



SESIÓN TÉCNICA MONOGRÁFICA N° 3

LOSAS POSTESADAS EN EDIFICACIÓN



LOSAS POSTESADAS EN EDIFICACIÓN

Autores:

Capítulo 1: Juan Carlos Arroyo, Ingeniero de Caminos (ACIES)

Capítulo 2: Ricardo Mason, Ingeniero de Caminos (FREYSSINET)

Capítulo 3: Juan Calvo, Ingeniero de Caminos (ACIES)

Capítulo 4: Juan Lima, Ingeniero Civil (CTT-STRONGHOLD VSL)

Capítulo 5: Fernando Martínez, Ingeniero de Caminos (DSI)

Capítulo 6: Raimon Rucabado, Ingeniero Técnico de Obras Públicas (MEKANO4)

Capítulo 7: Jorge Calvo, Ingeniero de Caminos (ACIES)

Coordinación y edición:

Juan Carlos Arroyo, Ingeniero de Caminos (ACIES)

Juan Calvo, Ingeniero de Caminos (ACIES)

Jorge Conde, Arquitecto (ACIES)



ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. PRESENTACIÓN | 5 |
| 1.1. HORMIGÓN PRETENSADO | 5 |
| 1.2. PRINCIPIOS TEÓRICOS MUY BÁSICOS..... | 5 |
| 1.3. OTRAS CONSIDERACIONES, NADA TÉCNICAS | 6 |
| 2. APLICACIONES DEL SISTEMA E IMPLANTACIÓN EN EL MERCADO EN FUNCIÓN DE SUS VENTAJAS ECONÓMICAS | 7 |
| 2.1. INTRODUCCIÓN | 7 |
| 2.2. PRETENSADO TRADICIONAL APLICADO A LA EDIFICACIÓN..... | 7 |
| 2.3. ECONOMÍA GENERAL DE EXPLOTACIÓN DE EDIFICIOS DE FORJADOS POSTESADOS | 11 |
| 2.4. IMPLANTACIÓN EN EL MERCADO | 14 |
| 3. CRITERIOS DE PROYECTO..... | 15 |
| 3.1. CRITERIOS GENERALES DE DIMENSIONAMIENTO..... | 15 |
| 3.2. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO. TENSIONES NORMALES | 19 |
| 3.3. ESTADO LÍMITE ÚLTIMO DE FLEXIÓN..... | 23 |
| 3.4. ESTADO LÍMITE ÚLTIMO DE PUNZONAMIENTO..... | 24 |
| 3.5. CRITERIOS DE DISPOSICIÓN DE ARMADURA PASIVA | 26 |
| 4. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES | 28 |
| 4.1. OBJETIVOS GENERALES DEL PROYECTO..... | 28 |
| 4.2. TRAZADO DE LOS TENDONES..... | 31 |
| 4.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ELECCIÓN DE LA TIPOLOGÍA | 33 |
| 4.4. CLASIFICACION DE FORJADOS | 34 |
| 4.5. PREDIMENSIONAMIENTO, RANGOS DE UTILIZACION..... | 39 |
| 5. SISTEMAS Y PRODUCTOS..... | 42 |
| 5.1. INTRODUCCIÓN | 42 |
| 5.2. SISTEMAS DE POSTESADO CON CORDÓN..... | 42 |
| 5.3. SISTEMAS DE POSTESADO CON BARRA | 50 |
| 5.4. SISTEMAS DE POSTESADO CON CABLE CERRADO..... | 54 |
| 5.5. EQUIPOS..... | 55 |
| 5.6. DURABILIDAD. SISTEMAS DE PROTECCIÓN..... | 56 |
| 5.7. CALIDAD. HOMOLOGACIÓN DE SISTEMAS..... | 57 |
| 6. PUESTA EN OBRA..... | 59 |
| 6.1. INTRODUCCIÓN | 59 |
| 6.2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS..... | 61 |
| 6.3. INSTALACIÓN | 68 |
| 6.4. PUNTOS SINGULARES | 71 |
| 7. REALIZACIONES..... | 72 |
| 7.1. SEDE DE LA OFICINA DE ARMONIZACION DEL MERCADO INTERIOR (O.A.M.I.) EN ALICANTE..... | 72 |

| | |
|---|----|
| 7.2. CENTRO COMERCIAL AVENIDA DE LAS PROVINCIAS. FUENLABRADA. LOSAS POSTESADAS ADHERENTES CON VAINA OVAL..... | 79 |
| 7.3. CENTRO COMERCIAL PLAZA DE LA ESTACIÓN EN EL CAESI DE FUENLABRADA. MADRID | 88 |
| 7.4. EDIFICIOS DE OFICINAS EN EL PARQUE EMPRESARIAL CRISTALIA. MADRID..... | 94 |



1. PRESENTACIÓN

El objetivo de estas jornadas, aproximadamente mensuales, es dar a conocer diferentes productos técnicos que pueden ser utilizados en el proyecto y construcción de estructuras de edificación.

En este caso, la jornada se dedica a los forjados postesados de edificación y nos acompañan los suministradores de los cables y aparatos que se utilizan para postesar.

Nuestros acompañantes están ilusionados con esta iniciativa de la Asociación que nos aúna. Ellos están acostumbrados a vender sus productos en estructuras de Obra Civil. Sin embargo, su mercado en edificación, lo dirán después, es significativamente menor, diría que es, incluso, simbólico.

Se puede intentar ahondar en las razones que llevan a esta coyuntura. Pero quizás no se pueda profundizar mucho sin herir alguna sensibilidad. No es este el objeto, ni de lejos, de esta presentación, por lo que afirmaré, de forma genérica, que el problema es de divulgación.

Qué mejor forma de empezar a divulgar el postesado que repasando su concepto fundamental, explicando solo lo que es básico y evitando las complicaciones teóricas que la implantación práctica acarrea. Se me permita, pues, que por divulgar, simplifique.

1.1. HORMIGÓN PRETENSADO

El hormigón genéricamente pretensado se puede diferenciar en dos categorías. El hormigón pretensado con armadura pretesa o el hormigón pretensado con armadura postesa. Es decir, en el que las armaduras se tesan, bien antes de hormigonar o bien después. Visto de otro modo y al calor de la realidad, hormigón pretensado en fábrica (prefabricado) u hormigón pretensado en obra.

El hormigón pretensado, bien preteso, bien posteso, nace con la idea de mejorar el material hormigón dotándole de una resistencia a tracción de la que carece.

Esta capacidad se agrega con un concepto espectacularmente sencillo: previamente a la puesta en servicio, se comprime el hormigón consiguiendo que las tracciones provocadas por la flexión disminuyan.

Un segundo paso, que mejora más el comportamiento, es comprimir excéntricamente de tal forma que, además de la compresión, se genere una flexión contraria a la de las cargas provocando en la viga un estado de flexión menor.

1.2. PRINCIPIOS TEÓRICOS MUY BÁSICOS

A partir de este concepto (suma de compresión y flexión) y suponiendo un comportamiento lineal de los materiales, es bien sencillo plantear cualquier condición a comprobar.

Específicamente se plantean así las condiciones que admiten comportamiento lineal, es decir las de los Estados Límite de Servicio, flechas, fisuración y control de tensiones. En estos casos, la presencia del pretensado suele mejorar el comportamiento del elemento y la sección.

- La fisuración se ve disminuida por que el nivel de tracciones es mucho menor, tanto que a veces la sección ni siquiera alcanza tracciones, o aún alcanzándolas, no se supera la resistencia del hormigón a tracción y, por tanto, no fisura. Esta comprobación se debe



realizar en Servicio y en Vacío que se produce cuando la viga está ya pretensada y sólo soporta su peso propio. En este caso, usualmente, la flexión es contraria a la definitiva (la viga se levanta).

- Las flechas se controlan como en una sección de hormigón armado considerando, como desfavorable, que la compresión no aumenta la rigidez. Y, asumiendo, si se puede, que la sección tampoco ha fisurado y, por lo tanto la flecha es la elástica.

En Estados Límite Últimos, es decir en rotura, los efectos del pretensado también suelen ser beneficiosos, fundamentalmente porque la compresión (cuando ésta puede considerarse) mejora el comportamiento de la sección y porque la sección ya tiene armadura activa (postesada) que es de gran resistencia.

1.3. OTRAS CONSIDERACIONES, NADA TÉCNICAS

Si por la edificación fuese, la técnica del pretensado postesado estaría todavía en una fase primaria de desarrollo. Pero, gracias a su extensiva utilización en Obra Civil, el pretensado (preteso y postesado) ha alcanzado altos grados de conocimiento, de tecnificación y de competencia.

De esto debemos aprovecharnos los proyectistas de edificación utilizando, en los casos en que la tipología sea óptima, esta forma de construir.

Curiosamente, en cambio, en edificaciones de gran superficie, la solución pretensada suele ser una de las posibles soluciones que siempre se barajan aún cuando en muchos casos, la solución postesada puede ser también competitiva.

Técnicos expertos de casas reconocidas nos hablarán de sus experiencias. Incluso, hemos encontrado a un par de proyectistas que lo han podido proyectar en alguna obra.

El acto voluntario de proyectar una estructura, incluye un debate previo, que es desgaste en la propia oficina de proyectos y desgaste con el Cliente. Es desgaste porque, en el caso de que el razonamiento sobre la estructura dé lugar a que la solución postesada sea una de las finalistas, suele provocar en el interlocutor un estado intermedio entre la sonrisa y la incredulidad.

Agradecemos, desde aquí, a los proyectistas que han venido a explicarnos sus proyectos de postesado y a los que no han venido pero los han proyectado, por que la inclusión de esta tipología en la solución definitiva no es un asunto baladí ni técnica ni políticamente. Aunque la solución haya surgido de un razonamiento sobre óptimos globales, técnicos, económicos y estéticos, su defensa provoca una serie de dolores de cabeza y de energía gastada que solo con ganas de hacer lo que se debe hacer se puede conseguir.

Es seguro también que, después de conseguir proyectarlo y una vez construido, el Cliente acaba tremendamente satisfecho y agradecido.

Por último se debe recordar que el postesado es una solución más a tener en cuenta, algunas veces muy buena y otras no. No se deberá quedar la idea de que la solución postesada es única e inigualable, porque no lo es. Sin embargo sí que se intenta, desde aquí, asegurar que el postesado es una más de las soluciones a barajar, con sus ventajas y sus inconvenientes. Desde esta posición habremos conseguido que el postesado no sea la primera en desecharse, que no es poco.



2. APLICACIONES DEL SISTEMA E IMPLANTACIÓN EN EL MERCADO EN FUNCIÓN DE SUS VENTAJAS ECONÓMICAS

2.1. INTRODUCCIÓN

Son muchas las ventajas de precomprimir el hormigón a la hora de diseñar una estructura, ya sea para puentes de grandes luces, plataformas off-shore, o porqué no, edificios.

Actualmente el pretensado es una técnica altamente probada que ofrece soluciones fiables, económicas y estéticas en el diseño de estructuras.

Durante mucho tiempo el pretensado en edificación se ha limitado a la prefabricación de losas y vigas; sin embargo, el postesado in-situ ofrece otras posibilidades así mismo interesantes. Una limitación importante para las técnicas de prefabricación tradicional son los reducidos espacios que se utilizan en edificación, lo estricto de los cantos en forjados, que ha obligado a buscar soluciones mejorando la proporción luz/ espesor. Son muchas hoy en día y, se desarrollarán más adelante en otra de las ponencias, las soluciones estructurales de forjados postesados. No obstante, se debe destacar entre otras metas comunes, la de recurrir a la máxima eficacia del tendón en un canto lo más reducido posible. Esto ha llevado a los distintos sistemas de pretensado a desarrollar unas gamas de anclajes de reducidos tamaños para adecuarse a esta necesidad. Así aparecen dos opciones claramente diferenciadas, el postesado adherente que recurre al empleo de vainas planas para disminuir el espacio ocupado por el pretensado y mejorar su eficacia a la vez que disminuye las pérdidas por rozamiento debido a la distribución de los tendones dentro de la vaina. Y el pretensado no adherente que se desarrolla con un sistema de tendones enfundados unifilarmente y protegidos con grasa.

En países como EEUU, Australia, Brasil,... esta tecnología es muy utilizada, y los principales motivos de su éxito residen en la facilidad de construcción, en la reducción de materiales a manipular, armaduras más simples y menos molestas, en los sistemas de encofrados simples y rapidez en el descimbrado

El postesado permite al proyectista una gran versatilidad en el diseño ya que se pueden alcanzar amplias luces que facilitan la subdivisión a posteriori para áreas comerciales o administrativas, así como amplios volúmenes para espacios públicos, salas de exposiciones, etc...

Por último mencionar que el consumo de acero de pretensado aplicado por postensión solo es de un 10% en Europa del total del acero consumido, mientras que alcanza hasta un 75% en Australia o Estados Unidos. El propósito de esta comunicación es incentivar el uso de esta técnica que presenta numerosas ventajas, tanto de concepción como de construcción o de durabilidad.

2.2. PRETENSADO TRADICIONAL APLICADO A LA EDIFICACIÓN

Se puede afirmar que el pretensado ha permitido avanzar y superar las metas técnicas alcanzadas por el hormigón armado tradicional, desde los cimientos hasta las cubiertas de los edificios. Las aplicaciones se desarrollaron en los años 70, periodo en el cual, el dominio del hormigón pretensado y la reglamentación que le definía habían hecho de esta nueva ciencia, objeto de polémicas a sus inicios, un pozo de verdaderos avances tecnológicos. Dada la



experiencia en los puentes, arquitectos e ingenieros se concentraron en extender las ventajas técnicas del pretensado hacia la edificación, pronto esta técnica se revelaría, no como un rival de la estructura de hormigón armado o la de acero sino, como un complemento. Nuevas formas en el espacio, nuevas maneras de plantar cara a la adversidad del medio (terrenos mediocres, sismicidad) se ofrecían al diseño de estructuras.

2.2.1. Conceptos básicos

El pretensado es la técnica consistente en la introducción en la estructura de unas fuerzas que producen tensiones, en general de signo contrario a las producidas por las restantes acciones aplicadas, con la intención de mejorar su capacidad resistente y/o su comportamiento

Las cargas transmitidas por el pretensado se resumen en fuerzas concentradas en las zonas de anclajes que precomprimen la estructura y en fuerzas de desviación, inducidas por el trazado curvo de los tendones, que pueden llegar a equilibrar el peso propio de la estructura e incluso las cargas permanentes y parte de las sobrecargas de uso.

Estas fuerzas de pretensado persiguen la generación en el hormigón de compresiones en las zonas que, posteriormente, bajo la acción de las cargas gravitatorias exteriores sufrirán tensiones de tracción. Los efectos del pretensado así introducido son los siguientes:

- La estructura se encuentra **permanentemente comprimida**, y por consiguiente no se fisura, por lo que resulta ser más rígida, durable y estanca que una estructura de hormigón armado. La deformabilidad instantánea queda además enormemente reducida.
- El sistema equivalente de cargas introducido por el pretensado (Load balancing) genera deformaciones y flechas de carácter permanente opuestas a las producidas por las cargas gravitatorias, reduciendo no sólo la deformabilidad instantánea sino también la diferida.
- Dado que el pretensado requiere materiales de alta resistencia (aceros de alto límite elástico, hormigón de resistencias superiores a 30 MPa), la capacidad resistente de las piezas sometidas a flexión aumenta notablemente.
- Así mismo la compresión del forjado en su plano mejora sensiblemente su comportamiento frente a esfuerzos tangenciales (corte y punzonamiento).
- Todo lo anterior conduce a la posibilidad de reducción de cantos, espesores, cantidad de armaduras pasivas y, en general, de peso propio del hormigón armado, lo que permite, a su vez, aumentar las luces a cubrir.
- Al encontrarse la estructura comprimida a edades tempranas, disminuyen los efectos de la retracción del hormigón y por lo tanto se puede aumentar la separación o hasta incluso eliminar las juntas de dilatación.
- Tiene un mejor comportamiento frente al fuego que los forjados reticulares y que las alveoplacas.
- Es posible, gracias al efecto de cosido, construir por tramos, reutilizar equipos y solidarizar posteriormente los elementos construidos. El efecto activo del pretensado y la utilización de hormigón de buena calidad, con resistencias altas a tempranas edades, pueden, asimismo, permitir descimbrados mucho más prematuros y, en consecuencia, aumentar la velocidad de construcción.
- La reducción de peso propio del forjado disminuye la carga total que llega a la cimentación. Por otra parte, el menor volumen de hormigón y peso de armadura pasiva, unido a la facilidad de colocación de la armadura activa, conducen a reducciones de plazos y a ahorros económicos dignos de ser considerados tanto por la propiedad como por el constructor.

- Al completar el tesado de una planta (generalmente al tercer día del hormigonado) la estructura ya es auto-resistente y por lo tanto se puede descimbrar completamente el forjado y quitar el 100% de los puntales. En caso de tener que construir una planta superior, en función de la relación entre las cargas de diseño del forjado ya tesado y el peso de la planta superior, se deberá estudiar la necesidad de colocar algún apuntalamiento durante el cimbrado y hormigonado de la misma.
- Si se utiliza postesado adherente, existe la posibilidad de hacer agujeros en el forjado con posterioridad al hormigonado del mismo, cortando los cordones y transmitiendo el esfuerzo del mismo por adherencia.

Una de las consecuencias del desarrollo del hormigón pretensado ha sido la notable evolución en el diseño de las formas de los puentes, en los que se han aplicado nuevas técnicas constructivas que han aumentado las posibilidades para salvar vanos de grandes luces, acortando los plazos de ejecución y proporcionando una serie de ventajas relativas a la durabilidad, seguridad y economía. En el proyecto de puentes de grandes luces, la forma de la estructura adquiere importancia, hasta tal punto, que cuando se trata de disponer vanos de grandes luces, el puente queda identificado con la propia estructura, exenta prácticamente de elementos accesorios.

En la edificación generalmente el uso del hormigón pretensado, no ha influido en el aspecto exterior de los edificios, debido a que la estructura resistente queda integrada en un conjunto de elementos de distinta naturaleza, pero sí ha influido en la disposición interna.

La diafanidad en el interior de los edificios y la disminución del espesor de los forjados aporta un valor añadido que suele compensar sobradamente el sobrecosto de construcción que implica el aumento de luces en edificios importantes situados en las grandes ciudades, por lo que la aplicación del postesado proporciona idóneas condiciones para su realización.

