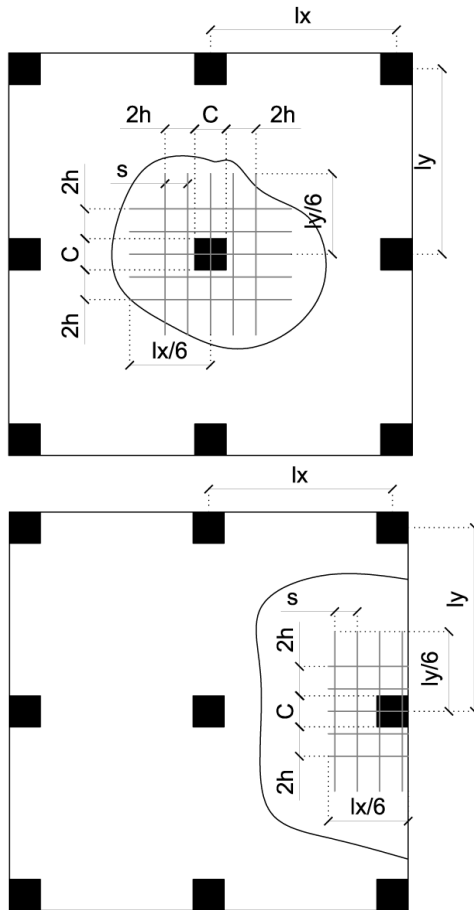
Donde, l es una banda de ancho c del pilar mas 2h a cada lado y h es el canto de la losa.

La separación entre barras no debe superar los 30 con un diámetro  $\geq 12$  mm.

No disponer menos de 4 barras en cada dirección, recomendándose que se concentren sobre pilares.

La longitud de las barras debe ser  $\geq 1/6$  de la luz del vano contiguo prolongándola a ambos lados del pilar.

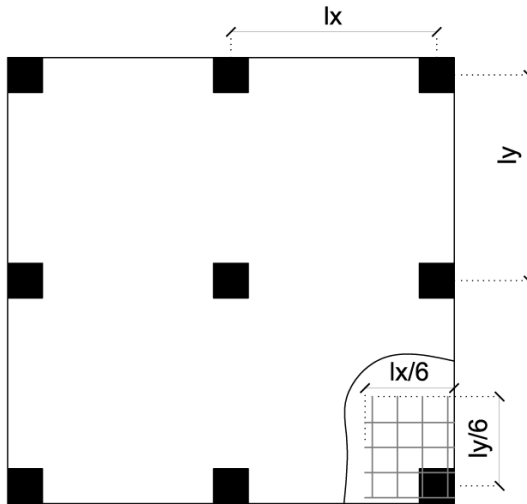
La armadura paralela al borde debe ser al menos el 50% de la calculada en el sentido perpendicular.



En pilares de esquina sin voladizos, la armadura paralela al borde de la losa debe cumplir:

$$A_s \geq 0,00075 \cdot A_c^l$$

$A_c^l$  es el área de la sección de la losa comprendida entre el borde y el centro del vano.



*Armaduras en pilar de esquina.*

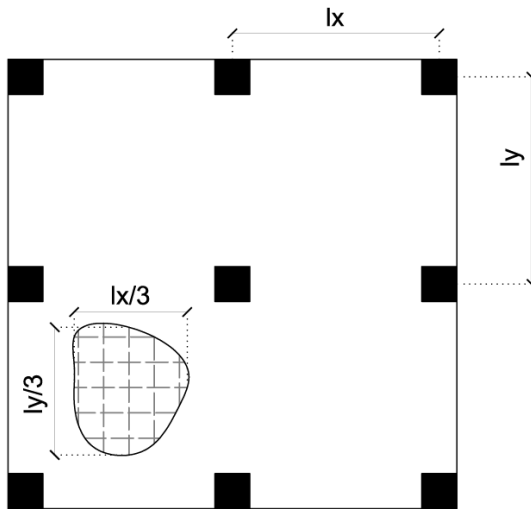
### ***Armadura inferior***

En zonas de vano interior y cuando por cálculo sea necesario la armadura debería cumplir:

$$A_s = N / (0,5 \cdot f_{yd})$$

N es la resultante de las tensiones sobre el hormigón en la zona traccionada para el caso de carga más desfavorable sin mayorar.

La tendrá una longitud  $\geq 1/3 l$  según la dirección de las tracciones.



*Armaduras en vano.*

En vanos de borde o esquina donde son mayores los momentos positivos, se ha demostrado que la ausencia de armadura pasiva inferior en situaciones de prerrotura, induce a un comportamiento unidireccional de la losa en trazados de tendones concentrados en una dirección y uniformemente distribuidos en la perpendicular. Para evitarlo es conveniente introducir una armadura en forma de mallazo con una cuantía de  $0,0023 \cdot b \cdot h$ , que contribuirá al mejor comportamiento frente a la fisuración e incrementará la ductilidad de la losa.

### **3.6- ARMADURA TRANSVERSAL MÍNIMA**

En sistemas unidireccionales en los que los cordones estén situados en vigas en T o en losas aligeradas con casetón recuperable, debemos disponer de un armado transversal mínimo en las almas que garantice el correcto alzado de los tendones. En caso contrario durante el hormigonado se pueden desplazar los tendones quedando fuera del trazado de proyecto, que posteriormente durante el tesado crearía fuertes tracciones en el alma, debido a la tendencia de los tendones a tomar un trazado rectilíneo.

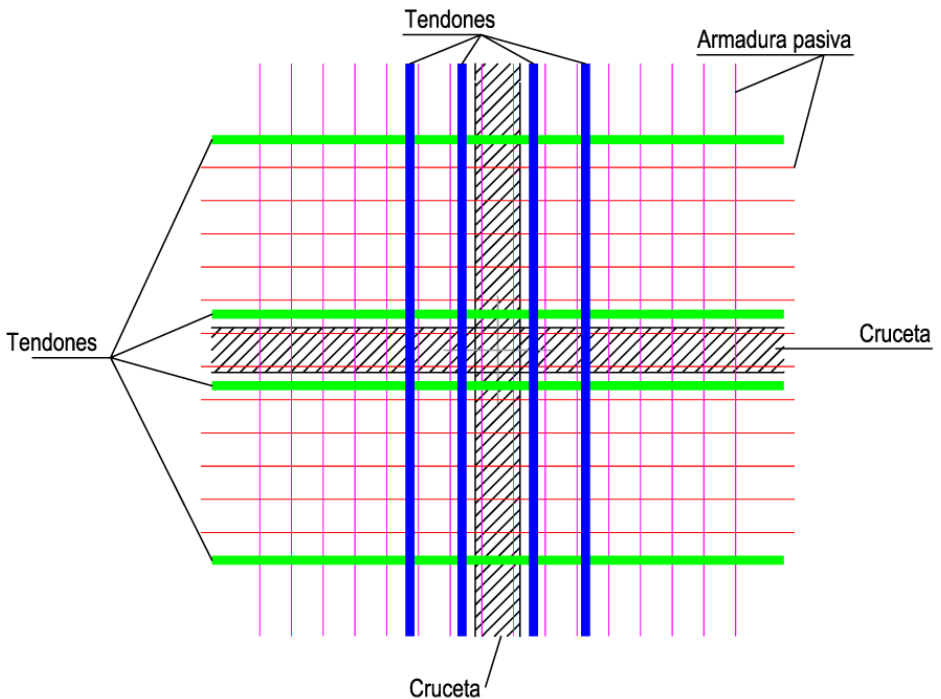
Aún cuando no se requiera armadura de cortante conviene poner un mínimo de cercos o estribos en el alma:

·Para grupos de 2 a 4 grupos de tendones, cercos de  $\varnothing 10$  separados 0,75 m.

·Para grupos de 5 ó más tendones, cercos de  $\varnothing 12$  separados 1 m.

### 3.7- ARMADO DE CAPITELES

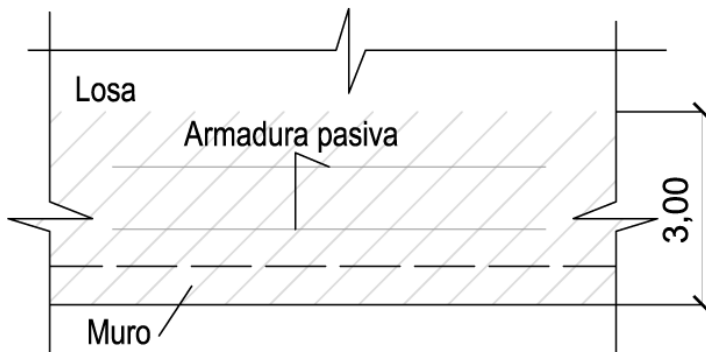
El armado de capiteles es uno de los más complejos en losas con cantos reducido, su misión es la de prevenir el punzonamiento sobre el pilar, ya que dicho esfuerzo queda acentuado por los esfuerzos del postesado.



*Armado de capitel.*

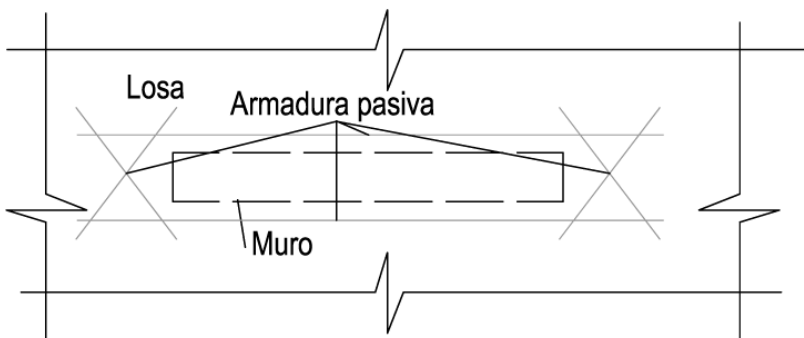
### 3.8- ARMADO EN BORDES Y ZONAS PRÓXIMAS A MUROS

Será necesario realizar un zuncho perimetral a lo largo de todo el perímetro de la losa compuesto por 2 Ø12 mm. En los bordes próximos a muros se deberá colocar una armadura pasiva con el fin de evitar la fisuración derivada de las deformaciones horizontales de la losa. Si se trata de muros exteriores la armadura debe quedar emplazada a una distancia no superior a 3 metros en dirección perpendicular al borde.



*Armadura pasiva junto a muro de borde.*

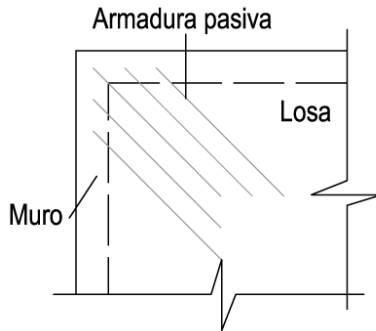
En el caso de encuentro de losa con muros interiores la forma correcta de proceder al armado será la siguiente:



*Armadura pasiva en muro interior.*



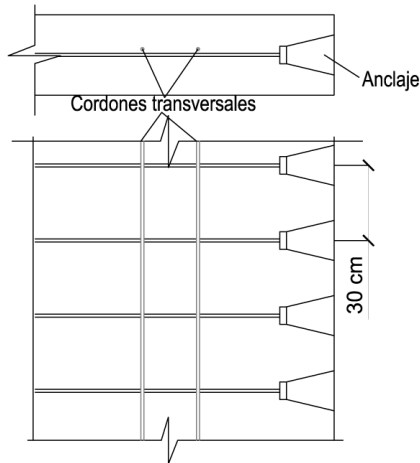
Para muros en esquinas:



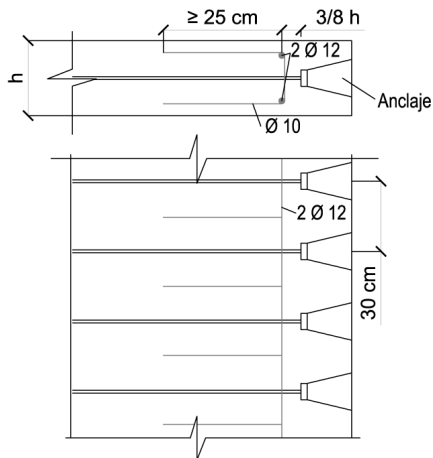
*Armadura pasiva en muro de esquina.*

### 3.9- ARMADO EN ZONAS DE ANCLAJES

En zonas donde nos encontremos con anclajes formados por 6 o más tendones concentrados con una separación máxima de 30 cm, deberemos colocar dos tendones en la dirección perpendicular a los anclajes, estos tendones deberán ser tesados previamente a los de los anclajes. En el caso de tendones distribuidos bastará con colocar horquillas formadas por 2 barras  $\text{Ø}12$  y estribos de  $\text{Ø}10$ .



*Armadura en zona de anclajes con 2 tendones transversales.*



*Armadura en zona de anclajes con horquillas.*

### **3.10- DURABILIDAD**

El pretensado asegura mayor durabilidad de la obra al restringir la fisuración, además la armadura activa se encuentra protegida dentro de la vaina con una capa de grasa. Es por todo esto que las losas postesadas están en mejores condiciones frente a la durabilidad que otro tipo de losas.

#### ***Materiales de protección***

El revestimiento de los tendones deberá proteger a los cordones frente a la corrosión. Esta protección se consigue con una capa lubricante de grasa de probada adherencia y estabilidad química, aplicada directamente sobre el acero, todo ello en una vaina plástica continua. La vaina debe tener la suficiente resistencia a tracción para prevenir el deterioro del tendón durante el transporte, puesta en obra y hormigonado.

No se podrán utilizar vainas de PVC debido al riesgo de formación de cloruros.

Si por cualquier motivo la vaina quedara dañada se debería proceder a la restitución y sellado del segmento dañado, asegurando un nivel equivalente de protección frente a la corrosión.

### ***Protección de los anclajes***

Excepto en casos especiales los anclajes quedarán embebido en el hormigón con un recubrimiento mínimo de 25 mm en vigas y 20 mm en losas. Hay que tener la precaución que durante el hormigonado la lechada de hormigón no entre en contacto con el anclaje y las cuñas.

### ***Recubrimientos***

Por lo general en este tipo de estructuras el recubrimiento de los tendones tiene la función de protección frente al fuego.

Canto mínimo en función del tipo de árido. (Según ACI Committee).

<b>Árido</b>	<b>Canto de la losa (mm) para una resistencia al fuego de:</b>				
	<b>1 hora</b>	<b>1,5 horas</b>	<b>2 horas</b>	<b>3 horas</b>	<b>4 horas</b>
<b>Calizo</b>	85	105	120	150	170
<b>Silíceo</b>	90	110	130	160	180
<b>Ligero</b>	75	85	95	120	135

Recubrimientos mínimos en vigas y nervios. (Según ACI Committee).

<b>Deformación térmica</b>	<b>Tipo de hormigón</b>	<b>Ancho de la viga (mm)</b>	<b>Recubrimiento (mm) para una resistencia al fuego de:</b>				
			<b>1 hora</b>	<b>1,5 horas</b>	<b>2 horas</b>	<b>3 horas</b>	<b>4 horas</b>
<b>Libre</b>	<b>Normal</b>	<b>205</b>	45	50	65	115	-
<b>Libre</b>	<b>Ligero</b>	<b>205</b>	40	45	50	95	-
<b>Impedida</b>	<b>Normal</b>	<b>205</b>	40	40	45	50	65
<b>Impedida</b>	<b>Ligero</b>	<b>205</b>	40	40	40	45	50
<b>Libre</b>	<b>Normal</b>	<b>&gt; 305</b>	40	45	50	65	75

<b>Libre</b>	<b>Ligero</b>	<b>&gt; 305</b>	40	40	45	50	65
<b>Impedida</b>	<b>Normal</b>	<b>&gt; 305</b>	40	40	40	45	50
<b>Impedida</b>	<b>Ligero</b>	<b>&gt; 305</b>	40	40	40	40	45

El recubrimiento mínimo en losas postesadas con armadura no adherente y tendones formados por un solo cordón de diámetro equivalente de 0,6” o menor, será de 2 cm.

En vigas y nervios con el mismo tipo de armadura activa y tendones, el recubrimiento mínimo será de 4 cm.

Para ambientes agresivos.

<b>Condiciones ambientales</b>	<b>Tipos de hormigón</b>	
	<b>H-25, H-30, H-35</b>	<b>H-40, H-45, H-50</b>
<b>Ambiente I</b>	20 mm	20 mm
<b>Ambiente II</b>	20 mm	20 mm
<b>Ambiente III</b>	30 mm	25 mm

**Ambiente I:** Para elementos protegidos de ambientes agresivos, únicamente expuestos durante el proceso de ejecución.

**Ambiente II:** Elementos expuestos a lluvia, a heladas estando completamente saturado o situado continuamente bajo el agua.

**Ambiente III:** Elementos expuestos a lluvia directa, continuas fases de mojado-seco, heladas sin estar saturado o altas concentraciones de humo corrosivo.

### **Zonas de anclajes**

El recubrimiento en zonas de anclajes deberá ser  $\geq 6,5$  mm superior al de zonas alejadas del anclaje.