La consecución de grandes luces está condicionada por la limitación de canto de los forjados, y éste tiende a ser muy estricto en la edificación. La altura de una planta debe albergar el canto del forjado, el paso de las instalaciones, el falso techo, el pavimento y el espacio útil para el desarrollo de la actividad humana o de la función para la que se construye el edificio. Por ello la tendencia actual es disponer techos planos, eliminando las jácenas o vigas de canto que dificultan el paso de las instalaciones, e incrementan los plazos y costos de ejecución. No siempre se puede, por tanto, conseguir las luces deseadas y resistir las cargas actuantes con las técnicas convencionales de construcción de forjados, debiéndose buscar alternativas con fundamento tecnológico como el postesado.

Las ventajas económicas del empleo del postesado resultan evidentes cuando se disponen vanos relativamente grandes en edificios, dado que el costo unitario del forjado guarda relación con la magnitud de las luces y de las sobrecargas.

2.2.2. Utilidades del pretensado en edificación

Para mostrar algunos objetivos generales que se deben considerar en el diseño conceptual de un edificio, vamos a clasificarlos en función de la dirección predominante en la que avanza su construcción, edificios de media o gran altura y edificios de gran superficie.

Ambos tipos de edificios son generalmente edificios de uso público como torres de oficinas, sedes emblemáticas, hoteles y centros comerciales. En este campo más que las propias ventajas técnicas y económicas aportadas a la obra, el empleo del pretensado permitió a los arquitectos actuar más libremente para cumplir con la exigencia de la solución aportada. Muchos de estos edificios necesitan ser concebidos desde una perspectiva de singularidad arquitectónica y, por tanto, necesitan una destacada apuesta por la ingeniería.



Edificios de media a gran altura, donde la construcción progresa verticalmente de forjado a forjado. La alta repetición de forjados idénticos que se ejecutan uno a continuación del otro, implican unos objetivos típicos de este tipo de construcción:

- Minimizar el tiempo total de construcción del edificio y disminuir la necesidad de reapuntalamientos.
- Minimizar las dimensiones de pilares y fundaciones: reduciendo el peso propio de los forjados.
- Grandes vanos entre pilares, para obtener una mayor flexibilidad en el uso.
- Minimizar la altura total del edificio, reduciendo el espesor de los forjados. En principio sería incompatible con el punto anterior.

Es típico de edificios de oficinas, hoteles, sedes de entidades financieras, etc.



Telekom Tower. Kuala Lumpur.
76 alturas, 310 m de altura.

El coste del suelo urbano, especialmente en grandes ciudades densamente pobladas como las españolas, tiene una repercusión enorme en el coste total del edificio. La posibilidad de reducir el canto de forma considerable (hasta un 40 por ciento), manteniendo las luces o incluso aumentándolas ligeramente, puede permitir en algunos casos construir una planta más sin superar las limitaciones de altura de las Ordenanzas Municipales, lo que desde el punto de vista del propietario constituye una opción que, por sí misma, justificará sobradamente en términos económicos la solución estructural adoptada.

En otros casos se puede disminuir la altura total del edificio, manteniendo la misma cantidad de plantas y la altura libre interior, con el consiguiente ahorro en cerramientos (piel de vidrio) y en caso de sótanos menor profundidad de muros pantallas y de volumen de excavación (importante en presencia de nivel freático).

Edificios de gran superficie, en este caso la dirección predominante de avance de la construcción es horizontal, con alguna progresión vertical simultánea. En este caso, al no existir una gran repetición de forjados idénticos y la cantidad total de los mismos es relativamente pequeña, entonces el espesor y el peso del forjado no juegan un papel tan importante como en el caso anterior. En este caso es primordial la simplicidad del encofrado y el armado que se traduzcan en una gran velocidad de avance.

Este tipo de construcción es típica de aparcamientos, edificios industriales, centros comerciales, etc.

La utilización del postesado ayuda a alcanzar estos objetivos ya que permite reducir el canto total y lograr forjados más esbeltos respecto de otros de hormigón armado, resolviendo la incompatibilidad de grandes luces y pequeños espesores. También disminuye la cantidad total de armadura de refuerzo, permitiendo la estandarización y simplificación de la misma. Disminuye la cantidad total de hormigón. Se puede desahuciar antes que los forjados no postesados. Se puede controlar mejor la fisuración y la deformabilidad.

El hormigón pretensado se utiliza, a veces, en partes del edificio, complementando a otros materiales más tradicionales

Cimentaciones: el pretensado permite aumentar la capacidad de respuesta de una sección frente a las cargas que gravitan sobre ella (sobre todo en flexión). Así permitió concebir cimentaciones superficiales capaces de recibir mayores cargas que las cimentaciones profundas como pozos o pilotes. Mas recientemente, se asocia a la técnicas de mejoras de suelo para, a partir de un estudio global, reducir los costes en el tratamiento de suelo, aplicación que consiste en realizar una losa postesada sobre el terreno.

Núcleos: la columna vertebral de la estructura es un núcleo por el cual transitarán todas las cargas de los forjados en voladizo o colgados, así como las acciones horizontales. El pretensado permite reducir la sección de núcleo mejorando su capacidad a flexión por precompresión.

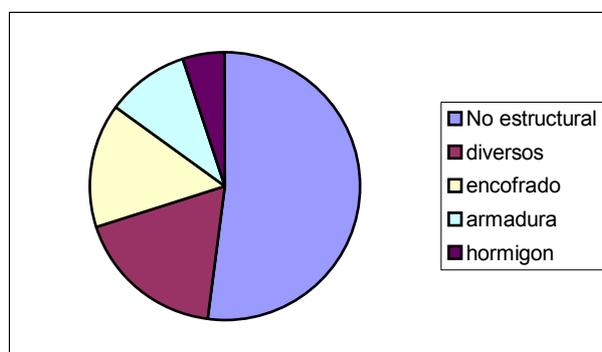
Cubiertas: el pretensado permite a los arquitectos realizar cubiertas esbeltas, mas ligeras, que facilitan y aligeran los apeos de las mismas.

El extenso uso de los forjados y sus consecuencias en el resto de la estructura se puede clasificar sobre todo en dos tipos de edificios: los edificios de mucha altura y los edificios de extensa superficie en planta.

2.3. ECONOMÍA GENERAL DE EXPLOTACIÓN DE EDIFICIOS DE FORJADOS POSTESADOS

Para hablar de la economía del empleo del sistema postesado no se puede enfocar como un mero ahorro en coste de materiales ya que la mayor parte del costo total de la estructura no estará en el costo de la propia ejecución.

Incluso al referirse exclusivamente al costo de construcción se puede apreciar que el consumo de materiales representa tan solo, entre el 30 y al 40%. Será la mano de obra ligada al movimiento de encofrados quien constituya la parte más importante de dicho costo.



Por eso se ha de hablar del postesado como una economía general en el costo global de la estructura ya que aporta frente a otras soluciones las siguientes ventajas:

2.3.1. Diseño

Postesar / precomprimir permite al proyectista concebir con mas libertad: El postesado permite realizar estructuras de luces mayores, colgar la estructura desde un núcleo central o construir en voladizo desde ese mismo núcleo. Por lo tanto, los “obstáculos” de la construcción tradicional como son los pilares, o los propias paredes portantes, se reducen.

Conseguir una estructura más diáfana suele ser la ventaja principal, no obstante, esta diafinidad se obtiene tanto en el interior del volumen concebido como en su superficie exterior.

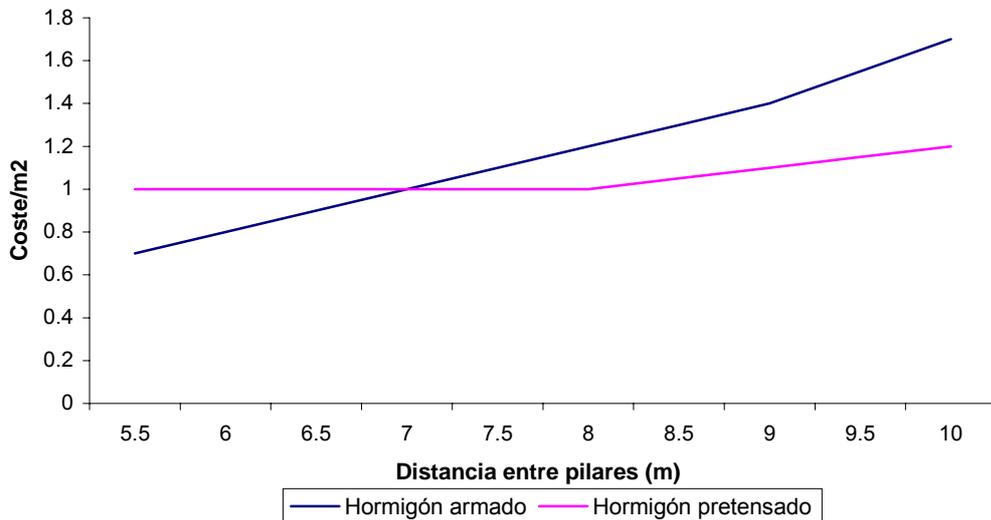
Las estructuras monolíticas no solamente permiten construir estructuras con mas altura sobre suelos pobres y en zonas sísmicas sino que por la propia reducción de peso de los forjados la economía en estructura portante (pilares, núcleos centrales, ...) se traduce en ahorro que, a su vez, repercutirá en la cimentación y en el saneamiento del propio terreno sobre el cual se elevará el edificio.

Incremento de luces

El empleo del postesado aumenta la capacidad resistente de la losa lo que permite aumentar las luces y reducir el número de elementos verticales en la estructura. En consecuencia se produce un ahorro de materiales y una notable mejora arquitectónica por la posibilidad de disponer mayor superficie útil y más facilidad para distribuirla ya que se obtendrán grandes e in-interrumpidos espacios que podrán ser adaptados a posteriori según las necesidades.

Se puede observar en el gráfico el efecto económico del pretensado a medida que se incrementa la luz.

Comparación de costes



Reducción del canto



El empleo del postesado permite reducir aproximadamente hasta un 30% el canto de la losa en comparación con una solución armada sin tener que disminuir su capacidad portante. Ello significa una reducción de cantidad de materiales importante tanto de armadura pasiva como de hormigón y, por tanto, una reducción en el peso de la estructura que permitirá a su vez un ahorro en la cimentación.

Otra gran ventaja es la optimización de la altura de planta para permitir el paso de instalaciones, la disposición del falso techo, si existe, el pavimento, manteniendo intacta la altura libre.

En caso de limitación de altura total del edificio, esta disminución de canto puede permitir incrementar el número de plantas.

2.3.2. Construcción

La simplificación del proceso constructivo se produce en varios aspectos. La consecuencia principal es la optimización de las tareas, sistematización, que no solamente permite el ahorro directo de tiempo por la reducción de materiales a disponer, sino la garantía de una construcción con ciclos repetidos, de tal forma que, a partir del aprendizaje por repetición se posibilite la optimización del camino.

Como ya se ha comentado anteriormente, el empleo del sistema postesado conlleva un ahorro en cuantías de acero pasivo lo que permite simplificarlas e incluso estandarizarlas. Esta facilidad abre la posibilidad a la prefabricación de las mismas lo que las elimina del camino crítico de la obra. Los encofrados son más ligeros, más estandarizados, se colocan y desmontan con más sencillez (mediante el empleo de mesas por ejemplo) y puede llegarse a dimensiones de encofrados de hasta 24 m² auto transportables o transportables con una sola grúa.

Aplicar el pretensado a los forjados permite retirar el encofrado más rápidamente (entre 3 y 7 días dependiendo del curado).

Como todos los elementos son más livianos se emplearán también grúas de menor capacidad.

2.3.3. Comodidad y Servicio

Las estructuras postesadas son más livianas y generalmente más agradables porque la estructura portante (pilares y muros) obliga, muy a menudo, en la construcción tradicional, a recurrir a soluciones de maillaje para borrar las distribuciones de pilares impuestas por la cimentación, la parcela, las fases de construcción... ¿Quién no se ha enfadado al aparcar en un parking de un edificio antiguo donde la distribución de pilares y la poca altura del piso dan al lugar un aspecto de catacumba?

No obstante los forjados al tener menos apoyos y ser más esbeltos son más sensibles a la vibración sobre todo de cara a las cargas vivas móviles (forma muy poco elegante de llamar un peatón). ¡Imagine la sensación de un pasillo de hospital largo, ancho, que os conduce hasta la consulta con los temores propios del momento y además andando sobre un piso que vibra bajo su paso!

2.3.4. Durabilidad

Se pueden destacar dos componentes de la durabilidad en la edificación:

- La durabilidad estructural que trata de los daños sufridos por los materiales que la constituyen debido al uso y a las agresiones exteriores. En este sentido, las estructuras pretensadas trabajan esencialmente en estado comprimido y son menos sensibles a la fisuración.



- La durabilidad funcional. Al ser más diáfanos los espacios se pueden remodelar mas fácilmente permitiendo a la estructura adaptarse mas fácilmente a lo largo de su vida útil.

No se debe olvidar que muchos edificios, si tienen un objetivo lúdico o de servicio deben estar siempre de moda. Una característica de la arquitectura moderna es que evoluciona rápidamente y los edificios muy a menudo después de una primera fase de prestigio y antes de considerarse como riqueza del patrimonio, atraviesan una fase que podríamos traducir como la del olvido en la cual dejan de lucir. Si tomamos como ejemplo un centro comercial, y sin referirse a ningún estudio estadístico, como simple orden de magnitud, su modulación interior será mas o menos reformada cada 10 años, sus fachadas cada 20 años, no obstante la vida útil del edificio supera fácilmente los 50 años.

2.4. IMPLANTACIÓN EN EL MERCADO

Como ya hemos citado, poco se puede hablar de la implantación de este sistema en el mercado español, no así en América o en Asia donde la actividad del pretensado es básicamente su aplicación en edificación. El porqué de su escaso éxito en España sea quizá una cuestión de reflexión para todos, promotores, constructores, arquitectos, ingenieros e incluso las propias casas de pretensado.

Esperamos pues que esta jornada nos ayude a una mayor colaboración entre todos y así poder potenciar este sistema, que tan buenos resultados a generado en otros países.



3. CRITERIOS DE PROYECTO

En esta ponencia se tratará de describir aquellos aspectos que, con carácter general, modifican el cálculo respecto a un forjado convencional de hormigón armado e, incluso, respecto a un puente de hormigón pretensado.

Trataremos únicamente de indicar aquellos aspectos que en los códigos internacionales, con una larga tradición y experiencia en este tipo de estructuras, suponen una contradicción o matización a las reglas y normas que la vigente instrucción EHE indica para los elementos pretensados.

No se trata aquí de impartir un curso de hormigón pretensado, sino únicamente de indicar aquellas cuestiones que pueden ayudar a predimensionar o comprender las importantes diferencias respecto a las estructuras tradicionales.

Los aspectos que diferencian este tipo de forjados respecto a los de las dos tipologías antes descritas son:

- Criterios de dimensionamiento.
- Estado límite de servicio de tensiones normales.
- Estado límite último de flexión.
- Estado límite último de punzonamiento.
- Criterios de disposición de armadura pasiva.

3.1. CRITERIOS GENERALES DE DIMENSIONAMIENTO

Una primera aproximación al problema consiste en fijar el canto del forjado.

El código americano PTI (Post-Tensioning Institute) y ACI-318-02 (Building Code Requirements for Structural Concrete) facilita las siguientes relaciones luz/canto:

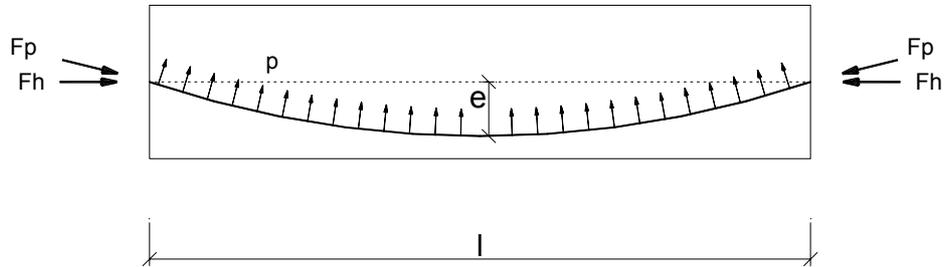
| | Vanos continuos | Un solo vano |
|---|-----------------|--------------|
| Losa maciza unidireccional | 50 - 45 | 45 - 40 |
| Losa maciza bidireccional (sobre pilares) | 48 - 40 | --- |
| Losa aligerada bidireccional | 40 - 35 | 35 - 30 |
| Vigas | 35 - 30 | 30 - 26 |
| Nervios unidireccionales |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

El mismo código indica que estas relaciones se pueden aumentar cuando las flechas (caso de cubiertas) y las vibraciones no son críticas.

Una segunda etapa consiste en evaluar el efecto que el pretensado induce sobre una estructura.

Supongamos una viga isostática con un trazado parabólico de un cable, tal como se muestra en la figura.





La curvatura del cable induce una fuerza ascendente de valor constante P. Si planteamos el equilibrio de momentos tenemos:

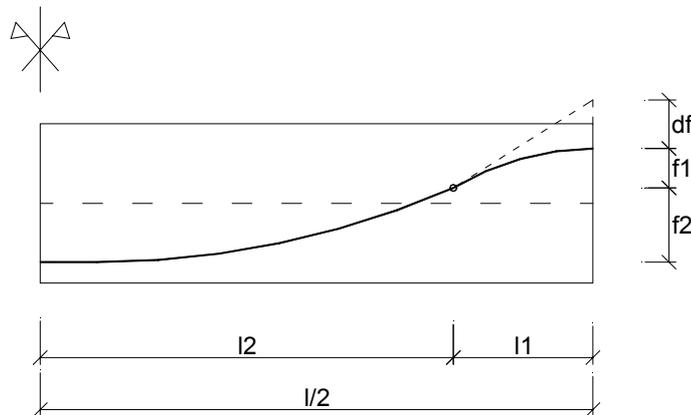
$$Fh \times e = \frac{pl^2}{8}$$

El cortante inducido para esta fuerza vertical de desvío es de valor

$$Fv = \frac{pl}{2}$$

Tanto el flector como el esfuerzo cortante actúan en sentido contrario a las acciones gravitatorias. El criterio habitual de diseño (para valores de sobrecarga habituales) es compensar las cargas permanentes, por lo que para este estado de cargas, la viga no tendría ninguna deformación y ningún esfuerzo, salvo el axil de compresión.

Cuando la viga o la losa es hiperestática, se adoptan dos parábolas como trazado del cable. Una primera parábola ascendente y una segunda (sobre apoyos) descendente. En este caso, el efecto hiperestático del pretensado se puede evaluar a partir de la siguiente formulación simplificada:



La relación entre longitud y flecha de cada tramo de parábola es:

$$\frac{f_1}{l_1} = \frac{f_2}{l_2} = \frac{f_1 + f_2}{l_1 + l_2}$$

El criterio habitual para fijar la longitud de l_1 es adoptar $0.1l$.

En elementos de mayor canto (como puentes) el criterio para fijar la longitud de l_1 suele ser adoptar un canto útil.

Considerando aproximadamente:

$$df \approx f_1$$

el momento isostático total de la viga sería:

$$P(df + f_1 + f_2) = P \frac{l^2}{8} = P(2f_1 + f_2) = Pf \Rightarrow P = \frac{8Pf}{l^2}$$

es decir, considerando el momento en negativos como:

$$M^- = \frac{pl^2}{12}$$

e igualando las dos expresiones:

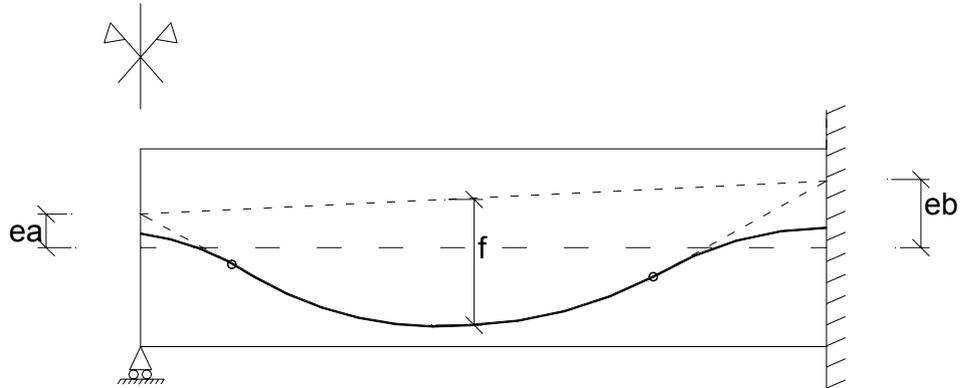
$$\frac{pl^2}{12} = \frac{8Pfl^2}{12l^2} = \frac{2}{3}Pf$$

descartando la curvatura debida a la prolongación del tendón

$$M^- = P \left[\frac{2}{3}f - df \right]$$

Análogamente, la expresión para evaluar el efecto hiperestático del pretensado en una viga apoyada – empotrada sería:

$$M^- = P \left(f + \frac{1}{2}e_a + e_b \right)$$



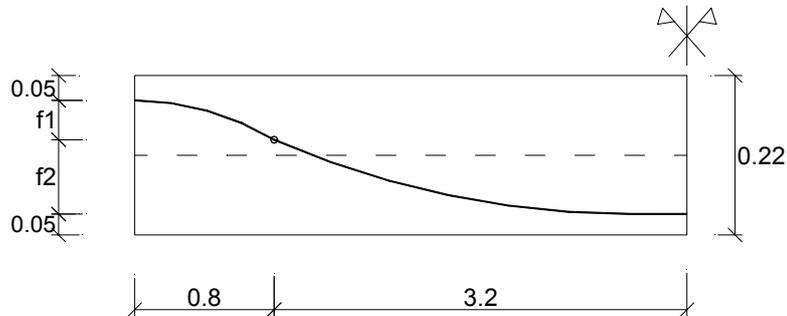
Con estos datos es suficiente el poder predimensionar una losa o viga de hormigón pretensado, tanto unidireccional como bidireccional.

Planteemos el ejemplo de una losa bidireccional con luces de 8 x 8 m² destinada a aparcamiento. El canto de la losa adoptado es de 22 cm. La carga muerta es de 1.5 KN/m² y la sobrecarga de 4 KN/m².

Utilizamos el criterio de compensar la carga permanente, ya que la sobrecarga es el 36% del total. La carga permanente es entonces de 7 KN/m², el momento en negativos sería:

$$M_{cp}^- = \frac{7 \times 8^2}{12} = 37 \text{ KNm/ml}$$

el trazado del cable sería:



$$f_1 = 0,024$$

$$f_2 = 0,096$$

$$M_p^- = P \left[\frac{2}{3} (0.024 \times 2 + 0.096) - 0.024 \right] = 0.072P$$

con lo que la fuerza de pretensado sería:

$$P \times 0.072 = 37 \qquad P = 513.9 \text{ KN/ml}$$

Este valor es el pretensado a tiempo infinito. Suponiendo unas pérdidas del 15 % y con cables de 1.870 N/mm² tesados al 80 % de la carga de rotura, el área de cable necesario es:

$$A_p = 4.04 \text{ cm}^2 \text{ de acero de pretensado}$$

Esto supone una cuantía de unos 3.2 Kg/m² en cada dirección de la losa. Valor realmente muy bajo.

La distribución de esta cuantía en la losa es objeto de otras ponencias ya que el rango de posibilidades es muy amplio.

3.2. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO. TENSIONES NORMALES

Como se ha visto, encajar el número de cables necesario es relativamente sencillo y muy rápido. A partir de estos datos, y en función de cómo se decida distribuirlos en la superficie de la losa obtendremos un modelo para un análisis posterior.

Para evaluar el modelo es posible utilizar tres sistemas de cálculo:

- Método de los pórticos virtuales simulando el pretensado, con unas fuerzas de desvío equivalente.
- Método del emparrillado, simulando igualmente el pretensado con unas fuerzas de desvío equivalentes.
- Método de elementos finitos tipo placa. Estos programas están muy desarrollados y sustituyen con ventaja al método del emparrillado.

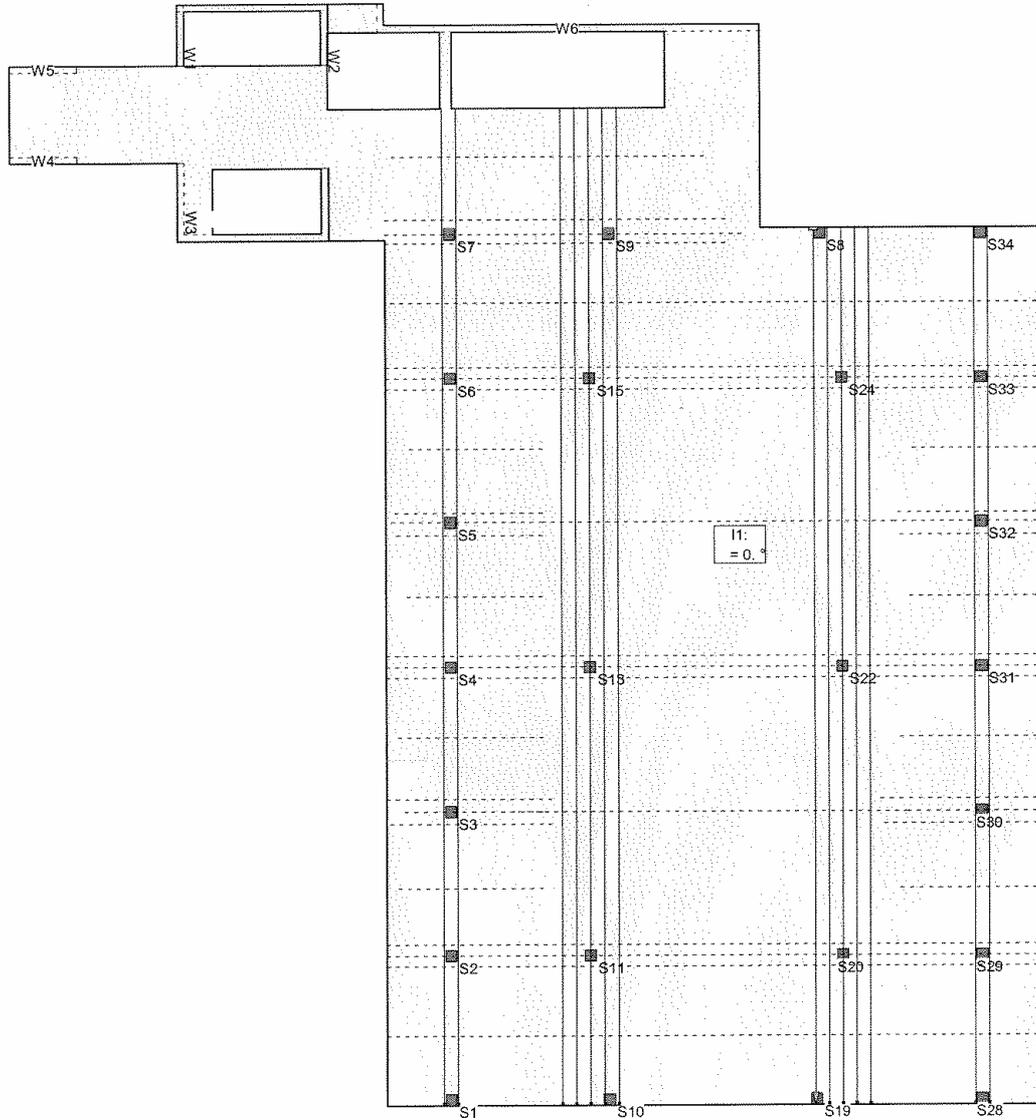
El primer método, al igual que en las losas de hormigón armado, está limitado a unas condiciones geométricas basadas en la proporción de luces contiguas y de desalineación entre pilares, que se describen en la norma EHE.

El método de los elementos finitos tipo placa es el método de cálculo más general y permite dimensionar adecuadamente cualquier tipo de geometría. A continuación se muestran algunas figuras de un modelo realizado con este tipo de programa:

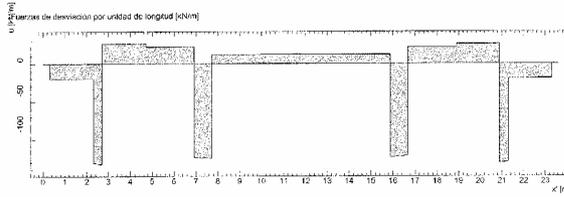
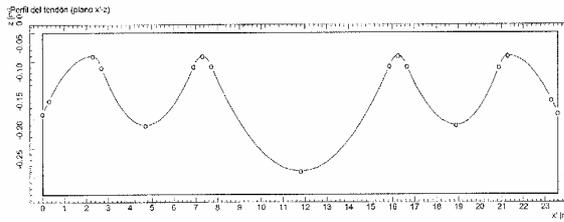
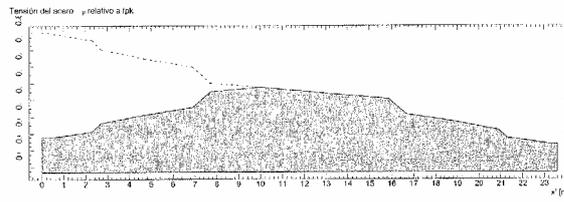


Estructura

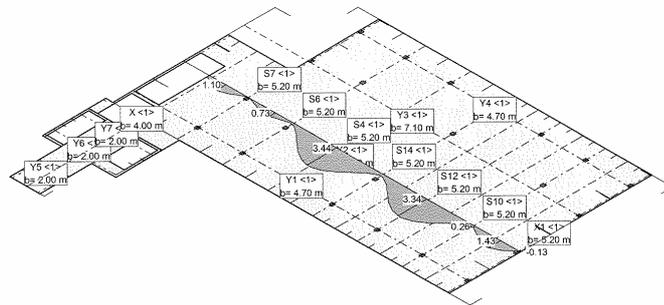
Escala 1:218.0



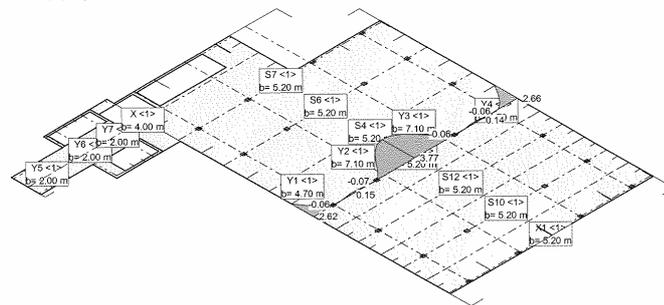
Tendón 1.31

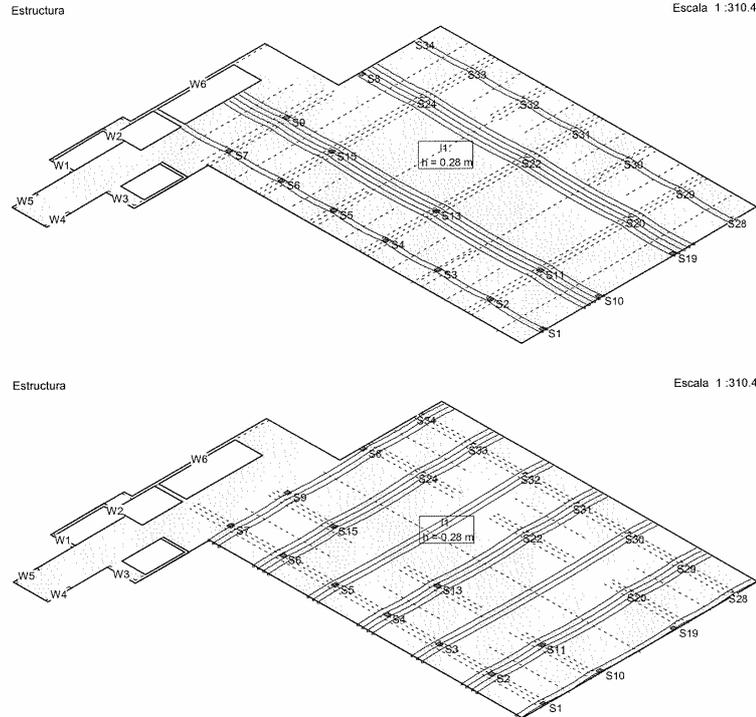


Sección(es) longitudinales: Flechas [mm], Hipótesis de carga 42, Factor de ampliación: 1000.0 Escala 1:320.5



Sección(es) longitudinales: Flechas [mm], Hipótesis de carga 41, Factor de ampliación: 1000.0 Escala 1:320.5





Hecho este inciso, la primera comprobación es verificar el estado límite de servicio de tensiones normales.

Con la verificación de este estado límite de servicio encontramos las primeras discrepancias entre los criterios de la norma EHE y la normativa internacional específica para este tipo de forjados, y así para el estado límite de servicio frecuente (ψ_1), la vigente instrucción EHE, limita la apertura de fisura a los siguientes valores.

| Clase de exposición | W_{max} |
|---------------------|--------------------|
| I | 0.2 |
| Ila, IIb | 0.2 ^(*) |
| IIla, IIIb, IIIc | Descompresión |

^(*) adicionalmente, para el ambiente IIa y IIb deberá comprobarse que para la combinación de cargas cuasipermanentes (ψ_2) las armaduras activas están dentro de la zona comprimida de la sección.

En el caso concreto de los puentes, los coeficientes ψ son $\psi_1 = 0.5$ y $\psi_2 = 0.2$, sin embargo en edificación estos coeficientes oscilan entre $\psi_1 = 0.5$ con $\psi_2 = 0.3$ y $\psi_1 = 0.7$ y $\psi_2 = 0.6$.

Cumplir el criterio de que la armadura activa esté en la zona comprimida para un forjado con el 60% de la sobrecarga, equivale a compensar con el pretensado el 60% de la sobrecarga.

Esto supone un incremento importante en la cuantía de armadura activa. Sin embargo, carece de sentido permitir una apertura de fisura 0.2 mm con el 70% de la sobrecarga.

Este criterio aplicado a puentes supone una compresión media en la sección de unos 5 – 10 N/mm².

Considerar el ambiente como IIb resulta absolutamente antieconómico en las losas pretensadas de edificación, por lo que debe definirse el tipo de ambiente con mucho cuidado.

Satisfacer el criterio de apertura de fisura a 0.2 correspondiente al ambiente I tampoco coincide con la norma americana PTI (postensioning institute) que limita la tracción máxima a $0.625 \sqrt{f_c}$ en la fibra más traccionada.

Un criterio razonable de dimensionamiento sería adoptar una tensión máxima en la fibra más traccionada correspondiente a $f_{ctm} = 0.30 f_{ck}^{2/3}$ (valor de EHE) para el estado de cargas frecuente (ψ_1). Este valor equivale aproximadamente a $0.53 \sqrt{f_c}$.

Este criterio corresponde al predimensionamiento descrito en el apartado anterior y solicita a la sección transversal de la losa con una compresión media de 1 – 2.5 N/mm².

En esta línea, la norma EHE limita la compresión máxima de la fibra más comprimida a $0.6 f_{ck}$ para la combinación de acciones más desfavorable. Sin embargo, el PTI añade a la limitación anterior el valor de $0.45 f_{ck}$ para acciones permanentes.

Esta segunda limitación pretende controlar la deformación de fluencia por exceso de pretensado.

Como vemos, existen algunos criterios de la norma EHE que divergen sensiblemente de la normativa internacional para este tipo de forjados.

Añadir por último que si limitamos únicamente la tracción máxima para cargas frecuentes y la compresión máxima para permanentes y característica, es posible calcular las flechas con las inercias brutas de la sección y en régimen elástico.

3.3. ESTADO LÍMITE ÚLTIMO DE FLEXIÓN

El estado límite último de flexión se obtiene a partir de la combinación de acciones actuantes sobre la estructura, modificados por unos coeficientes de mayoración de acciones, que en el caso de las estructuras de edificación son:

- Mayoración de cargas permanentes..... 1.50
- Mayoración de sobrecargas..... 1.60

En el caso de forjados pretensados “in situ”, parece más adecuado considerar como coeficientes de mayoración los correspondientes a un control de ejecución intenso, esto es:

- Mayoración de cargas permanentes..... 1.35
- Mayoración de sobrecargas..... 1.50

Esto es debido a que el propio concepto de pretensado lleva aparejado un alto grado de especialización.

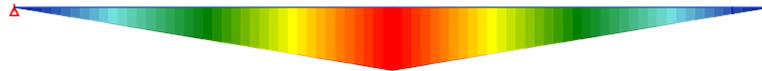
Conviene resaltar aquí que los programas de comprobación de secciones utilizan la armadura de pretensado como una acción interna para plantear el equilibrio de la sección.