En el caso de recubrimientos, las tolerancias y distancias entre armaduras activas serán del 20% del valor teórico. Si es necesario los tendones pueden ser desplazados para que no interfieran unos con otros, siempre y cuando no se respeten las tolerancias de desviaciones horizontales o verticales.

### 3.11- JUNTAS

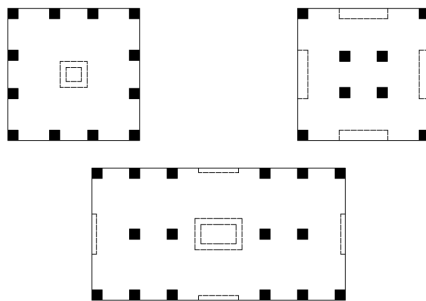
Existen 3 tipos fundamentales de deformaciones horizontales en losas postesadas:

- Las propias de la retracción del hormigón.
- Generadas por variaciones térmicas.
- Derivadas del pretensado, que se descomponen en 2:
  - Acortamiento elástico producido por la precompresión.
  - la fluencia originada por la precompresión.

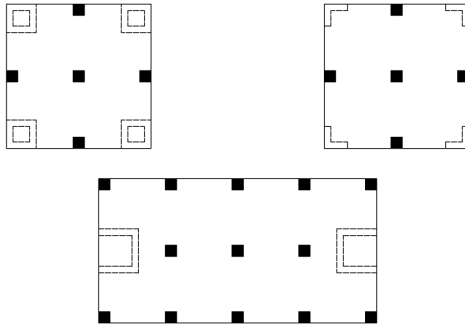
Se necesitan juntas, pues los pilares y muros coaccionan el libre movimiento de la losa, pudiendo llegar a producir tracciones inadmisibles.

Las juntas reducen la resistencia final de la estructura, por lo que tienen que ejecutarse únicamente las necesarias, intentando reducir su número.

#### ***Disposición de pilares y muros***



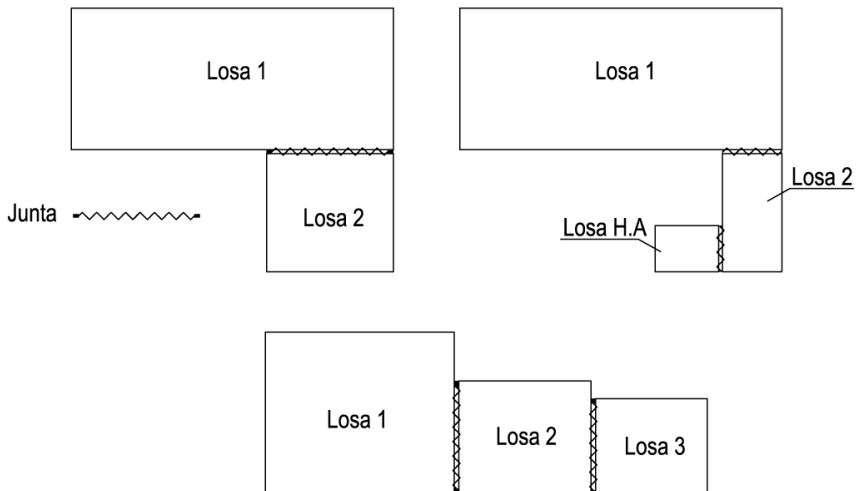
*Disposición adecuada de muros y pilares.*



*Disposición inadecuada de muros y pilares.*

### ***Juntas entre losas***

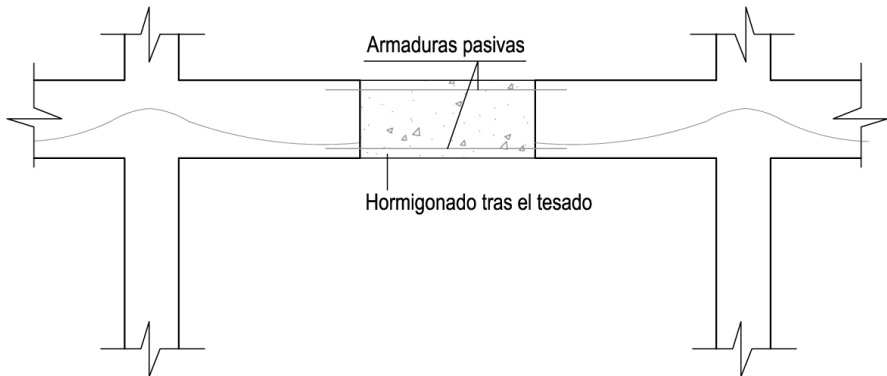
Quando nos encontramos con losas con una geometría muy irregular o con zonas descompensadas debemos separar estructuralmente la losa. Si en algún caso nos queda una losa de tamaño reducido podemos resolverla mediante el sistema tradicional de losa de hormigón armado.



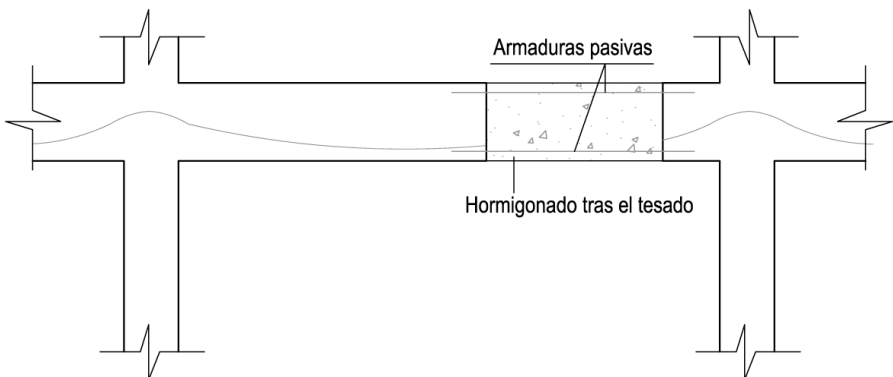
*Disposición adecuada de juntas entre losas.*

## ***Bandas de cierre***

Una banda de cierre constituye una separación temporal de entre 75-90 cm de ancho, separando dos regiones de la losa construidas de forma independiente, por lo que cada una trabaja de un modo distinto. En un plazo de 30-60 días, el espacio debe quedar hormigonado con hormigón antiretracción y armadura pasiva. El ancho de la banda será el suficiente como para poder colocar el gato para el posterior tesado.



*Banda de cierre en centro de vano.*

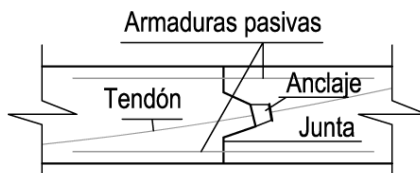
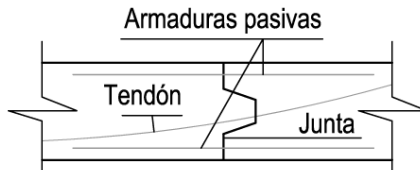


*Banda de cierre en extremo de vano.*

## ***Juntas de construcción***

Se trata de juntas que dividen la losa con el fin de facilitar la construcción de la misma y controlar la fisuración. Las juntas de construcción pueden llevar incorporados o no anclajes intermedios. La realización de juntas de construcción depende de:

- Longitud de la losa  $< 75$  m, no es necesario disponer de juntas ni bandas de cierre, a no ser que nos encontremos con una distribución inadecuada de pilares y muros.
- Longitud de losa entre 75-100 m, es necesaria banda de cierre central.
- Longitud de la losa  $> 100$  m, es necesaria una separación estructural.



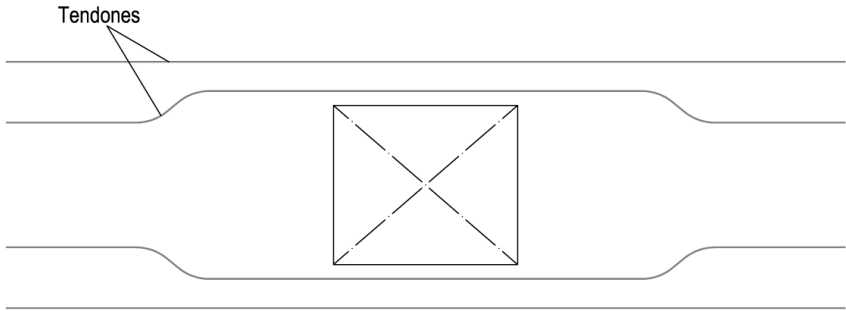
*Juntas con o sin anclaje intermedio.*

## **3.12- HUECOS**

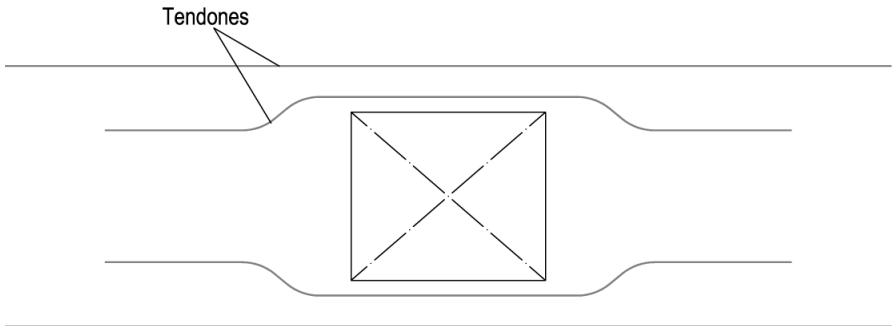
Los huecos deben ser resueltos con el fin de que las fuerzas horizontales inducidas por los tendones no provoquen fisuras en la losa. Para conseguirlo debemos colocar los tendones de tal forma que el radio de curvatura del tendón sea el suficiente, prolongando el tendón de forma rectilínea más allá del hueco y evitando



anclar los tendones en el borde del hueco, por último se colocará la armadura pasiva necesaria.