Por esta razón en la envolvente de las acciones obtenidas del modelo global de cálculo consideraremos únicamente el efecto hiperestático del pretensado y no el efecto isostático. En las figuras siguientes se muestra la diferencia entre ambos efectos:

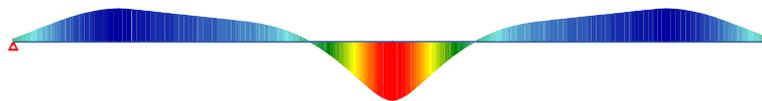




Efecto isostático



Efecto hiperestático



Efecto total

Normalmente no es necesario disponer más armadura pasiva que la cuantía mínima en centro de vano ya que, recordemos, que no permitimos que el hormigón llegue a fisurarse. Por supuesto en el caso de losas unidireccionales isostáticas esto no se cumple.

Resulta más normal que si sea necesario disponer armadura pasiva adicional sobre los pilares.

Normalmente los cables se agrupan por bandas (banda central y de soportes), pero la banda de soportes es más estrecha que en los forjados de hormigón armado bidireccionales.

Esto es así, para que el pretensado contribuya más eficazmente a resistir el punzonamiento.

Como criterio se suele tratar de agrupar los cables en 2 veces el canto del forjado a cada lado del pilar más el ancho del mismo. Si bien esto varía en función del número de cables requerido.

3.4. ESTADO LÍMITE ÚLTIMO DE PUNZONAMIENTO

El empleo del pretensado en las losas permite reducir drásticamente el espesor de los forjados. Como es bien sabido, en muchos casos una limitación importante a la hora de adoptar el canto de un forjado es el estado límite de punzonamiento.

Sin embargo el pretensado es un elemento activo que contribuye a mejorar muy notablemente el comportamiento de una losa frente a este estado límite.

Su influencia la podemos apreciar si analizamos la formulación correspondiente al modelo de punzonamiento planteado por la EHE.

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd.ef}}{u_1 d}$$

La tensión máxima en el perímetro crítico es:

$$\tau_{rd} = 0.12 \xi \left(100 \rho_1 f_{ck} \right)^{1/3}$$

siendo:

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_x \rho_y}$$

Un aspecto importante es que la cuantía

$$\rho = \frac{\Delta_s + \Delta_p \frac{f_{yp}}{f_{yd}}}{b_0 d}$$

está influida fuertemente por el mayor límite elástico del acero de pretensar. El factor es del orden de 3.7 veces el área.

Con esta comprobación, si es necesaria armadura de punzonamiento, se utiliza la expresión:

$$V_{cu} = \left[0.10 \xi \left(100 \rho_1 f_{ck} \right)^{1/3} - 0.15 \sigma_{cd} \right] u_i d \beta$$

En esta expresión es importante destacar la contribución de la compresión media sobre el perímetro para aumentar su capacidad resistente.

Así pues, el pretensado influye positivamente en:

- Aumento de la resistencia del hormigón por:
 - Contribución de la cuantía incrementada por el mayor límite elástico del acero activo.
 - Compresión media sobre el perímetro crítico. Conviene evaluar con cautela el efecto del axil de compresión, ya que éste puede estar influido por la presencia de elementos de gran rigidez que coaccionen la introducción del axil en la losa (muros, pantallas, ...)
- Disminución de la carga de punzonamiento eficaz por la inclinación del cable. Este efecto en losas de pequeño espesor, aún cuando es importante, nosotros no lo tenemos en cuenta.

Conviene destacar que con la formulación de la EHE, el efecto de la cuantía de pretensado sólo se puede tener en cuenta con cables adherentes.

3.5. CRITERIOS DE DISPOSICIÓN DE ARMADURA PASIVA

En el apartado de predimensionamiento hemos visto cómo para una losa de $8 \times 8 \text{ m}^2$, con una sobrecarga de 4 KN/m^2 , obteníamos una importante reducción en el consumo de hormigón, ya que el canto es tan sólo de 22 cm.

La cuantía de armadura activa es tan sólo de 6.4 Kg/m^2 .

Resulta obvio que plantear adecuadamente la colocación de la armadura pasiva permitirá finalmente hacer competitiva esta solución.

En este punto la EHE tampoco 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 losas, 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 las 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/ml.
Una compresión de 1 N/mm^2 equivale a una compresión uniforme en la misma sección de 30 cm de 300 KN/ml.

- **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 axial.

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 la 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 a 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.

4. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES

4.1. OBJETIVOS GENERALES DEL PROYECTO

El pretensado es la técnica consistente en la introducción en la estructura de unas fuerzas que producen tensiones, en general de signo contrario a las producidas por las restantes acciones aplicadas, con la intención de mejorar su capacidad resistente y/o su comportamiento

Las cargas transmitidas por el pretensado se resumen en fuerzas concentradas en las zonas de anclajes que precomprimen la estructura y en fuerzas de desviación, inducidas por el trazado curvo de los tendones, que pueden llegar a equilibrar el peso propio de la estructura e incluso las cargas permanentes y parte de las sobrecargas de uso.

Estas fuerzas de pretensado persiguen la generación en el hormigón de compresiones en las zonas que, posteriormente, bajo la acción de las cargas gravitatorias exteriores sufrirán tensiones de tracción. Los efectos del pretensado así introducido son los siguientes:

- La estructura se encuentra **permanentemente comprimida**, y por consiguiente no se fisura, por lo que resulta ser más rígida, durable y estanca que una estructura de hormigón armado. La deformabilidad instantánea queda además enormemente reducida.
- El sistema equivalente de cargas introducido por el pretensado (Load balancing) genera deformaciones y flechas de carácter permanente opuestas a las producidas por las cargas gravitatorias, reduciendo no sólo la deformabilidad instantánea sino también la diferida.
- Dado que el pretensado requiere materiales de alta resistencia (aceros de alto límite elástico, hormigón de resistencias superiores a 30 MPa), la capacidad resistente de las piezas sometidas a flexión aumenta notablemente.
- Así mismo la compresión del forjado en su plano mejora sensiblemente su comportamiento frente a esfuerzos tangenciales (corte y punzonamiento).
- Todo lo anterior **conduce a la posibilidad de reducción de cantos, espesores, cantidad de armaduras pasivas y, en general, de peso propio del hormigón armado, lo que permite, a su vez, aumentar las luces a cubrir.**
- Al encontrarse la estructura comprimida a edades tempranas, disminuyen los efectos de la retracción del hormigón y por lo tanto se puede aumentar la separación o hasta incluso eliminar las juntas de dilatación.
- Tiene un mejor comportamiento frente al fuego que los forjados reticulares y que las alveoplacas.
- Es posible, gracias al efecto de cosido, construir por tramos, reutilizar equipos y solidarizar posteriormente los elementos construidos. El efecto activo del pretensado y la utilización de hormigón de buena calidad, con resistencias altas a tempranas edades, pueden, asimismo, permitir descimbrados mucho más prematuros y, en consecuencia, aumentar la velocidad de construcción.
- La reducción de peso propio del forjado disminuye la carga total que llega a la cimentación. Por otra parte, el menor volumen de hormigón y peso de armadura pasiva, unido a la facilidad de colocación de la armadura activa, conducen a reducciones de plazos y a

ahorros económicos dignos de ser considerados tanto por la propiedad como por el constructor.

- Al completar el tesado de una planta (generalmente al tercer día del hormigonado) la estructura ya es auto-resistente y por lo tanto se puede descimbrar completamente el forjado y quitar el 100% de los puntales. En caso de tener que construir una planta superior, en función de la relación entre las cargas de diseño del forjado ya tesado y el peso de la planta superior, se deberá estudiar la necesidad de colocar algún apuntalamiento durante el cimbrado y hormigonado de la misma.
- Si se utiliza postesado adherente, existe la posibilidad de hacer agujeros en el forjado con posterioridad al hormigonado del mismo, cortando los cordones y transmitiendo el esfuerzo del mismo por adherencia.

Una de las consecuencias del desarrollo del hormigón pretensado ha sido la notable evolución en el diseño de las formas de los puentes, en los que se han aplicado nuevas técnicas constructivas que han aumentado las posibilidades para salvar vanos de grandes luces, acortando los plazos de ejecución y proporcionando una serie de ventajas relativas a la durabilidad, seguridad y economía. En el proyecto de puentes de grandes luces, la forma de la estructura adquiere importancia, hasta tal punto, que cuando se trata de disponer vanos de grandes luces, el puente queda identificado con la propia estructura, exenta prácticamente de elementos accesorios.

En la edificación generalmente el uso del hormigón pretensado, no ha influido en el aspecto exterior de los edificios, debido a que la estructura resistente queda integrada en un conjunto de elementos de distinta naturaleza, pero si ha influido en la disposición interna.

La diafanidad en el interior de los edificios y la disminución del espesor de los forjados aporta un valor añadido que suele compensar sobradamente el sobrecosto de construcción que implica el aumento de luces en edificios importantes situados en las grandes ciudades, por lo que la aplicación del postesado proporciona idóneas condiciones para su realización.

La consecución de grandes luces está condicionada por la limitación de canto de los forjados, y éste tiende a ser muy estricto en la edificación. La altura de una planta debe albergar el canto del forjado, el paso de las instalaciones, el falso techo, el pavimento y el espacio útil para el desarrollo de la actividad humana o de la función para la que se construye el edificio. Por ello la tendencia actual es disponer techos planos, eliminando las jácenas o vigas de canto que dificultan el paso de las instalaciones, e incrementan los plazos y costos de ejecución. No siempre se puede, por tanto, conseguir las luces deseadas y resistir las cargas actuantes con las técnicas convencionales de construcción de forjados, debiéndose buscar alternativas con fundamento tecnológico como el postesado.

Las ventajas económicas del empleo del postesado resultan evidentes cuando se disponen vanos relativamente grandes en edificios, dado que el costo unitario del forjado guarda relación con la magnitud de las luces y de las sobrecargas.

De manera de mostrar algunos objetivos generales que se deben considerar en el diseño conceptual de un edificio, vamos a clasificarlos en función de la dirección predominante en la que avanza su construcción:

Edificios de media a gran altura, donde la construcción progresa verticalmente de forjado a forjado. La alta repetición de forjados idénticos que se ejecutan uno a continuación del otro, implican unos objetivos típicos de este tipo de construcción:

- Minimizar el tiempo total de construcción del edificio y disminuir la necesidad de re-apuntalamientos.
- Minimizar las dimensiones de pilares y fundaciones: reduciendo el peso propio de los forjados.



- Grandes vanos entre pilares, para obtener una mayor flexibilidad en el uso.
- Minimizar la altura total del edificio, reduciendo el espesor de los forjados. En principio sería incompatible con el punto anterior.

Es típico de edificios de oficinas, hoteles, sedes de entidades financieras, etc.

El coste del suelo urbano, especialmente en grandes ciudades densamente pobladas como las españolas, tiene una repercusión enorme en el coste total del edificio. La posibilidad de reducir el canto de forma considerable (hasta un 40 por ciento), manteniendo las luces o incluso aumentándolas ligeramente, puede permitir en algunos casos construir una planta más sin superar las limitaciones de altura de las Ordenanzas Municipales, lo que desde el punto de vista del propietario constituye una opción que, por sí misma, justificará sobradamente en términos económicos la solución estructural adoptada.

En otros casos se puede disminuir la altura total del edificio, manteniendo la misma cantidad de plantas y la altura libre interior, con el consiguiente ahorro en cerramientos (piel de vidrio) y en caso de sótanos menor profundidad de muros pantallas y de volumen de excavación (importante en presencia de nivel freático).



Edificios de altura baja pero con una gran superficie en cada planta, en este caso la dirección predominante de avance de la construcción es horizontal, con alguna progresión vertical simultánea. En este caso, al no existir una gran repetición de forjados idénticos y la cantidad total de los mismos es relativamente pequeña, entonces el espesor y el peso del forjado no juegan un papel tan importante como en el caso anterior. En este caso es primordial la simplicidad del encofrado y el armado que se traduzcan en una gran velocidad de avance.

Este tipo de construcción es típica de aparcamientos, edificios industriales, centros comerciales, etc.

La utilización del postesado ayuda a alcanzar estos objetivos ya que permite reducir el canto total y lograr forjados más esbeltos respecto de otros de hormigón armado, resolviendo la incompatibilidad de grandes luces y pequeños espesores. También disminuye la cantidad total de armadura de refuerzo, permitiendo la estandarización y simplificación de la misma. Disminuye la

cantidad total de hormigón. Se puede desapuntalar antes que los forjado no postesados. Se puede controlar mejor la fisuración y la deformabilidad.

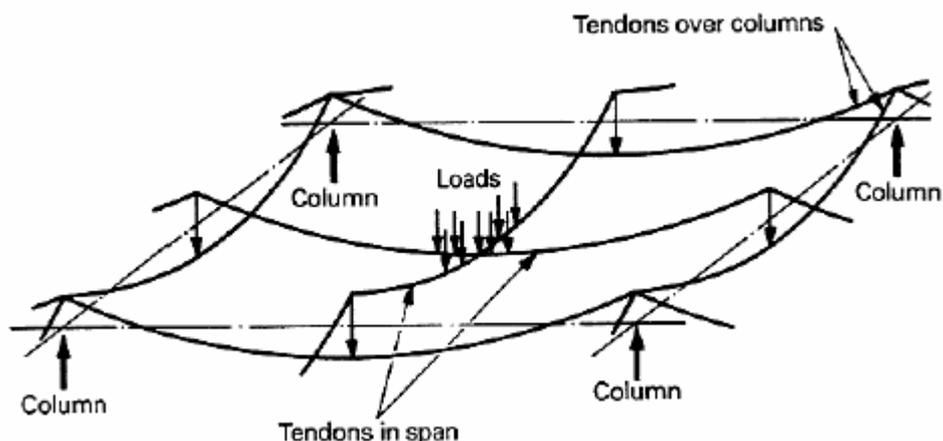
4.2. TRAZADO DE LOS TENDONES

4.2.1. Trazado en alzado:

El trazado en alzado de los cordones se suele estar compuesto por segmentos parabólicos con excentricidad máxima en el centro del vano y curvatura inversa sobre los pilares. El punto de inflexión entre ambas curvas suele estar en el entorno de $0.1L$. De manera de aprovechar al máximo la influencia beneficiosa respecto al punzonamiento (restar la fuerza equivalente de pretensado que va directamente al pilar), resulta conveniente ubicar el punto de inflexión a una distancia $d/2$ de la cara del pilar. Para esto último hay que respetar los radios mínimos de curvatura sobre el pilar para cada tipo de tendón (en monocordones es de 2,5m). Por otra parte es recomendable llegar al anclaje en posición horizontal y con una cierta longitud recta para asegurar la operación de tesado y el correcto anclaje de las cuñas.

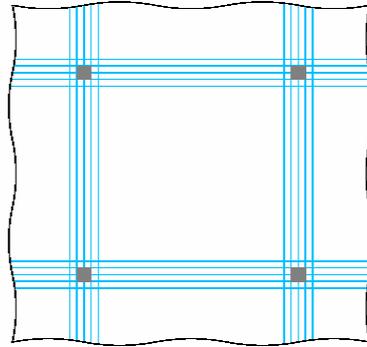
4.2.2. Trazado en planta:

La transferencia de cargas desde el interior de un vano de una losa plana hacia los pilares, se realiza de la siguiente manera: los tendones de vano trasladan las cargas a los tendones sobre pilares y estos a los pilares, según se observa en la figura.

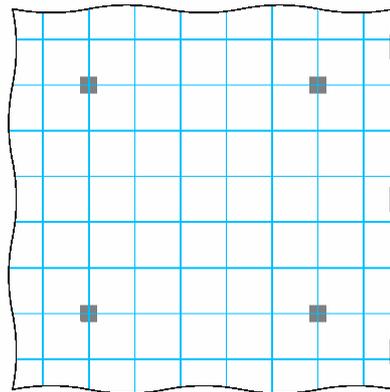


A partir de este concepto se plantean 4 soluciones para la disposición en planta de los cordones. Cada una de estas hay que analizarlas desde el punto de vista de la flexión, el punzonamiento y la colocación en obra:

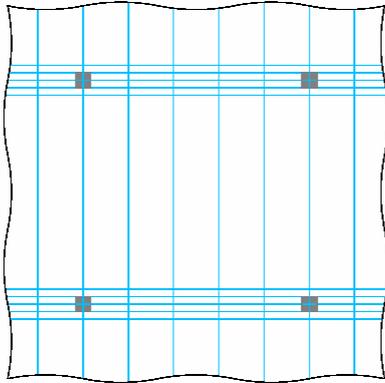
- **Concentrados en dos direcciones:** todos los tendones concentrados sobre pilares en las dos direcciones. Hay que disponer una gran cantidad de armadura pasiva para llevar las cargas desde el centro de vano hasta la línea de pilares. Entre los anclajes de las bandas se genera una zona en la cuál no llegan las precompresiones, y por consiguiente es necesario disponer las armaduras geométricas mínimas indicadas en la normativa.



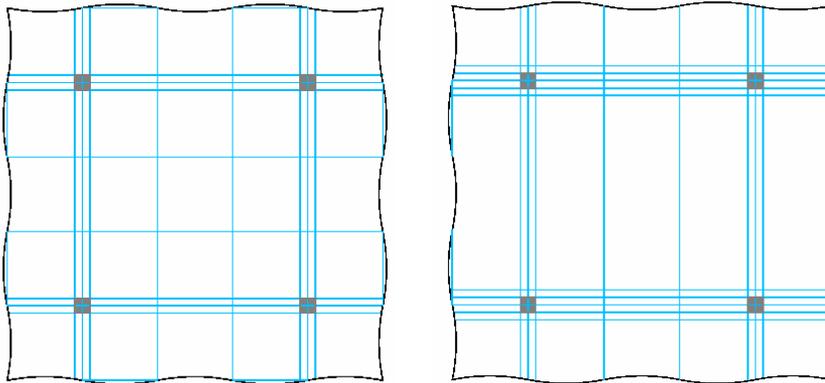
- **Distribuidos en dos direcciones:** esta alternativa es muy eficiente estructuralmente (menores deformaciones que la anterior) pero tiene una gran desventaja constructiva, ya que se deben trenzar los tendones para formar una especie de canasta, comenzando por el grupo que está por debajo de todos los demás, lo que implica un detallamiento de la secuencia de montaje. No se aprovechan los beneficios frente a esfuerzos de punzonamiento.



- **Concentrados en una dirección y distribuidos en la otra (Banda-Uniformes):** Constructivamente se eliminan todas las interferencias, salvo un grupo de los distribuidos, sobre pilares. Esta disposición potencia el comportamiento unidireccional en pre-rotura, pero no tiene ninguna influencia bajo cargas de servicio. Es la más utilizada por su simplicidad. En losas planas con distribución irregular de pilares, es la mejor manera de visualizar que toda la carga de la losa se transfiera a los pilares. Ensayos de laboratorio y millones de metros cuadrados de losa construidos desde fines de 1960, verifican el correcto funcionamiento de esta disposición de tendones.



- **Disposiciones mixtas:** concentrar la mitad de los tendones sobre pilares y distribuir los restantes uniformemente. Esto se puede hacer en una o dos direcciones. La más usual es combinar esto con tendones concentrados en la otra dirección. Intentan conjugar la facilidad constructiva con la eficiencia estructural y mejora la resistencia a punzonamiento comparado con los tendones distribuidos.



La distancia máxima a respetar en el caso de cordones distribuidos uniformemente es de 8 veces el espesor de la losa o de 1,5m. Esta limitación no rige para tendones en banda.

4.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ELECCIÓN DE LA TIPOLOGÍA

Los principales factores a tener en cuenta al momento de elegir la tipología estructural del forjado son los siguientes:

- Luz típica entre pilares
- Relación entre luces de los vanos en direcciones X e Y: para relaciones cercanas a 1, es conveniente la utilización de sistemas bidireccionales.
- Magnitud de la Carga adicional al peso propio + la Sobrecarga de uso (ligero, medio o pesado).

- Altura total del forjado estructural: determina la altura total del edificio (importante para edificios en altura)
- Constructibilidad: acceso de grúas, costo del encofrado y cantidad de re-utilizaciones, utilización de mesas, vinculación a elementos construidos con anterioridad, punzonamiento, posibilidad de tesar desde los bordes exteriores.
- Flexibilidad para el lay-out de instalaciones y/o servicios a disponer entre el forjado y el falso techo: posibilidad de disponer vigas de canto.
- Peso propio del forjado por unidad de superficie (promedio): determina el tamaño de soportes y fundaciones, y en zona sísmica, la magnitud de la fuerza horizontal.
- Requerimientos en Estado Límite de Servicio (fisuración, deformación) y de resistencia (E.L.U.).
- Si el forjado es parte de la estructura resistente frente a cargas horizontales, es preferible la utilización de vigas de canto para materializar los pórticos resistentes.
- Hormigón visto o falso techo?
- Tipo de Edificio: en altura o en superficie.

4.4. CLASIFICACION DE FORJADOS

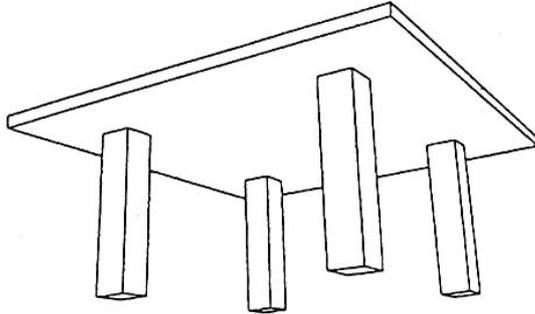
Se presentan a continuación los principales tipos de forjados postesados, que como se puede ver son similares a los empleados en hormigón armado.

Dichas tipologías se pueden clasificar de diferentes maneras, una de las cuales es la que proponemos aquí: sistemas unidireccionales y bidireccionales. Cada uno de estos se puede dividir en diferentes grupos dependiendo si se utilizan vigas o no, y en caso de utilizarse si estas son de canto o vigas planas. A su vez cada subgrupo se puede sub-dividir en función del tipo de losa (maciza con o sin capiteles/ábacos, aligerada, reticular).

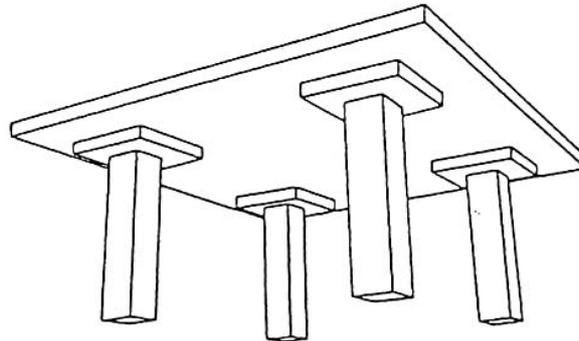
4.4.1. SISTEMAS BIDIRECCIONALES (2 WAY SYSTEMS):

Losas Planas: rango de utilización: 7 a 10m, para cargas ligeras a medias. Encofrado muy sencillo y flexibilidad en la disposición de pilares. A medida que aumenta la luz problemas de punzonamiento y/o congestión de armadura pasiva sobre apoyos. Para vanos largos tiene mucho consumo de hormigón y mayores deformaciones que otros sistemas. No es conveniente su utilización en caso de luces muy distintas en ambas direcciones, salvo que la dirección de mayor luz se haga postesada y la otra armada. En cuanto al trazado de tendones, se puede utilizar cualquiera de los citados, siendo los más usuales los mixtos o Banda-Uniforme, que proveen una mejor compensación de cargas (menor deformación en servicio).



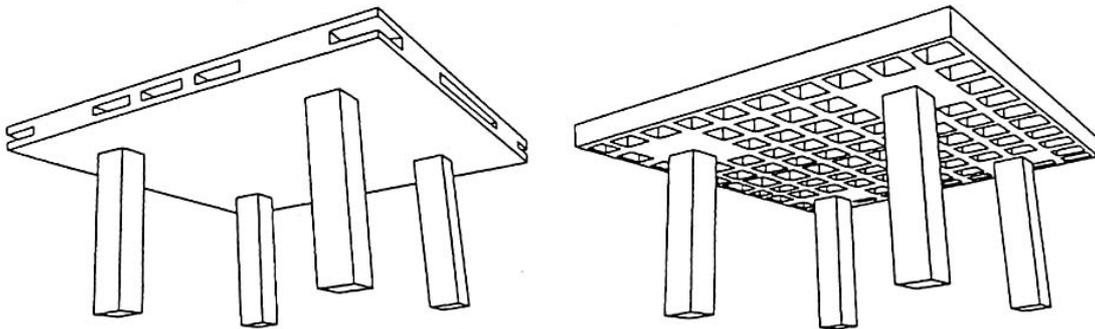


Losas con Capiteles o Ábacos: se puede llegar hasta 13m para cargas medias. Los capiteles sólo aumentan la resistencia a punzonamiento, mientras que los ábacos, si respetan ciertas dimensiones mínimas (dimensiones típicas: 1/3 de la luz con 1.5 a 2 veces el espesor de la losa) también aumentan la capacidad resistente frente a momentos sobre pilares. Tienen, como comentamos, mejor resistencia a punzonamiento que el anterior, así como menor consumo de hormigón para vanos largos y menor congestión de armadura sobre apoyos (con ábacos). El principal inconveniente es la mayor complicación y costo del encofrado. El trazado de tendones es similar al caso anterior, siendo mas adecuadas las disposiciones mixtas.

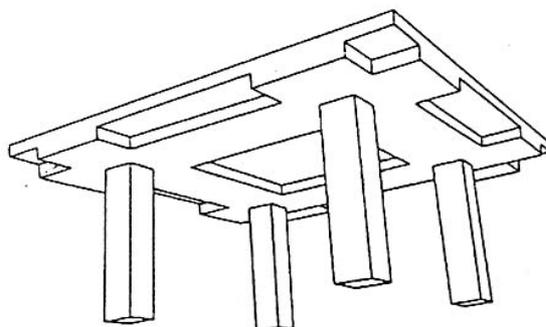


Losas Aligeradas: mismo campo de aplicación que el anterior. Misma ventajas que la losa plana, pero menor peso propio para cubrir la misma luz, o se puede cubrir luces mayores con el mismo

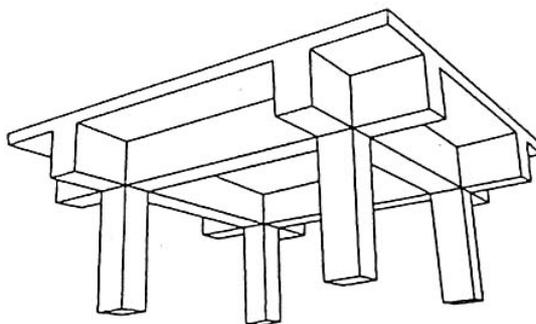
peso. Mejoran las deformaciones. Mayor complicación para encofrar y armar los nervios. En hormigón postesado es más usual tener capa de compresión inferior y superior (sección alveolar), para absorber las compresiones en vacío. Hay que cumplir unos requisitos mínimos de ancho de nervio, espesor de losa y recubrimiento para satisfacer las condiciones de resistencia al fuego, y también para permitir un correcto hormigonado de los nervios, ya que tiene armadura pasiva y activa. Los aligeramientos pueden ser de bloques perdidos de material ligero o casetones recuperables. En este caso se utilizan trazados en planta distribuidos, y si se disponen macizamientos en las líneas de pilares, se concentran una mayor cantidad de tendones en estos.



Vigas planas en dos direcciones + Losa: se recomienda cuando las luces en ambas direcciones superan los 13-15m y las cargas son medias a pesadas, pero su utilización no es muy común por el alto costo del encofrado, la mano de obra y la complicación para el tendido de instalaciones. La disposición en planta de los tendones puede ser concentrada en ambas direcciones o mixta en ambas direcciones.

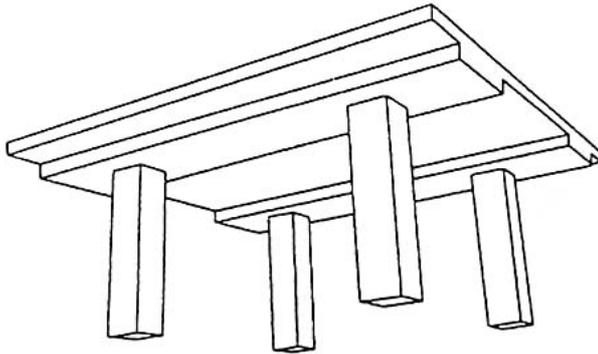


Vigas de Canto en dos direcciones + Losa: igual que el anterior, pero se utiliza cuando no hay limitaciones en el canto total del forjado. El costo del encofrado es aún mayor. La principal ventaja es que admite grandes cargas concentradas con pequeñas deformaciones. El trazado es similar al anterior.

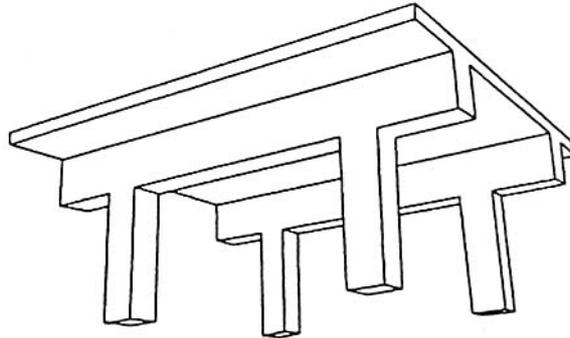


4.4.2. SISTEMAS UNIDIRECCIONALES (1 WAY SYSTEM):

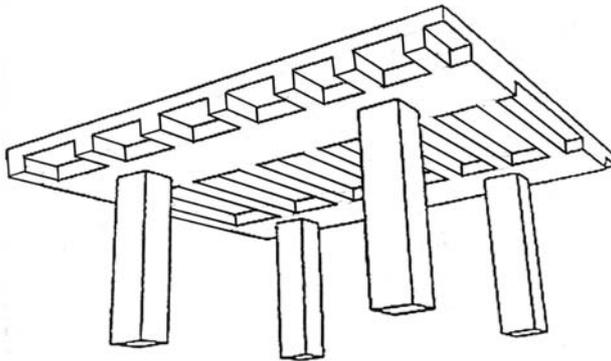
Viga Plana unidireccional + Losa: este caso es muy usual cuando las luces son muy distintas en las dos direcciones. La viga plana puede cubrir luces de hasta 20m y la losa hasta 10m. Los tendones se colocan concentrados en las vigas y se distribuyen uniformemente en la losa.



Viga de Canto unidireccional + Losa: igual que el anterior, pero puede cubrir luces mayores y recibir grandes cargas concentradas (vigas cargadero). El trazado es igual al anterior.



Forjado Aligerado unidireccional con fondo plano: esta solución es muy aconsejable cuando las luces son distintas en ambas direcciones (del orden del doble), pero en este caso la losa nervada cubre la luz larga y la viga plana (del mismo canto) salva la luz menor. Solución óptima para luces de 12 x 6m, o mayores. Esta solución también es muy utilizada en el caso de vanos únicos, con luces de 10 a 20m. Si la luz perpendicular a la principal es pequeña, conviene hacerlo de hormigón armado. En este caso los tendones concentrados (Banda) se colocan salvando la luz menor (en el macizamiento o viga plana) y se distribuyen uniformemente en los nervios (luz mayor).



4.5. PREDIMENSIONAMIENTO, RANGOS DE UTILIZACION

Hemos mencionado que un forjado postesado puede ser más esbelto para una cierta carga y limitación de su deflexión que uno de hormigón armado. Esto es principalmente debido al efecto de las cargas equivalentes por el trazado curvo de los cordones de postesado (Load Balancing Method T. Y. Lin). En el tramo las cargas equivalentes actúan sobre el hormigón oponiéndose a la gravedad. Donde la curvatura de los cordones se invierte (sobre la línea de pilares) las fuerzas de desviación actúan hacia abajo, generando cargas concentradas sobre los cordones de la faja de pilares, que a su vez están equilibradas por el efecto ascendente de la fuerza de desviación de los cordones de la faja de pilares, que a su vez introducen una fuerza concentrada en los pilares.

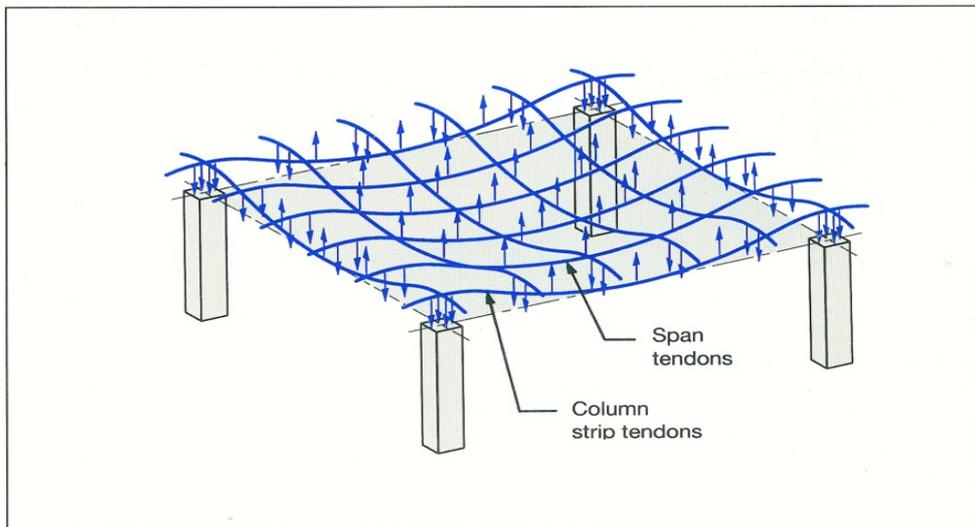


Fig. 5.1: Principle of Load-Balancing by Draped Prestressing Tendons

El sistema indicado en la figura puede ser comparado con una red dispuesta entre los pilares. Cuando esta red es estirada desde todo el contorno introduce las cargas equivalentes sobre el hormigón. La cantidad de acero de postesado puede ser determinada con la condición que los cordones provean suficiente carga de desvío para equilibrar un cierto porcentaje del peso propio del forjado. Este porcentaje depende de la relación entre el peso propio, la carga permanente

adicional y la sobrecarga de uso y está típicamente entre el 70% y el 130% del peso propio. Para edificios de oficinas con sobrecargas de uso del orden de 4 KN/m² mas 1 KN/m² de carga permanente adicional, la compensación suele ser entre el 70% y el 90% del peso propio, mientras que en forjados con sobrecargas elevadas, más del 100% puede ser equilibrado.

Otra causa del mejor comportamiento frente a fisuración y deformaciones de los forjados postesados es la compresión del hormigón en su plano transmitida desde los anclajes. Al no haber prácticamente ningún acortamiento elástico en el plano, esta tensión de compresión neutraliza parte de la tensión de tracción por flexión debida a la porción de las cargas actuantes no equilibrada por las fuerzas de desviación de los cordones. Los rangos típicos de precompresión en forjados de edificación están entre 1 y 2,5 N/mm².

Ahora veamos las relaciones típicas entre Luz/Espesor para forjados postesados:

- Para cargas ligeras (hasta 3,5 KN/m²) y considerando que el punzonamiento no es crítico, una losa plana postesada puede ser proyectada con un espesor de L/40, siendo L la luz mayor, comparado con L/30 para hormigón armado.
- Si se agregan ábacos con dimensiones suficientes como para absorber momentos, se puede disminuir el espesor hasta L/45 (L/35 para hormigón armado).
- Para valores mayores de carga adicional al peso propio, la relación Luz/espesor disminuye, particularmente si la sobrecarga de uso (variable con el tiempo) es predominante. Entonces la cantidad de postesado no puede ser simplemente incrementada hasta equilibrar la carga adicional, sino que, para controlar las deformaciones es necesario aumentar el espesor del forjado. Esto es así ya que, en caso de que la carga adicional sea mucho mayor que el peso propio, pueden aparecer problemas cuando no actúa dicha carga.

Cuando la relación entre la carga total y el peso propio es mayor de 2,5 y las luces exceden los 10m, las losas planas con o sin ábacos, dejan de ser competitivas económicamente. Es conveniente utilizar otras tipologías con mayor eficiencia estructural, esto es mayor inercia y resistencia a flexión para un cierto peso propio por unidad de superficie. Vigas planas en una o dos direcciones, losa aligerada con vigas planas o forjados reticulares son más ligeros que una losa maciza equivalente.