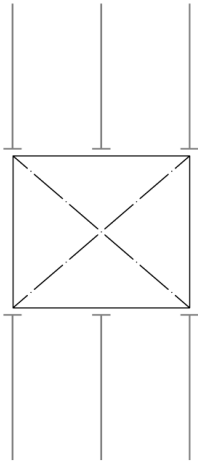


*Correcta solución en hueco.*

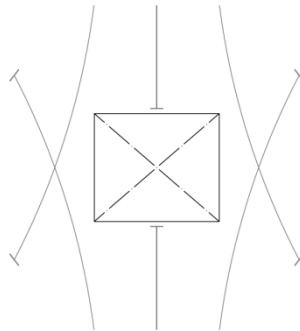


*Incorrecta solución en hueco.*

En caso de necesitar anclar los tendones en las inmediaciones del hueco se deberá proceder de la siguiente manera:



*Solución que favorece la fisuración.*



*Solución que elimina la fisuración.*

### 3.13- PATOLOGÍAS

Los daños que puede sufrir este tipo de estructura vienen derivados de los producidos por el hormigón o por el acero.

En primer lugar consideraremos los producidos por el hormigón:

**1.-Rotura del hormigón:** La rotura del hormigón se puede producir en la zona de anclajes debido a que en el momento del tesado el hormigón todavía no había alcanzado la resistencia necesaria, o que éste sea de una resistencia menor a la requerida.

**2.- Disminución de la capacidad portante:** Si se realiza el tesado cuando el hormigón no ha logrado alcanzar la resistencia necesaria o en condiciones de ambiente muy seco o húmedo, la capacidad portante de la estructura puede variar significativamente dejando de trabajar en las condiciones exigidas inicialmente.

**3.-Recubrimiento insuficiente:** Un recubrimiento insuficiente de los cordones o el uso inadecuado de los separadores puede hacer que estos queden expuestos de forma peligrosa en la superficie de la losa.

Con el fin de evitar los daños deberíamos utilizar un hormigón con la resistencia requerida, así como, realizar un cuidadoso vibrado en la zona de anclajes, con el fin de evitar huecos, y que de este modo quede el hormigón compactado. En el caso de que quedaran huecos detrás de los anclajes deberían ser rellenados previamente al tesado. Otro aspecto a tener en cuenta es realizar el tesado una vez las probetas del hormigón en zona de anclajes alcancen el 60%-80% de la resistencia a 28 días.

En caso de que surjan patologías después del tesado, como fisuras o rotura del hormigón, en zonas de anclaje, se procederá a su reparación mediante el refuerzo de toda la zona con chapas de acero, a modo de refuerzo de pilares, con lo que mejoraremos el reparto de tensiones e impediremos la penetración del anclaje en el hormigón.

Los posibles daños ocasionados por el acero pueden ser:

**1.-Rotura de cordones:** Debido a la pérdida de tracción del cordón como consecuencia de la corrosión este puede llegar a romperse provocando la rotura del hormigón tanto superior como inferiormente, así como el levantamiento del pavimento o el revestimiento de la losa.

**2. Corrosión del armado:** Normalmente este tipo de daños se da en losas postesadas con tendones no adherentes debido a que están más expuestos que los adherentes. La corrosión se produce debido a la filtración de agua a través de fisura que aparecen previamente al tesado y como consecuencia de un curado inadecuado del hormigón. Una incorrecta protección del cordón también puede dar como resultado la corrosión del mismo y posteriormente producir su rotura.

**3.-Exceso de tesado:** Un exceso de tesado puede provocar la rotura tanto del cordón como del hormigón.

Para evitar daños provocados por el acero deberemos colocar los cordones cuidadosamente según se marca en proyecto rectificando cualquier curvatura local inadecuada. Los elementos colocados con el fin de sujetar los cables no dañarán en ningún caso las vainas de los mismos. Se procederá a un correcto trazado de los cables a su paso por huecos, aberturas (según punto 3.12) con el fin de evitar fisuraciones. El vertido de hormigón se realizará de modo que no modifique ni produzca alteraciones en el trazado de los cables. Se comprobará el equipo de tesado antes de tesar los cables, realizando la fuerza necesaria marcada en proyecto y comprobando que las deformaciones y alargamientos son los previstos.

La forma correcta de poder comprobar el alargamiento y las deformaciones durante el tesado es realizarlo en dos tiempos. Primero introduciremos el 10% de la carga solicitada y posteriormente llegaremos hasta la carga final.

Los anclajes deberá estar protegidos correctamente frente a la corrosión y el fuego, deben quedar embebido completamente en el hormigón o ser recubiertos con pinturas o grasas con el fin de alcanzar la misma protección que el resto de la estructura.

En caso de que se produzcan daños deberán ser reparados teniendo en cuenta en que grado han afectado a la losa, ya que dependiendo del daño sufrido rellenaremos las fisuras o sustituiremos parcial o totalmente el cordón dañado.

### **3.14- PROCESO DE EJECUCIÓN**

El primer paso para llevar a cabo la correcta construcción de una estructura de hormigón armado, ya sea postesado o con armaduras pasivas, es realizar un óptimo plan de obra, pudiendo tener como referencia el siguiente:

1. Acopio de materiales.
2. Colocación de cimbras y encofrados.
3. Colocación de mallazo o armadura pasiva inferior.
4. Colocación de anclajes activos.
5. Colocación de separadores o silletas para los tendones.
6. Colocación de los tendones.
7. Colocación de la armadura pasiva superior y en anclajes.

8. Protección de anclajes y acopladores frente a la entrada de hormigón.
9. Vertido y compactación del hormigón.
10. Curado del hormigón.
11. Tesado. Clavado de cuñas.
12. Clareado de puntales. Reapriete de cimbras.
13. Corte de los excesos o rabos de armadura activa.
14. Hormigonado del anclaje para su protección.

Con la finalidad de obtener un óptimo aprovechamiento de materiales y equipos debemos estudiar la posibilidad de contar con varias zonas de trabajo, de este modo podemos simultanear distintos trabajos.

### **1. Acopio de materiales.**

Una vez recepcionados los materiales en obra deben ser acopiados agrupándolos según el tipo de cable del que se trate, también deberemos preparar los anclajes, cuñas...etc.

### **2. Encofrado y cimbrado.**

Se puede utilizar cualquier tipo de encofrado, siempre y cuando aseguremos la rigidez del mismo, con el fin de que no varíen las cotas finales de los tendones debido a las deformaciones del encofrado durante el hormigonado.

En caso de que observemos los tableros excesivamente desecados, por la exposición al sol, deberemos regarlos con agua para humectarlos antes de hormigonar, de este modo evitaremos que embeba el agua del hormigón haciendo que mermen sus características.

Debemos ser muy cuidadosos con el paralelismo y planeidad de las caras del encofrado, de este modo evitaremos sobrepesos, reducciones de sección y variaciones en el trazado de los tendones, para evitar estos errores deberemos hacer uso de niveles dejando toques y puntos de referencia en los forjados.

En el caso de encofrar con mesas, el sellado entre la unión de las mesas lo podemos realizar con cinta adhesiva de empaquetar (cinta americana).

Se debe tener en cuenta que la colocación de puntales no entorpecerá el tránsito de operarios y materiales a través de los forjados.

Podemos utilizar como referencia, para controlar el tesado y el movimiento del forjado, el despegue de éste con la cimbra.

Será conveniente reapretar la cimbra antes de proceder a hormigonar el forjado superior, para ello, contaremos con husillos adecuados y ergonómicos.