Para estos sistemas es mucho mas difícil dar relaciones entre luz / espesor para el predimensionado. Esto es debido a que hay muchas variables adicionales, como por ejemplo la separación entre vigas, el ancho de las mismas o el espesor de la losa entre vigas. Generalmente es necesario estudiar una cierta cantidad de variantes antes de decidir las dimensiones.

Nuestra experiencia muestra que en el caso de sistemas unidireccionales de losas y vigas planas, el ancho de las últimas ronda entre 1/4 y 1/5 de la separación entre vigas, con un canto entre 2 y 2.5 veces el espesor de la losa (si esta es maciza) para cargas ligeras a medias. El espesor de la losa puede variar entre 1/35 y 1/45 de la luz libre entre vigas, o por los requerimientos de espesores mínimos. El canto de las vigas puede estar entre L/20 a L/30 dependiendo de la separación entre las mismas. También es importante definir el ancho de las vigas planas en función de las dimensiones de encofrados del mercado de manera de economizar tiempo y dinero.

Al predimensionar forjados postesados, los paños de borde y esquina requieren un tratamiento diferencial debido a sus condiciones de borde diferentes. Al menos 20% mas de armadura activa y pasiva debe preverse comparado con un vano interior de similar luz. Cuando resultan valores poco prácticos, se debe intentar aumentar el espesor o mucho mas conveniente disminuir la luz del vano extremo en al menos un 20%.

Para vanos únicos el espesor a considerar es sensiblemente mayor que lo hasta aquí indicado.

Para estimar las cuantías de acero pasivo, es bastante simple y efectivo considerar que el peso combinado del acero de refuerzo y el de pretensado ponderado por la relación de límites elásticos

(convertido a acero de refuerzo normal) se encuentra normalmente entre 80 y 130 kg/m³ de hormigón. Este es un promedio para todo el forjado considerando los vanos de borde y esquina. Si para postesado adherente se asume que los cordones alcanzan el límite elástico en estado último, para cordones no adherentes (engrasados y envainados) se debería utilizar sólo la tensión efectiva en lugar del límite elástico.



5. SISTEMAS Y PRODUCTOS

5.1. INTRODUCCIÓN

Los distintos sistemas de postesado que existen actualmente en el mercado, tienen como objetivos principales ofrecer productos que garanticen la transmisión y anclaje de las fuerzas de pretensado, y la durabilidad de los mismos durante toda la vida de servicio de la estructura. Para ello y para satisfacer los distintos condicionantes geométricos y mecánicos existen distintos tipos de anclajes, desde los más habituales con vaina circular, pasando por los planos (vaina plana), acopladores, fijos o flotantes y todo ello para tendones desde un cordón o barra hasta más de treinta cordones.

Los elementos tensores principales suelen ser alambres, cordones o barras de acero de alto límite elástico. En los siguientes apartados se van a describir cada uno de los sistemas para cada tipo de elemento tensor, describiendo sus elementos más habituales, los equipos empleados, los sistemas de protección frente a la corrosión y por último, los controles de calidad que se realizan.

En la figura 5.1 se describe el esquema básico que tiene cualquier tendón, sea cual sea su elemento tensor y que consta de dos zonas de anclaje en los extremos, una o varias zonas de empalme (si fueran necesarias, al construir la estructura por fases) y de las zonas entre anclajes y/o empalmes, que llamaremos longitud libre.

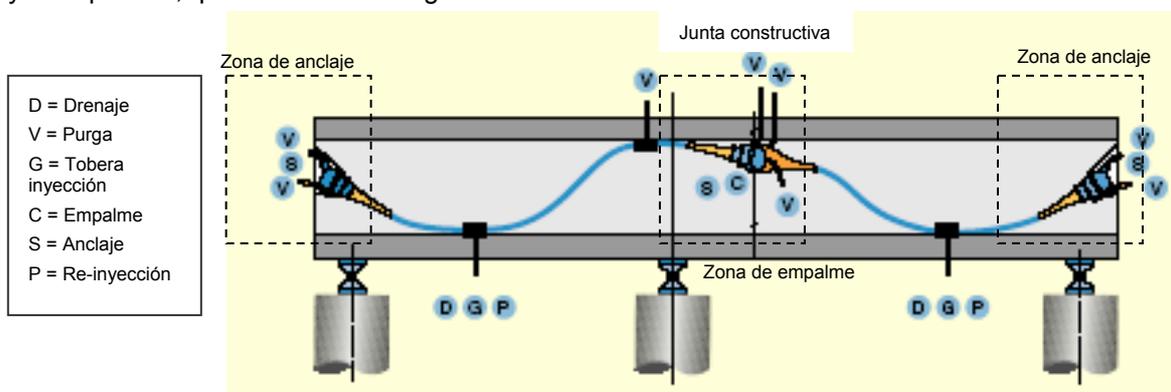


Figura 5.1. Esquema tendón

5.2. SISTEMAS DE POSTESADO CON CORDÓN.

El elemento principal tensor es el cordón de acero, que está formado por 7 alambres de acero trefilados cuyas características principales se resumen en la tabla siguiente y que también están definidas en la EHE, es su artículo 32.5 y en la prEN 10138.

| Designación | Diámetro nominal | Diámetro nominal | Carga unitaria máxima | Área | Peso | Carga máxima |
|-------------|------------------|------------------|-----------------------|--------------------|--------|--------------|
| [-] | [mm] | ["] | [N/mm ²] | [mm ²] | [kg/m] | [kN] |
| Y 1860 S7 | 12.90 | 0.5 | 1860 | 100 | 0.785 | 186.0 |
| Y 1860 S7 | 15.24 | 0.6 | 1860 | 140 | 1.102 | 260.7 |
| Y 1860 S7 | 15.70 | 0.62 | 1860 | 150 | 1.180 | 279.0 |

Tabla 5.1 Características cordones de acero

Para todos los cordones arriba definidos se puede tomar como módulo de elasticidad aproximado 195000 N/mm². La relajación a las 1000 h, bajo una temperatura de 20°C y para una tensión igual al 70% de la carga unitaria máxima no será superior al 2% (UNE 36422:85).

En función de los criterios de proyecto se puede elegir entre instalar tendones de postesado no adherente, es decir cordones engrasados y enfundados unitariamente con tubos lisos de PE, o colocar tendones de postesado adherente, tal que, los cordones se enfilan desnudos dentro de una vaina global que puede ser metálica o de PP.

5.2.1. No adherente

Los tendones de postesado no adherente más habituales son los formados por un solo cordón, aunque las distintas casas de postesado ofrezcan soluciones estándar de hasta 12 cordones. Las fuerzas de pretensado por tanto, varían desde los 186 kN hasta los 3312 kN. Ya sea para un solo cordón como para varios, la filosofía de anclaje de los cordones para cada tipo de tendón es similar:

- Anclaje del cordón desnudo mediante cuñas.
- Placa de cuñas. Placa de acero con taladros cónicos para el alojamiento de las cuñas.
- Placa de reparto, circular o cuadrada, de acero. Transmite la fuerza de pretensado al hormigón. Normalmente la placa de cuñas y de reparto están unidas en una única pieza que satisface las dos funciones, alojar adecuadamente las cuñas y transmitir la fuerza de pretensado al hormigón.

Para garantizar que la cuña muerde bien al cordón, se debe eliminar el enfundado del cordón en la zona de la placa de cuñas. En las figuras siguientes (5.2 a 5.5) se muestran los diferentes tipos de anclajes más comunes. Estos pueden ser activos, se tesa desde ellos, pasivos accesibles, es decir, no se tesa desde ellos pero no quedan embebidos en el hormigón, pasivos no accesibles (embebidos en el hormigón) y acopladores, tanto fijos como flotantes.

Añadir que en todos los casos se debe definir en colaboración con el suministrador del sistema la armadura de refuerzo junto a las cabezas de los anclajes. Esta podrá estar formada por una hélice, cercos circulares o rectangulares, etc.

Los anclajes, además de los elementos estructurales antes descritos, constan de una serie de accesorios que facilitan, por ejemplo, la instalación de los mismos, ya que conectan el anclaje al encofrado, caperuzas, que impiden la entrada de agua o suciedad, trompetas, etc.

Anclaje rectangular monocordón



Anclaje circular monocordón

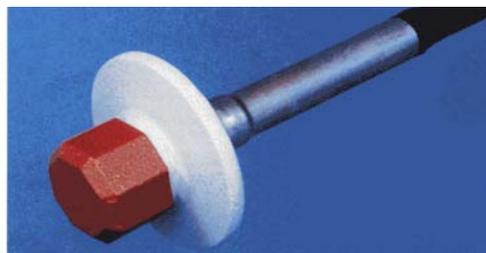
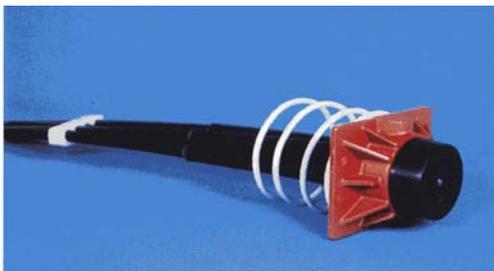


Figura 5.2. Anclajes monocordón

Anclaje rectangular multicordón



Anclaje acoplador unitario fijo



Figura 5.3. Anclajes multi-cordón y acoplador unitario fijo

Anclaje acoplador flotante unitario



Anclaje acoplador flotante multicordón



Figura 5.4. Acoplador flotante unitario y multicordón

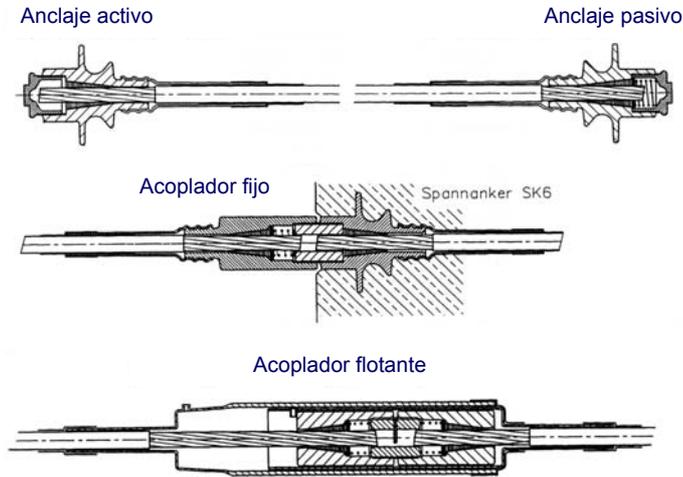


Figura 5.5. Anclajes unitarios

5.2.2. Adherente

Los sistemas de postesado adherente suelen tener como diferencia fundamental respecto a los no adherentes, que los primeros necesitan en la zona de longitud libre del tendón una vaina global metálica o de PP, que primero durante el hormigonado conforma el conducto por donde van a ir los cordones, y segundo proporciona mediante sus corrugas la adherencia de la lechada de cemento con el hormigón de la estructura. La vaina corrugada puede ser circular u ovalada. Evidentemente los cordones no están enfundados porque de lo contrario, no habría adherencia entre ellos y la lechada de cemento.



Figura 5.6. Vaina metálica corrugada



Figura 5.7. Vaina PP corrugada

Los elementos estructurales de los anclajes son iguales a los de los anclajes de cordón no adherente, es decir están formados por las siguientes piezas:

- Cuñas
- Placa de cuñas

- Culata o placa de reparto.

En los anclajes pequeños, desde 1 a 5 ó 7 cordones, la placa de cuñas y la de reparto se suelen fundir en una sola pieza, tal y como hemos dicho más arriba. A partir de 5 ó 7 cordones suelen ser piezas diferenciadas.

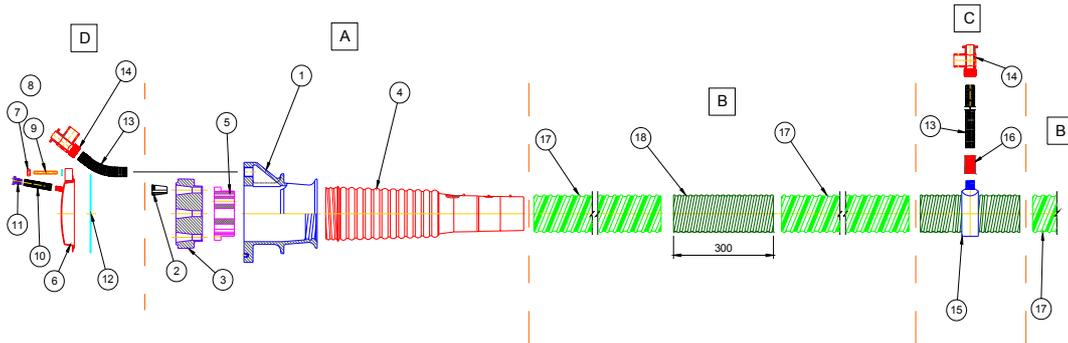


Figura 5.8. Despiece tipo de anclaje

En las siguientes imágenes se muestran fotos de los distintos tipos de anclajes y se da el número aproximado de cordones que pueden alojar.



| Anclaje activo | Anclaje pasivo | | | Nº de cordones aprox. | |
|----------------|----------------|--------------|-----------|-----------------------|--------|
| | Accesible | No accesible | Acoplador | Mínimo | Máximo |
| ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 5 | > 37 |

Uso habitual: Como tendón longitudinal en vigas. Máxima potencia para mínima sección frontal y por tanto mínima separación entre ejes de tendones

Figura 5.8. Anclaje múltiple con vaina circular



| Anclaje activo | Anclaje pasivo | | Acoplador | Nº de cordones aprox. | |
|--|----------------|--------------|-----------|-----------------------|--------|
| | Accesible | No accesible | | Mínimo | Máximo |
| ✓ | ✓ | ✓ | - | 3 | 5 |
| Uso habitual: En losas, donde se necesita optimizar el brazo de palanca del pretensado | | | | | |

Figura 5.9. Anclaje con vaina plana



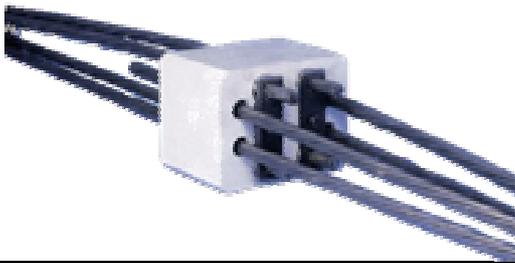
| Anclaje activo | Anclaje pasivo | | Acoplador | Nº de cordones aprox. | |
|--|----------------|--------------|-----------|-----------------------|--------|
| | Accesible | No accesible | | Mínimo | Máximo |
| ✓ | ✓ | ✓ | - | 3 | 7 |
| Uso habitual: En losas o vigas pequeñas, donde la densidad de tendones es alta y la potencia de los mismos es pequeña. | | | | | |

Figura 5.10. Anclaje simple con vaina circular



| | Anclaje pasivo | | | Nº de cordones aprox. | |
|------------------------------------|----------------|--------------|-----------|-----------------------|--------|
| Anclaje activo | Accesible | No accesible | Acoplador | Mínimo | Máximo |
| ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 1 | 1 |
| Uso habitual: En losas de forjados | | | | | |

Figura 5.11. Anclaje monocordón



| | Anclaje pasivo | | | Nº de cordones aprox. | |
|--|----------------|--------------|-----------|-----------------------|--------|
| Anclaje activo | Accesible | No accesible | Acoplador | Mínimo | Máximo |
| ✓ | ✓ | - | - | 1 | 12 |
| Uso habitual: En estructuras circulares, como tanques ó arranques de cúpulas | | | | | |

Figura 5.12. Anclaje flotante cerrado



| Vaina | | Acoplador | | Nº de cordones aprox. | |
|--|-------|-----------|----------|-----------------------|--------|
| Circular | Plana | Fijo | Flotante | Mínimo | Máximo |
| ✓ | - | ✓ | - | 5 | > 37 |
| Uso habitual: Empalme de cordones ya tesados en una primera fase | | | | | |

Figura 5.13. Anclaje acoplador fijo



| Vaina | | Acoplador | | Nº de cordones aprox. | |
|--|-------|-----------|----------|-----------------------|--------|
| Circular | Plana | Fijo | Flotante | Mínimo | Máximo |
| ✓ | - | - | ✓ | 1 | > 27 |
| Uso habitual: Empalme de cordones no tesados previamente en una primera fase | | | | | |

Figura 5.14. Anclaje acoplador fijo



| Anclaje activo | Anclaje pasivo | | Acoplador | Nº de cordones aprox. | |
|---|----------------|--------------|-----------|-----------------------|--------|
| | Accesible | No accesible | | Mínimo | Máximo |
| - | - | ✓ | - | 1 | 19 |
| Uso habitual: En tendones prefabricados | | | | | |

Figura 5.15. Anclaje adherente



| Anclaje activo | Anclaje pasivo | | Acoplador | Nº de cordones aprox. | |
|--|----------------|--------------|-----------|-----------------------|--------|
| | Accesible | No accesible | | Mínimo | Máximo |
| - | - | ✓ | - | 5 | 27 |
| Uso habitual: En muros, pantallas o cualquier otra estructura vertical, en donde los anclajes están en el extremo superior de la misma | | | | | |

Figura 5.16. Anclaje en U

5.3. SISTEMAS DE POSTESADO CON BARRA

Hoy en día el uso de las barras de postesado está centrado en el cosido o zunchado de diferentes partes de una misma estructura, ya sea esta de hormigón o metálica, en tirantes, o en tendones cortos o muy cortos (Longitudes de menos de 4 ó 5 m). Los cosidos o zunchados suelen ser casi siempre ejemplos claros de tendones cortos.

Las barras se pueden llegar a suministrar hasta con longitudes de 30 m, aunque lo habitual es que tengan longitudes máximas de 12 m. Cuando la longitud del tendón es mayor que la de la barra, estas se empalman con manguitos.

En la actualidad existen dos tipos de barras de postesado, las lisas y las corrugadas (Ver figura 5.17). Las barras lisas se emplean sobre todo en tendones muy cortos, ya que su rosca fina (sólo



en los extremos de la barra) disminuye las pérdidas por acoplamiento entre roscas. Existen dos diámetros comerciales que son 32 y 36 mm, con unas características mecánicas diferentes, 835/1030 N/mm² y 1080/1230 N/mm² respectivamente, en donde el numerador es el límite elástico y el denominador la carga unitaria máxima.

Las barras corrugadas se emplean cuando se necesita transmitir las fuerzas de pretensado por adherencia en una longitud mínima. Además la corruga forma una rosca continua muy resistente, que permite empalmar barras o anclarlas mediante placas de reparto en cualquier posición de las barras. En el caso de las barras corrugadas sólo existe un tipo de acero, que es el 950/1050 N/mm², pero un mayor rango de diámetros (26.5, 32, 36, 40 y 47 mm)

Las barras de postesado NO son soldables al igual que el cordón.

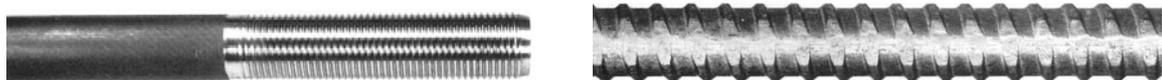


Figura 5.17. Barras lisa y corrugada

5.3.1. Barra lisa.

A continuación se resumen las principales características geométricas y mecánicas de las barras lisas y de sus accesorios:

| Diámetro | f _{pk} | f _{máx} | Área | Peso | Módulo elasticidad | Deform. A10 | Carga rotura |
|-----------|----------------------|----------------------|--------------------|--------|----------------------|-------------|--------------|
| [mm] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [mm ²] | [kg/m] | [N/mm ²] | [%] | [kN] |
| 32 | 835 | 1030 | 804 | 6.31 | 205000 | 7 | 828 |
| 36 | 1080 | 1230 | 1018 | 7.99 | 205000 | 6 | 1252 |

Tabla 5.2. Características mecánicas barras lisas

Los valores de relajación para una carga de 0.7f_{máx} durante 1000 h son inferiores al 3.3%.

Las amplitudes de tensiones 2σ_a y 2.0·10⁶ ciclos para las barras y sus accesorios son:

| Diámetro | Barra para σ ₀ = 0.7f _{máx} | Tuercas y manguitos para σ ₀ = 0.6f _{máx} | Manguitos transición para σ ₀ = 0.6f _{máx} |
|-----------|---|---|--|
| [mm] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] |
| 32 | 200 | 98 | 78 |
| 36 | 200 | 98 | 78 |

Tabla 5.3. Fatiga

Las dimensiones de los accesorios principales son las siguientes:

| Diámetro | Tuerca esférica | | Manguito | | Placa de reparto | |
|-----------|-----------------|------|----------|----------|------------------|---------|
| | Longitud | E/C | Longitud | Diámetro | Lado | Espesor |
| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| 32 | 46 | 55 | 110 | 60 | 160 | 40 |
| 36 | 60 | 65 | 160 | 72 | 200 | 50 |

Tabla 5.4. Dimensiones accesorios

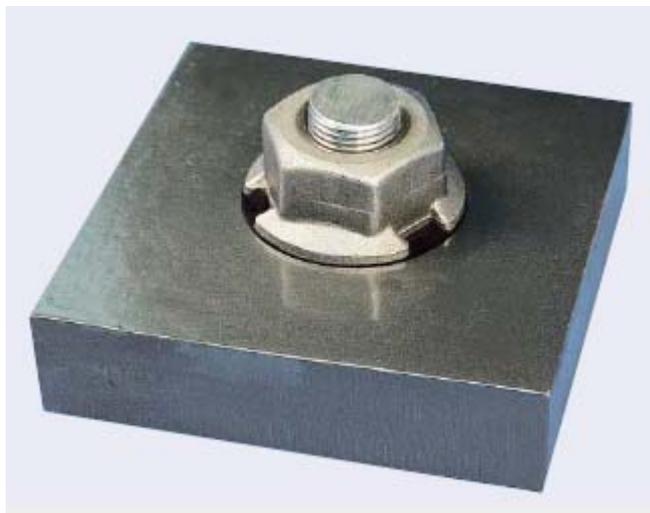


Figura 5.18. Anclaje con tuerca esférica

5.3.2. Barra corrugada.

A continuación se resumen las principales características geométricas y mecánicas de las barras corrugadas y de sus accesorios:

| Diámetro | f_{pk} | $f_{máx}$ | Área | Peso | Módulo elasticidad | Deform. A10 | Carga rotura |
|-------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------|----------------------|-------------|--------------|
| [mm] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [mm ²] | [kg/m] | [N/mm ²] | [%] | [kN] |
| 26.5 | 950 | 1050 | 552 | 4.33 | 205000 | 6 | 579 |
| 32 | 950 | 1050 | 804 | 6.31 | | | 845 |
| 36 | 950 | 1050 | 1018 | 7.99 | | | 1069 |
| 40 | 950 | 1050 | 1257 | 9.86 | | | 1320 |
| 47 | 950 | 1050 | 1735 | 13.62 | | | 1822 |

Tabla 5.5. Características mecánicas barras lisas

Los valores de relajación para una carga de $0.7f_{m\acute{a}x}$ durante 1000 h son inferiores al 2.5%.

Las amplitudes de tensiones $2\sigma_a$ y $2.0 \cdot 10^6$ ciclos para las barras y sus accesorios son:

| Diámetro | Barra para $\sigma_0 = 0.7f_{m\acute{a}x}$ | Tuercas y manguitos para $\sigma_0 = 0.6f_{m\acute{a}x}$ | Manguitos transición para $\sigma_0 = 0.6f_{m\acute{a}x}$ |
|-------------|--|--|---|
| [mm] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] |
| 26.5 | 180 | 80 | 80 |
| 32 | 180 | 80 | 80 |
| 36 | 180 | 80 | 80 |
| 40 | 180 | 80 | 80 |
| 47 | - | - | - |

Tabla 5.6. Fatiga

Las dimensiones de los accesorios principales son las siguientes:

| Diámetro | Tuerca esférica | | Manguito | | Placa de reparto | |
|-------------|-----------------|------|----------|----------|------------------|---------|
| | Longitud | E/C | Longitud | Diámetro | Lado | Espesor |
| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| 26.5 | 80 | 46 | 160 | 56 | 140 | 30 |
| 32 | 90 | 55 | 190 | 60 | 160 | 40 |
| 36 | 110 | 60 | 215 | 63 | 180 | 45 |
| 40 | 120 | 70 | 230 | 71 | 200 | 50 |
| 47 | 130 | 80 | 250 | 85 | 240 | 55 |

Tabla 5.7. Dimensiones accesorios

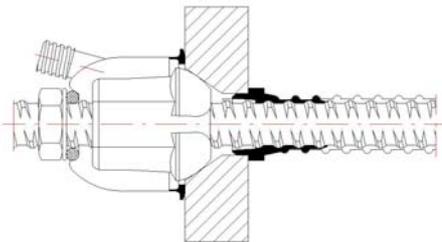


Figura 5.19. Anclaje con tuerca esférica y empalme de barras mediante manguito

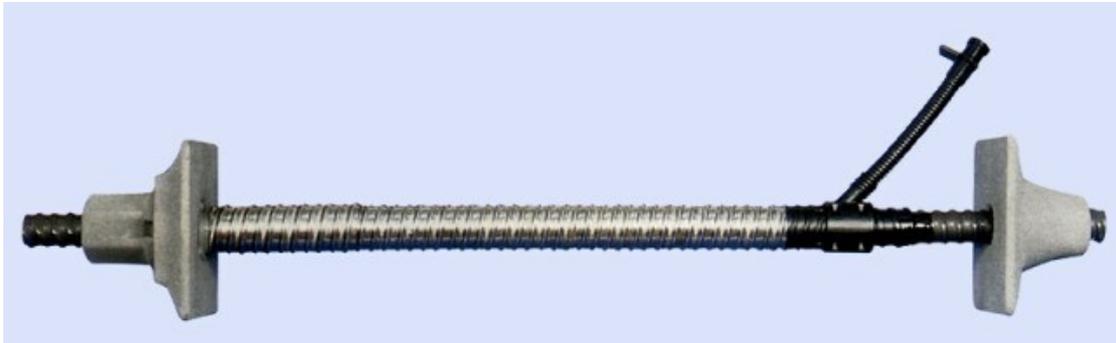


Figura 5.20. Tendón adherente activo-pasivo

5.4. SISTEMAS DE POSTESADO CON CABLE CERRADO

El cable cerrado se emplea casi exclusivamente en tirantes y péndolas de puentes o cubiertas de estadios y polideportivos. Los cables están formados por alambres redondos en el centro del mismo y rodeados por varias capas alambres en Z (desde 1 capa a más de 3) que cierran el conjunto (Ver figura 5.21).

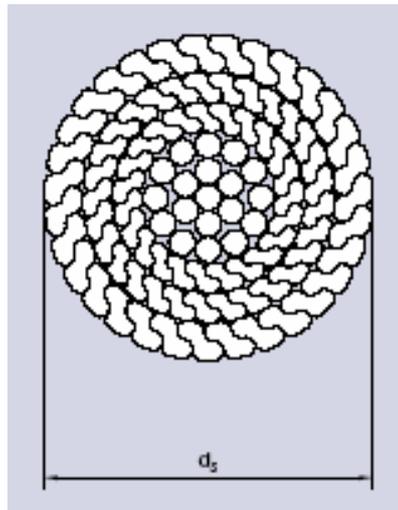


Figura 5.21. Sección transversal cable cerrado

Los diámetros (d_s) varían entre los 20 mm y los 156 mm, con cargas de rotura desde los 400 kN hasta los 27000 kN y secciones de acero desde los 254 mm² hasta los 17200 mm². Los pesos por metro varían desde los 2.45 kg/m hasta los 162 kg/m.

Los alambres que forman estos cables suelen estar autoprottegidos mediante galvanizado individual de los mismos y plastificado.

5.5. EQUIPOS.

Los equipos de uso habitual son los siguientes:

- Enfiladora (Tren de rodillos más central)
- Gato de tesado más central hidráulica
- Inyectadora

La enfiladora suele estar formada por un tren de rodillos accionado eléctrica o hidráulicamente. El tren de rodillos empuja uno a uno a los cordones dentro de la vaina. En la figura 5.22 se muestra un tren de rodillos tipo.



Figura 5.22. Tren de rodillos

Los gatos de tesado también se accionan hidráulicamente y suelen tener carreras de pistón de hasta 300 mm. Para disminuir las pérdidas por penetración de cuñas se instalan en su nariz un sistema de clavado de cuñas, que se acciona tras el tesado.

Todos los gatos deben pasar periódicamente ensayos donde se controla el rozamiento interno del mismo y la fuerza real transmitida a los cordones. También es necesario controlar la presión que entrega la central hidráulica al gato mediante manómetros patrón. En las figuras 5.23 y 5.24 se muestran distintos tipos de gatos tanto para cordón como para barra.

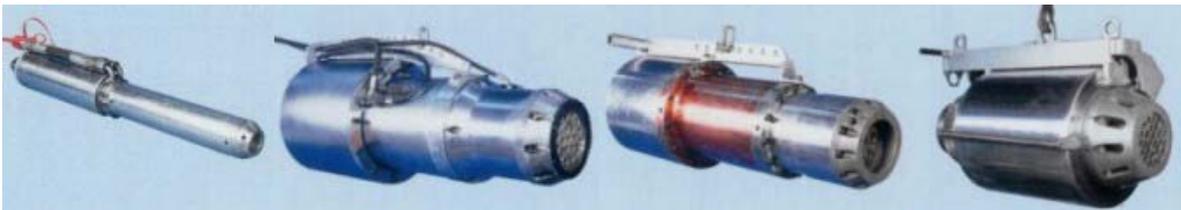


Figura 5.23. Gatos de tesado tendones de cordones



Figura 5.24. Gato hueco para tesado de barras y central hidráulica

La inyección de los tendones garantiza la durabilidad del tendón y la adherencia del cordón con el resto de la estructura, y es por tanto una operación de indudable importancia. Esta se ejecuta mediante máquinas que mezclan el agua, con el cemento y aditivos hasta formar una mezcla homogénea, que es bombeada desde los puntos bajos del tendón.



Figura 5.24. Inyectadora tipo

Por último respecto a los equipos, resaltar la importancia de que todos ellos estén fabricados conforme a la normativa europea de aparatos eléctricos o hidráulicos y que por tanto tengan su respectivo marcado CE.

5.6. DURABILIDAD. SISTEMAS DE PROTECCIÓN.

La durabilidad de una estructura en general, o de un elemento estructural como el postesado en particular, es la capacidad de mantener las cualidades mecánicas, de funcionalidad o aspecto definidas en el proyecto, para un periodo de tiempo determinado, sin que sea necesario realizar operaciones de mantenimiento y refuerzo no previstas.

Para el caso particular de los cordones o barras de postesado que nos ocupan, es necesario definir en toda estructura cómo se quiere proteger a los mismos, tanto en su zona libre, como en los anclajes y durante cuanto tiempo. Así, primero diferenciamos entre postesado adherente y no

adherente, y dentro de los no adherentes entre internos y externos para estructurar los distintos tipos de protecciones. Por otra parte se considera que un elemento es provisional cuando su vida útil es inferior a 2 años y permanente cuando supera los 2 años.

Para el caso de postesado adherente la única protección permanente posible es la inyección con lechada de cemento, que garantiza un entorno básico para las armaduras, que impide el desarrollo de la corrosión. La corrosión superficial no supone una merma en las propiedades mecánicas del elemento tensor, y sólo si está muy extendida tiene como efecto desfavorable el aumento del rozamiento a la hora de tesar. Si es motivo de rechazo que la armadura tenga zonas donde la corrosión penetre al núcleo de la misma.

Respecto a los tendones no adherentes internos la protección se garantiza enfundando la armadura con vaina lisa de PE y rellenando los huecos mediante grasa. Además al estar el tendón dentro de la estructura de hormigón, el recubrimiento de este ofrece el medio básico, que impide el desarrollo de la corrosión.

Los tendones exteriores además de la protección individual de cada armadura, ya sea cordón o barra, se protegen mediante una vaina global (resistente a los rayos UV), que a su vez puede ir inyectada de grasa, cera o lechada de cemento.

Por último, las cabezas de los anclajes deben estar siempre correctamente protegidas, bien porque quedan embebidas en la estructura o porque mediante caperuzas, convenientemente selladas, se inyectan de cera, grasa o lechada.

5.7. CALIDAD. HOMOLOGACIÓN DE SISTEMAS.

5.7.1. Control de calidad en materiales.

Los controles de calidad a realizar a los elementos que forman los tendones de postesado deben estar orientados a verificar que tanto la geometría, como las características mecánicas de cada elemento, son las especificadas en los manuales técnicos u homologaciones del sistema de postesado. Los controles geométricos muestran que la geometría de las piezas que conforman el tendón, están dentro de las tolerancias descritas por el sistema, y que por tanto durante el montaje del anclaje o de la vaina, todas acoplarán de acuerdo a lo previsto.

Para las piezas estructurales del tendón (que anclan los cordones a la estructura), además de su geometría, se controlan las características mecánicas de sus materiales, ya que su resistencia es fundamental para el buen funcionamiento de la estructura y del propio sistema de postesado.

5.7.2. Situación actual y futura de las homologaciones.

En España hoy en día no existe ningún organismo oficial, que homologue a todos los sistemas de postesado, de acuerdo a lo especificado en la UNE 41184:90 "Sistemas de postesado para armaduras postesas". Es decir no es necesario, como en otros países europeos como Alemania, Austria o Francia, que todos los sistemas de postesado que trabajan en España, pasen por un instituto u organismo oficial donde se verifique que se cumple con lo dictado en la norma UNE 41184:90.

Esta situación se va a ver alterada a partir de marzo de 2005, cuando entre en vigor en toda la Unión Europea la ETAG 013 (European Technical Approval Guideline –Documento de Idoneidad Técnica Europea, DITE) para los Sistemas de Postesado en Estructuras Pretensadas. A priori, a partir de marzo de 2005, cualquier sistema que no esté homologado según la ETAG 013, no podrá suministrar su sistema a ninguna obra en Europa. Las ETAG están editadas por la EOTA



(European Organization for Technical Approvals – Organización Europea para las Homologaciones Técnicas). La EOTA está formada por todos los países de la UE y de la EFTA, y tiene como representantes españoles al Instituto Torroja y al Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña.

Cuando entre en vigor la ETAG 013 todos los sistemas de postesado que se comercialicen en Europa habrán pasado los mismos ensayos, con los mismos criterios de aceptación y rechazo, y además revisados por todos los miembros y representantes de la EOTA.



6. PUESTA EN OBRA

6.1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales ventajas de las losas postesadas en edificación es la rapidez del ciclo constructivo. Desde el montaje del encofrado hasta la consecución de un forjado estructuralmente resistente.

Dentro de la variada tipología de forjados de hormigón “in situ” la cualidad mas remarcable de los forjados postesados desde el punto de vista de la ejecución, es el hecho de poder desencofrar y, en muchos casos, desapuntalar totalmente el forjado después del tesado de los tendones.

El tesado de la losa, que se realiza normalmente entre dos y cuatro días después de su hormigonado, es el punto clave del ciclo de construcción que marca el momento en que el forjado es útil para su servicio.

La losa, una vez tesada, no es tan solo autoportante, sino que es capaz –por lo general- de resistir las sobrecargas para las que ha sido diseñada. Esta cualidad permite apoyarse en ella para construir el forjado inmediatamente superior. Debe apuntalarse solo lo necesario para transmitir a las losas inferiores la diferencia entre las cargas de construcción y las de la sobrecarga de diseño.

Empleando sistemas y medios adecuados se pueden optimizar fácilmente los recursos consiguiendo rapidez y economía en la ejecución.

6.1.1. TENDONES ADHERENTES Y NO ADHERENTES

El uso de tendones adherentes ó no adherentes obedece más a un criterio de diseño que de ejecución. Desde el punto de vista de la durabilidad del propio tendón, ambos están protegidos contra la corrosión y son igual de duraderos.

Los tendones **Adherentes** pueden reducir la cuantía de armadura pasiva, dado que su comportamiento es mejor frente a fisuración que el de los **No Adherentes**. También, cuando es preciso concentrar tendones en poco espacio, los tendones Adherentes suelen presentar ventajas. Sin embargo, en trazados complejos es aconsejable el uso de tendones no adherentes que tienen coeficientes de fricción menores y, desde el punto de vista de la ejecución, es más sencillo y presenta menor posibilidad de errores la instalación de tendones de este último tipo.

Es frecuente la combinación de ambos tipos de tendones en la misma losa.

En forjados unidireccionales, ya sean planos ó no, se suele recurrir a tendones Adherentes en las jacentas principales, perpendiculares a los nervios ó vigas secundarias.