### **3. Colocación de armaduras.**

- Armadura pasiva inferior (malla electrosoldada).
- Silletas de soporte de la armadura activa y de la armadura pasiva superior.
- Armadura de refuerzo en zonas de anclaje.
- Armadura de borde en zunchos y huecos.
- Armadura activa.
- Armadura pasiva superior.

Los cables deben ser acopiados separados del suelo para evitar la humedad, el calor, ambientes agresivos...etc.

Los cables con anclajes pasivos en el extremo deberán traerlo confeccionado en taller, pudiendo realizarse en obra previo aviso al suministrador.



*Armadura inferior pasiva, silletas y armadura activa.*

#### **4. Anclajes activos.**

Los anclajes irán firmemente sujetos a las tablas de encofrado mediante el sistema de atornillado proporcionado por el fabricante, de este modo evitaremos desplazamientos o variaciones en el ángulo de incidencia del gato hidráulico.

Con el fin de evitar un cambio brusco de dirección en el anclaje éste dispone de un manguito rígido que quedará embebido en el hormigón, además, con el fin de evitar presiones puntuales, que puedan ocasionar roturas en el hormigón y posteriores problemas, el cordón deberá salir ortogonalmente a la placa de anclaje. Es buena práctica sellar el manguito rígido con cinta adhesiva con el fin de evitar que pueda penetrar lechada entre el manguito y el cordón lo que provocará problemas durante el tesado e incluso la rotura del cable.

Para la ejecución de una zona de anclajes activos colocaremos primero la armadura pasiva de reparto y posteriormente se colocaran los cables en los anclajes ya que si lo hiciéramos al contrario dificultaríamos el trabajo.



*Zona de anclajes activos.*

## **5. Silletas o separadores.**

Antes de colocar la armadura pasiva inferior deberemos replantear las líneas sobre las que irán posicionadas las silletas de soporte de los tendones, acotando tanto la posición de la silleta como la altura de la misma. Estarán separadas como máximo 1 metro. Se admiten errores en la colocación de las silletas de 1 cm en planta. En el trazado en alzado del tendón se admitirán desviaciones de hasta 5 mm o  $h/40$ . Las silletas deben ser lo suficientemente rígidas como para soportar el tendón sin producirse roturas o deformaciones que varíen el trazado de los cables. Es muy importante tener en cuenta este factor, ya que silletas realizadas con barras de 8-12 mm de diámetro llegan a provocar errores de hasta 10 mm debido a las deformaciones que sufren al ser pisadas y errores en el doblado de las patas.

Una vez realizado el replanteo de las silletas se coloca la armadura pasiva inferior para posteriormente colocar las silletas en sus posiciones.





*Colocación de silletas.*



*Trazado de cables sobre silletas.*

## **6. Colocación de tendones.**

En la colocación de los tendones deberemos tener en cuenta el orden en que los colocamos, de no hacerlo podríamos retrasar la ejecución de la estructura, ya que los tendones van entrelazados.

En primer lugar deberemos colocar los tendones agrupados, una vez colocados sobre sillelas múltiples colocaremos los tendones repartidos. Los tendones son atados a las sillelas mediante alambres para evitar que se muevan durante la colocación de los tendones y el hormigonado. Los cables que van agrupados pueden ser colocados de dos en dos en horizontal, en grupos de tres formando un triángulo o de cuatro en cuatro. La separación recomendada entre tendones, para evitar atascos durante el hormigonado y que el vibrador pase sin problemas, debe ser superior a 5 cm.

La colocación de los tendones se puede complicar cuando se cruzan varias familias de tendones ortogonalmente, por lo que en ocasiones seguir el trazado de proyecto es imposible a pie de obra, en estos caso se puede variar la forma de entrelazar los tendones, eso si, sin variar los radios de curvatura ni la posición de los mismos.

Para comprobar si los tendones están correctamente alineados podemos tomar como referencia la armadura pasiva inferior, en caso de que no esta no existiera resultaría muy difícil evitar que los tendones se curvaran en el plano horizontal generando solicitaciones no previstas a la estructura.



*Entrelazado de tendones.*

## **7. Colocación armadura superior.**

La armadura superior irá colocada sobre pates independientes de los de la armadura activa y serán lo suficientemente rígidos como para que no se deformen cuando se circule por encima de ellos en la obra.

Se debe tener la precaución de no apoyar los pates de la armadura superior en los cables, ya que podría producir daños o variaciones en el trazado.



*Colocación de la armadura pasiva superior sobre pates.*

## **8. Hormigonado.**

Debemos utilizar un hormigón fluido, capaz de colarse entre armaduras y tendones y que alcance una alta resistencia a edades tempranas.

Las juntas de hormigonado dividirán el forjado en segmentos lo suficientemente pequeños como para poder ser hormigonados en un día. Aunque los tendones pueden pasar las juntas sin conectores es aconsejable la colocación de los mismos. En el caso de encontrarnos con muros o columnas con la suficiente rigidez como para coartar la libre deformación axial de la losa deberemos colocar bandas de cierre, éstas no se hormigonarán durante un tiempo con el fin de crear distintos segmentos independientes, de este modo evitaremos fisuras por retracción y solicitaciones en los muros en lugar de la losa. Las bandas de cierre deben estar armadas correctamente.

Durante el hormigonado evitaremos el movimiento de cualquier elemento de la losa y en las zonas de anclaje, durante el vibrado, evitaremos la aparición de coqueas que puedan inducir a la aparición de patologías posteriores. El vibrado puede realizarse tanto con regles vibrantes como con vibrador de aguja, si bien el uso de los primeros es más aconsejable, ya que se evita el pisado de las armaduras por parte de los operarios, las armaduras de espera de los pilares pueden dificultar su uso.

Durante la colocación de dos tongadas adyacentes de hormigón no debe pasar más de 1 hora, de este modo con el vibrador podemos coser las dos tongadas sin crear juntas.



*Vertido del hormigón mediante bomba y vibrado con aguja.*



*Hormigonado y vibrado con regla vibratora.*

## **9. Curado.**

Hay que realizar un curado cuidadoso, regando con aspersores a partir de las 3 ó 4 hora posteriores al hormigonado, que es cuando empieza a fraguar el hormigón.

Mantendremos el regado durante 24 horas, conservando la humedad durante una semana, teniendo siempre en cuenta las condiciones meteorológicas. Como opciones podemos colocar plásticos para retener la humedad o colocar laminas de geotextil humedecidas. No se puede utilizar líquidos de curado o aceleradores de fraguado que contengan cloruro cálcico.

Al día siguiente del hormigonado ya se puede acopiar material en el forjado, siempre y cuando se tenga la precaución de realizarlo en la zona donde se hormigonó primero y en zonas macizas, nunca en zonas aligeradas.



*Curado del hormigón con utilización de plásticos.*

## **10. Tesado.**

Una vez obtenidas en las probeta, en condiciones de obra, entre el 60-80% de la resistencia a 28 días podemos empezar con el proceso de tesado de los tendones.

En primer lugar desencofraremos la zona de anclajes, sacaremos el tapón de plástico, colocaremos las cuñas en los anclajes activos y pintaremos los cables, con el fin de comprobar el alargamiento durante el tesado.

Se tesan los cables en el orden establecido en proyecto, primero siempre los que transmiten su carga a los pilares y posteriormente los que transmiten su carga a los tesados previamente. Si tesamos sin tener en cuenta el orden de ejecución podemos llegar a inducir tensiones no deseadas en la estructura. En el caso de familias de tendones con ambos anclajes activos deberemos tesar de forma alterna.

La forma de controlar el tesado es mediante el manómetro del gato hidráulico y el alargamiento sufrido por el tendón, se puede aceptar una variación de un  $\pm 7\%$  en el alargamiento entre una medida y la otra. En caso de que la diferencia sea superior se debe estudiar el motivo, que por lo general, se debe al coeficiente de rozamiento adoptado, el módulo elástico del acero del tendón o en los cálculos, de no ser así puede que la vaina se haya roto en algún punto del tendón por lo que deberemos adoptar las medidas oportunas.

Todo el tesado debe quedar registrado, marcando en una tabla, el orden de tesado, la fuerza a introducir y el alargamiento del tendón.

Se debe tener la precaución y el control suficiente sobre los equipos y materiales de tesado para evitar cualquier tipo de accidente, la probabilidad de rotura de un tendón se sitúa alrededor del 1 cada 3000 anclajes activo. Debido a que los accidentes durante la operación de tesado suelen ser fatales se deben tomar tantas medidas de seguridad como sea necesario.



*Eliminación del encofrado y del tapón de plástico.*



*Proceso de tesado durante el cual no hay operarios cerca del gato hidráulico.*

### **11. Desencofrado y descimbrado.**

Los puntales y cimbras, a excepción de los laterales, deben permanecer colocados hasta la puesta en tensión de la losa, los laterales pueden quitarse antes. En la última planta podemos retirar la totalidad de las cimbras una vez tesados los tendones, en caso de ser una planta intermedia podemos realizar un clareado retirando el 50% de los puntales, el resto se podrá retirar una vez el hormigón alcanza la resistencia necesaria para soportar cargas, lo que se da entre los 7 ó 14 días.

### **12. Corte de excesos de puntas y protección de anclajes.**

Una vez anclados los tendones debemos cortar con radial las puntas sobrantes a tope de la parte exterior del anclaje, una vez cortados se rellena con mortero. No se permite el corte mediante soldadura, ya que el calor generado podría afectar al comportamiento del tendón, del mismo modo, queda prohibida la utilización de los cables como toma de tierra para la ejecución de soldaduras.



### **13. Precauciones**

Una vez acabada la estructura no se deben realizar perforaciones en las zonas de cables, a no ser, que tengamos la suficiente certeza de que no vamos a provocar ninguna rotura de tendón, lo cual podría ser fatal. Hay que tener también especial precaución con el uso de pistolas de clavos para hormigón, ya que podrían dañar los cables en las zonas donde los recubrimientos sean mínimos.

La obra llevará un control de calidad intenso debido a que se trata de una estructura postesada con un hormigón con resistencias superior a 25 N/mm<sup>2</sup>, deberemos controlar la resistencia del hormigón a 2, 3, 7 y 28 días, también deberemos controlar la geometría de los cables, así como el hormigonado y vibrado, sobre todo en las zonas de anclajes y por último la operación de tesado.

## **4- VENTAJAS Y DESVENTAJAS FRENTE A FORJADOS DE LOSAS ARMADAS CONVENCIONALES**

Debido a la propia naturaleza del postesado este genera ventajas respecto a la utilización de otro tipo de forjados de losas convencionales utilizados tradicionalmente en nuestro país:

- Las fuerzas producidas por el tesado neutralizan en gran medida las cargas exteriores por lo que a efectos prácticos éstas se reducen notablemente.

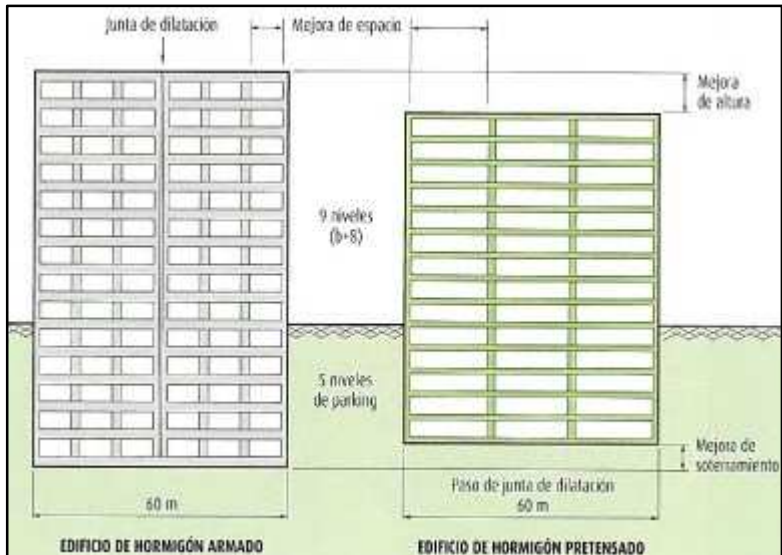
- El postesado hace que la estructura esté permanentemente comprimida por lo que es más rígida, durable y estanca que otro tipo de estructuras que generalmente cuentan con fisuras, quedando la deformabilidad instantánea considerablemente reducida.

- La deformabilidad diferida, producida por las cargas permanentes, también queda reducida notablemente debido al sistema de cargas introducido por el postesado (Load Balancing), ya que se crean deformaciones y flechas permanentes contrarias a las cargas permanentes.

- Se consiguen forjados más resistentes ya que los forjados postesados se ejecutan con materiales de alta resistencia.

- Al tener un mejor comportamiento frente a la fisuración, se mejora la resistencia de las armaduras frente a la corrosión.

- Todas estas características hacen que se consiga reducir los cantos de forjados, reduciendo la armadura pasiva y el peso propio de la estructura permitiendo a su vez aumentar las luces entre pilares e incluso en edificios de gran altura se puede lograr para una misma altura edificable una mayor cantidad de plantas con el consiguiente beneficio económico que ello supone.



- Se aumenta la velocidad de construcción reduciendo los plazos de ejecución debido a las altas resistencias conseguidas a edades tempranas que permiten descimbrados más prematuros, continuando con los trabajos en cotas superiores.

- La sencillez de ejecución de los forjados de losas postesadas, así como la necesidad de emplear menor cantidad de hormigón y armaduras pasivas, hace que los plazos de ejecución se reduzcan notablemente, reduciendo así el plazo de entrega de la estructura.

- La reducción del peso propio hacen que disminuya la carga total que llega a la cimentación, por lo que esta puede ser más ligera, ahorrando hormigón y acero.

- Son estructuras más económicas ya que se ahorra hormigón y acero frente a otras estructuras con resistencias similares.

- Se reduce hasta un 30% el canto del forjado sin disminuir la capacidad portante.

- Tiene mejor resistencia al fuego debido a la fisuración limitada.

·Con un trazado de cables apropiado se mejora la resistencia a punzonamiento.

·La posibilidad de desencofrar nada más tesar los cables (sobre el 3<sup>er</sup> día después del hormigonado) hace posible un ahorro en puntales y encofrados ya que no hay necesidad de que las plantas inferiores estén apuntaladas durante la ejecución de los forjados superiores.

·Además en el sistema de forjados postesados con tendones no adherentes existe la posibilidad de retesar, inspeccionar o sustituir los tendones a posteriori.

·Desde el punto de vista medioambiental el forjado postesado también ofrece mayores ventajas que los forjados tradicionales esto es debido a que por la propia naturaleza del forjado y su proceso de construcción se necesitan menores cantidades de materiales, elementos estructurales, mano de obra, puntales, transporte de materiales...etc., lo que hace que se consuma menor cantidad de energía durante el proceso constructivo de la estructura. Además debido a la reducción de volumen en las estructuras de forjados postesados, éstas necesitan de menor energía para acondicionar los espacios que albergan (electricidad, aire acondicionado...).

No todo son ventajas en este tipo de forjados, también cuenta con inconvenientes tales como:

·Aunque se utiliza menor cantidad de hormigón, el que se utiliza es de alta resistencia por lo que el coste por m<sup>3</sup> es mayor que en el caso de hormigones convencionales.

·Necesidad de mano de obra especializada durante el proceso constructivo, tanto durante la colocación de tendones como el posterior tesado de los mismos.

·Necesidad de mayor espacio para el encofrado debido a las zonas auxiliares para colocar los gatos hidráulicos que tesarán la estructura.

·Necesidad de un control mayor sobre las deformaciones sufridas por la estructura debido a la esbeltez.

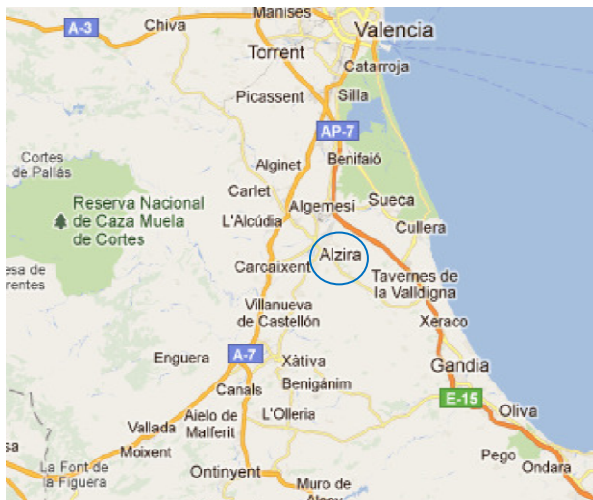
Se trata de estructuras poco flexibles a la hora de realizar modificaciones en proyecto y en ejecución. Por ejemplo se tiene que tener fijado desde un principio por donde transcurrirán los huecos de instalaciones ya que una vez hormigonado es tremendamente peligroso agujerear zonas del forjado donde existen armaduras activas, debiendo buscar zonas donde sólo se encuentren armaduras pasivas (zonas pasivas) que son más susceptibles de ser perforadas sin comprometer la seguridad de la estructura.

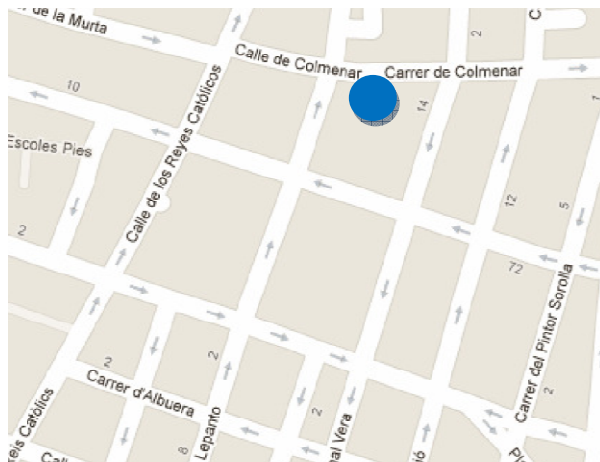
Las reparaciones del forjado debido a roturas de cables, sean cuales sean las causas, son muy complicadas y requieren de mano de obra especializada.

## 5- EJEMPLO DE APLICACIÓN EN LA BIBLIOTECA MUNICIPAL DE ALZIRA

El siguiente punto tiene como objetivo exponer, sobre un ejemplo práctico, lo anteriormente desarrollado en los diferentes puntos. Para ello tomaremos como ejemplo práctico la ejecución de una biblioteca municipal en la localidad de Alzira (Valencia). Actualmente el proyecto se encuentra en ejecución, el plazo de entrega concluye a finales de 2011, el proyectista es Enrique David Llácer, arquitecto y arquitecto técnico, así como profesor de la ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA DE LA EDIFICACIÓN, en el Departamento de Construcciones arquitectónicas, también actúa en la obra como parte de la dirección facultativa siendo uno de los Directores de Obra junto con el arquitecto municipal de la localidad Ambrosio Ferrer Portillo. El contratista de la obra es la empresa constructora HIPUHA, S.L., empresa con gran experiencia en la ejecución de obras tanto residenciales como no residenciales.

El edificio se encuentra emplazado en pleno centro urbano de Alzira, concretamente en la C/ Colmenar, 30:





El edificio está constituido por un total de 5 plantas, planta baja + 4 plantas sobre rasante, y una planta sótano cuyo uso es de garaje. Está situado entre medianeras, teniendo dos fachadas principales, una en la C/ Colmenar y la otra, que será el acceso a la biblioteca, situada en la plaza interior que se construirá junto con la biblioteca.

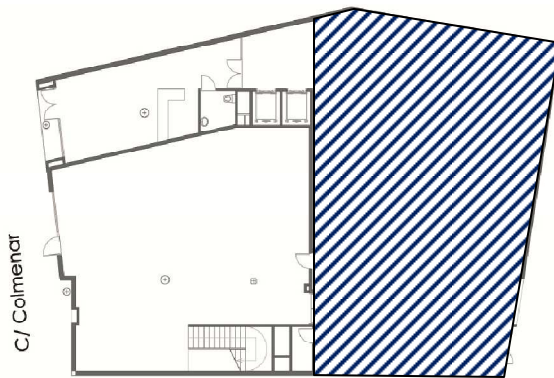
En un principio los forjados se iban a ejecutar con losa maciza y vigas de canto pero un posterior estudio realizado por el proyectista y el contratista determinó que económicamente sería más viable la opción de ejecutar los forjados de la estructura mediante losas postesadas. Otro de los aspectos que determinaron la tipología final de los forjados fue la necesidad de espacios diáfanos, consecuencia de la tipología edificatoria. Se necesitaban grandes luces entre pilares para conseguir los espacios que definirían las necesidades de la biblioteca, con otro tipo de forjados se necesitaban grandes cantos, así como, vigas de cuelgue que consecuentemente limitaban excesivamente la altura libre de las diferentes plantas, complicando el trazado de instalaciones, necesitando una mayor cantidad de hormigón y acero...etc.

Una vez estudiados los diferentes aspectos, económico, técnico...etc., se determinó que la mejor opción sería la ejecución de losas postesadas.

A continuación se expondrá gráficamente la solución adoptada para la ejecución de los forjados de la biblioteca mediante losa postesada.

En primer lugar observaremos la zona de forjados cuyas fachadas están orientadas al interior de la plaza.

Se trata de un forjado de unos 254 m<sup>2</sup> soportado únicamente por cuatro soportes metálicos, con un canto de forjado de 30 cm de espesor (con la opción de vigas de cuelgue el canto de la losa era de 35 cm, a lo que había que sumar el canto de las vigas). Se optó por una tipología de estructura mixta, forjados de hormigón armado y postesado y soportes metálicos, debido a que las secciones de soportes de hormigón eran excesivamente elevadas y la forma de reducirla era sustituir los soportes de hormigón por los metálicos.



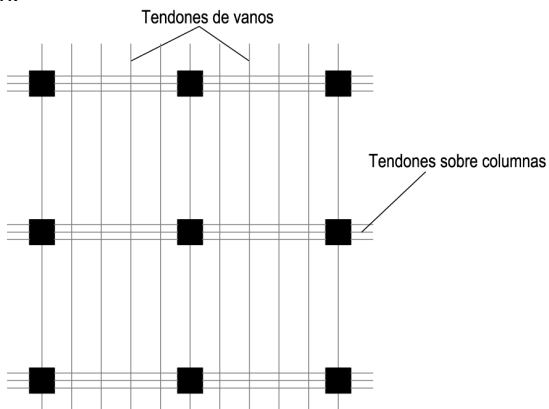
P. baja





*Imagen aérea tomada desde la grúa torre.*

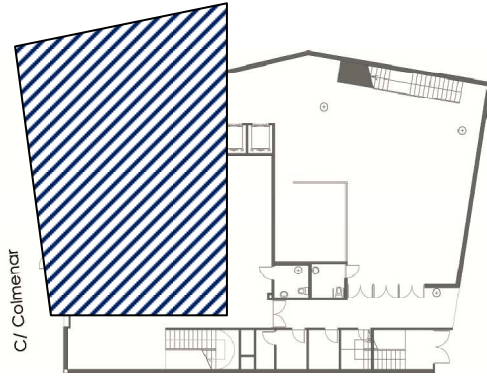
En la imagen anterior podemos comprobar cómo la opción elegida para la distribución de los cables es la de tendones en banda en una dirección y distribuidos en la otra dirección.



Podemos observar además que la estructura es mixta con forjados de hormigón, acero y tendones postesados, y soportes metálicos tipo HEB con chapas soldadas en los extremos de las alas, formando de este modo pilares con sección cuadrada (soportes armados). La imagen muestra como se han distribuido las juntas de losa, creando una losa “principal” que es la que se ejecuta con tendones postesados y otras losas de menor tamaño que se ejecutarán con hormigón armado (armaduras pasivas).



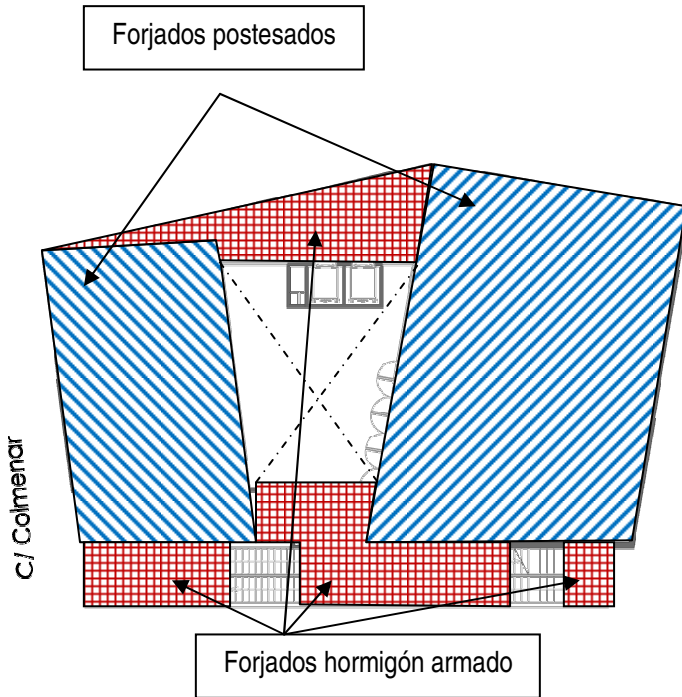
A continuación observaremos la zona de forjados cuya fachada se encuentra situada en la C/ Colmenar. Para esta zona se ha recurrido a la misma tipología de forjados postesado que la anterior, tendones en banda en una dirección y distribuidos en la otra, los cuatro soportes, también metálicos, soportan un forjado de unos 160 m<sup>2</sup>, y al igual que en la zona anterior la losa queda dividida en forjados de menor superficies, siendo el principal de losa postesada y los secundarios, de menor superficie, de hormigón armado.



P. baja



La distribución de losas, postesadas y de hormigón armado, de los forjados queda determinada de la siguiente manera:





## **6- COMPARATIVA ECONÓMICA**

En el siguiente punto se hará una comparativa desde el punto de vista económico entre un forjado de losas convencionales y un forjado de losas postesadas, de este modo y vistos los aspectos técnicos tendremos una visión global de las ventajas que supone la ejecución de forjados de tipo postesado frente a forjados convencionales.

En primer lugar observaremos una comparativa entre los planes de trabajo de un tipo de forjado y otro con lo que podemos estimar el tiempo de ejecución de cada uno de ellos y comparar el ahorro de tiempo.

LOSA CONVENCIONAL	Semana 1			Semana 2			Semana 3			Semana 4			Semana 5			Semana 6									
	L	M	X	J	V	S	L	M	X	J	V	S	L	M	X	J	V	S	L	M	X	J	V	S	L
TAREA	6 DIAS						3 DIAS			1 DIA						6 DIAS									1 DIA
Encofrar 1																									
Ferrallar 1																									
Hormigonar 1																									
Encofrar 2																									
Ferrallar 2																									
Hormigonar 2																									

LOSA POSTESADA	Semana 1				Semana 2				Semana 3				Semana 4	
	L	M	X	J	V	S	L	M	X	J	V	S	L	M
TAREA	3 DIAS				7 DIAS				1 DIA				3 DIAS	
Encofrar 1														
Ferrallar 1														
Hormigonar 1														
Tesado 1														
Encofrar 2														
Ferrallar 2														
Hormigonar 2														
Tesado 2													1 DIA	

Como podemos observar la diferencia en el tiempo de ejecución de un tipo de forjado y otro es considerable, llegando a ejecutar el forjado 1 de losa postesada justo cuando termina el encofrado de losa convencional, esta diferencia queda más evidente al comprobar que para la ejecución de 2 forjados de losa postesada necesitamos 3 semanas y media, mientras que para el forjado de losa convencional se necesitan 5 semanas y un día, un ahorro de casi 2 semanas lo que reduce considerablemente los plazos de ejecución aumentando de este modo el rendimiento del proceso de construcción y los beneficios para el constructor.

A continuación y en base al plan de trabajo anterior se realiza el comparativo económico en relación a los días de trabajo, el acero utilizado, el tipo de hormigón y la cantidad de material (encofrado), a utilizar en cada uno de los tipos de forjados estudiados:

### Estructura de forjados Postesados (480 m<sup>2</sup>)

#### Hormigón

Tipo de hormigón	Rendimiento (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Precio €/m <sup>3</sup>	Total €/m <sup>2</sup>
HA-40/P/20/IIb	0,3 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	72,5	21,75

#### Mano de obra (4 operarios)

Tarea	Duración (días)
Encofrar	3
Ferrallar	2
Hormigonar	1
Desencofrar	1,5
<b>Total (días)</b>	<b>7,5</b>

Operarios	Días	Horas por día	Precio (€/h)	Total €	Total €/m <sup>2</sup>
4	7,5	8	15	3600	7,5



**Acero**

Tipo	Cantidad (m <sup>2</sup> )	Precio (€/m <sup>2</sup> )	Total (€/m <sup>2</sup> )		
<i>Postesado</i>	340	21	7140		
	Cantidad (m <sup>2</sup> )	Rendimiento (Kg/m <sup>2</sup> )	Total (Kg)	Precio €/Kg	
<i>Armadura pasiva</i>	140	43	6020	0,72	
	<b>Total €</b>		4334,4		
	<b>Total €</b>	<b>Total (€/m<sup>2</sup>)</b>			
<i>Postesado + pasiva</i>	11474,4	<b>23,905</b>			

**Material encofrado**

Precio (€/m<sup>2</sup>)  
1

**PRECIO TOTAL (€/m<sup>2</sup> de forjado)**

Precio hormigón	Precio acero	Precio mano de obra	Precio material
21,75	23,9	7,5	1

**21,75+23,9+7,5+1= 54,15 €/m<sup>2</sup>**

Primero se ha calculado el precio del m<sup>2</sup> de forjado de losa postesada, para ello se ha calculado el precio del hormigón a partir de la cantidad en m<sup>3</sup> necesarios de hormigón por m<sup>2</sup> de forjado, se ha considerado que el forjado se realizará entre 4 operarios, por lo que se ha hecho una estimación del tiempo que tardarían en encofrar, ferrallar, hormigonar y desencofrar una unidad de forjado con el fin de obtener el precio de la mano de obra por m<sup>2</sup> de forjado. Para el acero se ha considerado tanto el acero para postesado como el acero para armadura pasiva, para éste último se ha estimado, en base a la experiencia, una cantidad de 43 kg/m<sup>2</sup>, por último y al igual que con el acero de armadura pasiva se ha estimado que el coste en material para el encofrado por m<sup>2</sup> será de 1€, es decir el forjado de 480 m<sup>2</sup> tiene un coste en material para encofrado de 480 €.

Por último se ha calculado del mismo modo el precio del m<sup>2</sup> de forjado de losa de hormigón armado, se han tomado los mismos factores que en el caso anterior a excepción, como es evidente, de que en este tipo de forjado no existe acero para postesado.

### Estructura de forjados Losa H.A (480 m<sup>2</sup>)

#### Hormigón

Tipo de hormigón	Rendimiento (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Precio €/m <sup>3</sup>	Total €/m <sup>2</sup>
<i>HA-35/P/20/IIb</i>	<i>0,4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup></i>	<i>64,5</i>	<i>25,8</i>

#### Mano de obra (4 operarios)

Tarea	Duración (días)
<i>Encofrar</i>	<i>6</i>
<i>Ferrallar</i>	<i>3</i>
<i>Hormigonar</i>	<i>1</i>
<i>Desencofrar</i>	<i>2,5</i>
<b>Total (días)</b>	<b>12,5</b>

Operarios	Días	Horas por día	Precio (€/h)	Total €	Total €/m <sup>2</sup>
<i>4</i>	<i>12,5</i>	<i>8</i>	<i>15</i>	<i>6000</i>	<i>12,5</i>

Acero				
-------	--	--	--	--

	Cantidad (m <sup>2</sup> )	Rendimiento (Kg/m <sup>2</sup> )	Total (Kg)	Precio €/Kg
Armadura pasiva	480	43	20640	0,72
	<b>Total €</b>	<b>Total (€/m<sup>2</sup>)</b>		
	14860,8	30,96		

Material encofrado	
--------------------	--

Precio (€/m<sup>2</sup>)  
3

PRECIO TOTAL (€/m <sup>2</sup> de forjado)			
--	--	--	--

Precio hormigón	Precio acero	Precio mano de obra	Precio material
25,8	30,96	12,5	3

<b>25,8+30,96+12,5+3= 72,26 €/m<sup>2</sup></b>
---

Como se puede comprobar el precio por m<sup>2</sup> de forjado es superior en el caso de losa de hormigón armado que en el caso de losa postesada, en este caso hay que considerar varios factores que pueden haber provocado este resultado, entre otros, la diferencia de tiempo de ejecución entre un sistema y otro y el incremento tres veces superior del precio de material de encofrado, ya que en el caso de losa de hormigón armado había que realizar unas vigas colgadas lo que complicaba en gran medida el trabajo de los operarios durante el encofrado, además, de suponer la necesidad de una mayor cantidad de hormigón por m<sup>2</sup> de forjado. Toda la suma de los diferentes factores considerados hacen que en este caso en particular resultase más favorable económicamente la ejecución de los forjados mediante losas postesadas, además de que técnicamente suponía también un reto profesional y personal tanto para los arquitectos como los constructores.

# **BIBLIOGRAFÍA**

**El postesado en la edificación**, *Tema 16, Temario UNED.*

**Manual de ejecución de losas postesadas**, *Proyecto de investigación, San Pablo CEU.*

**Losas postesadas**, *Manual ASEFA.*

**El pretensado en la edificación**, *Freysiinet.*

**Losas postesadas en edificación**, *Sesión técnica monográfica nº3, ACIES.*

**Quaderns d'estructures nº22**, *Associació de consultors d'Estructures.*

**Recomendaciones para el proyecto y construcción de losas postesadas con tendones no adherentes H.P.9-96**, *ATEP, Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja, Colegio de Ingenieros, Canales y Puertos.*

**Revista Hormigón y Acero nº215.**

**Revista Hormigón y Acero nº218.**

**Construcción de estructuras de Hormigón armado en edificación**, *Tema 13, Eduardo Medina Sánchez, Bellisco ediciones.*

**EHE-08 artículos 31, 34 y 35.**