De igual forma, en forjados postesado bidireccionales, es corriente encontrar tendones Adherentes sobre los pilares y una malla de tendones No Adherentes en el resto de la losa.

El tendón más extendido en Edificación es el constituido por un único cordón No Adherente - **Unbonded**. Es manejable dado su poco peso y su instalación se realiza en una única etapa, sin que precise ninguna operación posterior a su tesado –salvo el corte y sellado de su cajetín:

- Colocación de anclajes y tendido del cordón **Unbonded**, previo al hormigonado.
- Tesado
- Corte de la sobre longitud de tesado del cordón y sellado de cajetines.



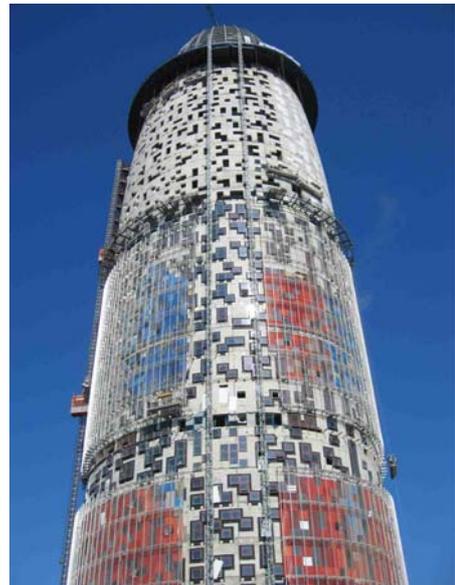
Los tendones de más de un cordón no adherente son menos comunes, aunque también se emplean. Muchos sistemas de postesado disponen de anclajes para dos y para cuatro cordones.

Para evitar zonas de discontinuidad en la losa de hormigón se desaconseja agrupar más de cuatro cordones No Adherentes juntos, por ello no es corriente el uso de anclajes mayores.

Los tendones adherentes más comunes en edificación emplean vaina corrugada plana metálica ó de plástico. Los anclajes, al igual que la vaina, suelen ser también planos para permitir la máxima excentricidad en el trazado del tendón y economizar, así, acero de postesado.

Este tipo de tendones precisa una manipulación mayor que la necesaria en los No Adherentes:

- Colocación de vaina y anclajes
- Enfilado de cordones en el interior de las vainas, previo al hormigonado.
- Tesado
- Corte de las sobre longitudes de tesado de los cordones y sellado de cajetines.
- Inyección de lechada de cemento.



6.1.2. CICLO CONSTRUCTIVO

1. Tendones No Adherentes.

- Montaje del encofrado, aligeramientos externos, tapes laterales y plataformas de trabajo.
- Montaje de anclajes de postesado en tapes laterales.
- Ferrallado de parrilla inferior, capiteles, vigas de borde y sillas de soporte de tendones
- Desenrollado, tendido y amarre de los tendones
- Ferrallado de parrilla superior
- Hormigonado

- Curado
 - Desencofrado de tapes laterales
 - Tesado
 - Desapuntalamiento losas inferiores, desencofrado, retirada de encofrado y apuntalamiento.
 - Corte de sobre-longitudes de tesado de cordones y sellado de cajetines.
2. **Tendones No Adherentes.**
- Montaje del encofrado, aligeramientos externos, tapes laterales, anclajes y plataformas de trabajo.
 - Ferrallado de parrilla inferior, capiteles, vigas de borde y sillas soporte de vainas.
 - Tendido y amarre de las vainas planas
 - Ferrallado de parrilla superior
 - Enfilado de cordones
 - Hormigonado
 - Curado
 - Desencofrado de tapes laterales
 - Tesado
 - Desapuntalamiento de losas inferiores, desencofrado, Retirada del Encofrado y apuntalamiento.
 - Corte de sobre-longitudes de tesado de cordones.
 - Sellado de cajetines.
 - Inyección de lechada de cemento en losas inferiores.

El ciclo constructivo puede tener mayor o menor duración dependiendo de la tipología del forjado y la complejidad de su encofrado.

A título de ejemplo, la duración del ciclo constructivo completo de un forjado de 1400 m² de complejidad media es de aproximadamente 14 días naturales, que incluyen de 8 a 10 días hábiles y 4 días de curado mínimo. El rendimiento obtenido, en el forjado anterior, fue de 2800 m² semanales con 2 juegos completos de encofrado, un único equipo de Encofradores, un único equipo de Ferrallistas y un equipo auxiliar.

6.2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

6.2.1. ENCOFRADOS

Al igual que ocurre con la construcción de forjados no postesados, la elección del sistema de encofrado es primordial para obtener buenos rendimientos de construcción a un coste razonable.

Los encofrados para losas de forjados postesados son los mismos que se emplean para la ejecución de cualquier otro forjado y depende de su tipología. No obstante, es importante considerar soluciones que tradicionalmente se descartan por su precio en aras a un mayor rendimiento aprovechando el breve tiempo que transcurre entre el hormigonado de la losa y su desencofrado, junto con la ausencia ó el escaso volumen de apuntalamiento.



El mejor rendimiento constructivo se obtiene en forjados con losas bidireccionales planas. Donde se sacrifica un ligero aumento de material por una mayor rapidez y sencillez de todos los trabajos, incluido el encofrado.

Pero es habitual postesar forjados aligerados con casetones recuperables ó de hormigón prensado.



6.2.1.1. Encofrado tradicional

El encofrado tradicional a base de tableros y puntales es perfectamente viable para encofrar losas postesadas y, de hecho, es el más empleado en edificios medianos y pequeños.

Hoy por hoy, el inconveniente que puede presentar este tipo de encofrado es la necesidad de disponer de buenos encofradores en obra, capaces de sacar buenos rendimientos al sistema con seguridad.

Debe cuidarse en extremo la realización de una plataforma de trabajo, segura, en el perímetro de la losa. La plataforma, que por lo general vuela fuera de la superficie del forjado inferior, debería tener un metro, pero como mínimo 80 cm para permitir el tesado de los anclajes con el gato.

La plataforma debe permanecer hasta que se corten las sobre longitudes de tesado y se sellen los cajetines ó hasta que finalice la inyección de lechada en el caso de losas con tendones adherentes.

La condición fundamental que debe observarse en el uso de encofrados tradicionales es la seguridad. Una plataforma de trabajo propicia que sea cargada inadecuadamente con ferralla ó los cordones de postesado y entorpece el acceso de la grúa a los cargaderos de los forjados inferiores.

6.2.1.2. Mesas

Las mesas constituyen una excelente opción de encofrado si pueden adaptarse a la morfología del edificio y el rendimiento permite rentabilizarlas.

Su mayor ventaja es la facilidad de uso y el gran rendimiento de encofrado que puede obtenerse.

Son muy comunes en los países del Norte de Europa y en Estados Unidos, su empleo es seguro y pueden desplazarse y montarse con poco personal dentro del forjado. Existen perchas que permiten extraer con la grúa las mesas desde forjados inferiores.

Las mesas permiten realizar plataformas de trabajo voladas muy estables.

No obstante, cuando se trabaja en sótanos ó aparcamientos debe dejarse hueco para poderlas retirar después de hormigonar el forjado ó emplear otro sistema en esos casos.

Entre pilares, salvo que la mesa disponga de encajes abatibles, debe recurrirse a sistemas ligeros de encofrado, ya sean tradicionales ó más sofisticados.

6.2.2. ARMADURA PASIVA

La armadura pasiva de las losas postesadas esta compuesta por barras corrugadas de acero B400S ó B500S ya sea en barras ó mallas electro soldadas, de las mismas características que la empleada en hormigón armado.

El armado, salvo en las partes que enunciaremos a continuación, es similar al de un forjado de hormigón armado de la misma tipología y complementa a las armaduras activas, sobretodo en lo que respecta a fisuración, especialmente importante en el caso de losas con tendones no adherentes.

6.2.2.1. Armado de capiteles

El armado de capiteles es una de las partes más complejas de ejecución en losas postesadas de poco canto.

Esta armadura previene el punzonamiento de la losa sobre el pilar, acentuado por los esfuerzos del postesado.

La armadura del capitel debe permitir el paso de los tendones. En forjados unidireccionales, los tendones de las jacenas planas que soportan la losa, y en el caso de los forjados bidireccionales el cruce de dos familias de tendones, perpendiculares entre sí.

La concentración de armaduras de ambos tipos junto con los recubrimientos mínimos que deben respetarse hace casi imprescindible la realización de un plano que permita ver que elementos entran en conflicto.

Debe respetarse:

- Cuantías y geometría de la armadura pasiva.
- Trazado de los tendones de la armadura activa respetando la excentricidad necesaria.
- Recubrimientos mínimos por durabilidad y contra el fuego.

En algunos casos es preciso descolgar el capitel del forjado, solución que debe intentar evitarse para facilitar la puesta en obra.





6.2.2.2. Armadura de refuerzo de anclajes

Tras los anclajes de postesado, ya sean activos, pasivos exteriores, ó pasivos embebidos debe disponerse una armadura específica de refuerzo, capaz de absorber por confinamiento la presión que ejercen los anclajes y capaz de absorber las tracciones perpendiculares al eje del tendón que se generan en esa zona.

Los anclajes de postesado concentran su fuerza en una zona reducida de hormigón que es preciso reforzar recurriendo a dos mecanismos.

Confinando el hormigón tras el anclaje en una jaula de armadura pasiva que permite aumentar sus prestaciones y una serie de cercos transversales que absorben la tracciones perpendiculares al eje.

La mayoría de sistemas de postesado informan sobre la cuantía y disposición de dicha armadura de refuerzo. No obstante, aunque en los anclajes para forjados postesados esa armadura de refuerzo se resuelve con barras de diámetro entre 8 y 12 mm, se debe simplificar dicha armadura combinándola con la de la propia losa en aras a facilitar su colocación.

Es importante comprobar en obra la existencia de dicha armadura, su profundidad y la separación al anclaje.

En algunos catálogos de fabricantes de sistemas se indica una separación mínima entre anclajes. Esas separaciones normalmente obedecen a la utilización de anclajes aislados en contornos predeterminados. Los anclajes pueden juntarse hasta tocarse entre sí, si se estudia la zona y se arma convenientemente.

6.2.2.3. Sillas

Las sillas son el elemento que permiten amarrar un cordón ó tendón a una distancia determinada del fondo del encofrado.

Estas sillas pueden ser comerciales, de plástico o de acero con separadores plásticos en sus patas, o bien pueden realizarse en obra con ferralla.

6.2.3. ARMADURA ACTIVA

La armadura activa trabaja únicamente a tracción y esta constituida por todos los elementos que forman los tendones de postesado.

Básicamente esta constituida por un cordón de acero que sigue un trazado predeterminado por el interior de la losa y que es capaz de deslizarse libremente siguiendo dicho trazado.

El cordón dispone de terminales en sus extremos –**anclajes**, capaces de retener el cordón evitando su deslizamiento cuando son accionados.

Se introduce una fuerza en el cordón al deformarlo longitudinalmente de forma impuesta, mediante un gato hidráulico y se mantiene dicha deformación accionando el anclaje cuando se retira el gato. El cordón, al intentar recuperar su longitud original –más corta- ejerce una fuerza activa contra la estructura a través de sus anclajes y de las desviaciones de su trazado.

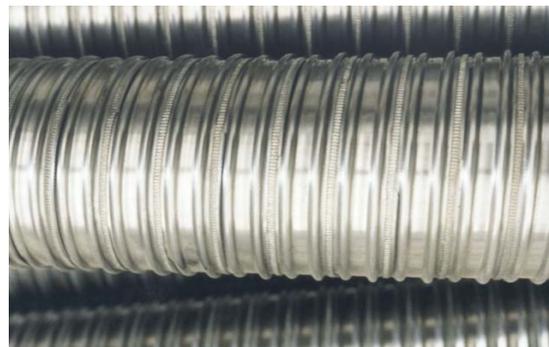
6.2.3.1. Cordón de acero de pretensado

Es el elemento principal del tendón y es capaz de almacenar la fuerza que le ha aplicado un gato hidráulico y aplicarla a la estructura.

Se ha descrito en capítulos anteriores y se utiliza básicamente en tres diámetros: 0,5" (13 mm), 0,6" (15,2 mm.) y 0,62" (16 mm.) y debe satisfacer las especificaciones de la norma EN 10138-3.

En postesado, en nuestro país, se emplea usualmente el cordón de 15,2 mm y en ocasiones el de 16 mm, el cordón de 13 mm ha quedado relegado casi exclusivamente a prefabricados.

Su suministro es en bobinas de aproximadamente 2,5 a 3 toneladas de peso y diferenciamos entre cordón de acero desnudo para tendones no adherentes y cordón de acero **unbonded**, engrasado y plastificado, para tendones no adherentes.



6.2.3.2. Vaina

Es el conducto que se embebe en el hormigón de la losa, por el interior del cual discurren y deslizan los cordones de pretensado.

La Vaina en los cordones unbonded es su propia funda de plástico. Funda que no se adhiere al cordón debido a la grasa que cubre su hueco interior y que tiene una adherencia pobre contra el hormigón debido a su superficie lisa.

En los tendones para losas postesadas de edificación, la vaina es corrugada y plana. Corrugada para garantizar una buena adherencia al hormigón de la losa y al cordón. La adherencia contra el cordón se consigue una vez ha sido tesado y posteriormente inyectado con lechada de cemento.

La vaina es plana para permitir la excentricidad máxima posible en el trazado del tendón.

Se emplean vainas corrugadas planas metálicas y de plástico. La más común es la vaina metálica de acero.

Existen, por lo general, vainas planas para 4 y 5 cordones, son ligeras para facilitar su colocación, pesando menos de 400 gramos por metro lineal. Se suministran en tramos de 6 m. con empalmes en sus extremos.

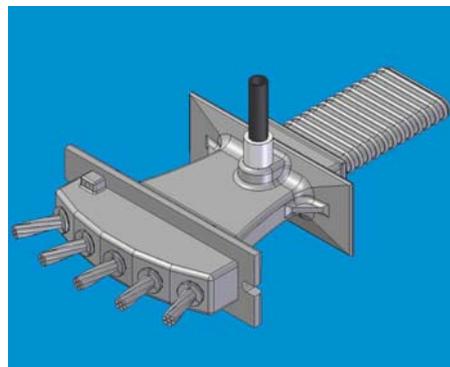
Su colocación es manual, se apoya en las sillas de materializan el trazado y se amarra a ellas con alambre.

6.2.3.3. Anclajes

Son los terminales del tendón y son capaces de retener el cordón en su estado de deformación y transmitir la carga de los cordones a la estructura.

Existen diversos tipos de anclajes para tendones de cordón de pretensado en edificación.

- **Activos**, los que asoman al exterior de la losa y permiten el tesado del cordón mediante un gato hidráulico –Comúnmente se conoce como activos a los anclajes donde desea aplicarse la fuerza del gato.
- **Pasivos**, los que son capaces de retener la fuerza que ejerce el cordón en el extremo del tendón opuesto al extremo donde se aplica el gato y son susceptibles de quedar embebidos en el hormigón sin menoscabo de sus prestaciones. También se conoce como anclaje pasivo a los anclajes activos donde no se va a aplicar la fuerza del gato.
- **Pasivos semiadherentes**, son anclajes pasivos que precisan de una cierta longitud de adherencia del cordón desnudo contra el hormigón de la losa para retener y transferir la fuerza del tendón.
- **Empalmes**, anclajes que se sitúan en una junta de hormigonado. Actúan como activos en el tesado de una porción de losa hormigonada a los que posteriormente se les empalmara otro tendón. Durante el tesado del tendón de continuidad empalmado a posteriori esos anclajes trabajan como pasivos.
- **Anclajes intermedios**. Son anclajes activos que trabajan igual que un empalme, pero donde los cordones no se han interrumpido.



Los anclajes más comunes empleados en edificación son:

- Anclajes para tendones Unitarios No Adherentes
- Anclajes para tendones No Adherentes de 2 cordones. (No generalizado)
- Anclajes para tendones No Adherentes de 4 cordones.
- Anclajes para tendones Unitarios Adherentes (No generalizado)
- Anclajes para tendones Adherentes de 4 cordones.
- Anclajes para tendones Adherentes de 5 cordones.

6.2.3.4. Accesorios

Con el fin de facilitar la puesta en obra de los tendones y anclajes, existen diversos accesorios que permiten fijar el anclaje al tape del encofrado, encofrados de los cajetines de tesado, tomas de inyección, tubos de inyección, sillas de plástico.

6.2.4. EQUIPOS DE POSTESADO

6.2.4.1. Enfiladoras

Es el equipo que permite movilizar un cordón de postesado de forma mecánica

Consiste en un tren de rodillos accionado mecánicamente o hidráulicamente que impulsa un cordón desenrollándolo de su devanadora introduciéndolo en la vaina de su tendón correspondiente.

A la acción de introducir un cordón en su vaina se la conoce con el nombre de Enfilar.

6.2.4.2. Bancadas y Enrolladoras

Los tendones no adherentes se prefabrican con anterioridad a su colocación en obra. El prefabricado puede tener lugar en una parte destinada a tal fin en la misma obra, o en el taller del sistema de pretensado empleado.

La prefabricación puede incluir:

- Precorte e identificación de cordones
- Premontaje del anclaje pasivo
- Preclavado o extrusionado del anclaje pasivo
- Enrollado del cordón o tendón prefabricado
- Embalaje en transportadoras de cordón

El precorte se realiza en bancadas longitudinales que garanticen la longitud de corte.

El preclavado se realiza con gatos hidráulicos y es aconsejable en anclajes pasivos basados en cuñas.

El extrusionado se realiza con gatos hidráulicos en anclajes pasivos basados en terminales de extrusión.

El enrollado se realiza en enrolladoras motorizadas.

Las bobinas con cordones prefabricados se pueden acopiar y transportar en transportadoras de cordón.

6.2.4.3. Gatos y Centrales Hidráulicas

Los anclajes de postesado para edificación están diseñados, en su mayoría, para ser tesados exclusivamente con gatos unitarios. La individualidad de los cordones en los tendones no adherentes y la sección plana de la vaina de los tendones adherentes, que evita la posibilidad de cruces, favorece el uso de gatos unitarios de poco peso.

Un gato unitario pesa en torno a los 25 Kg. y es suficientemente manejable para que un hombre solo pueda utilizarlo. No obstante, siempre es aconsejable que se turnen un par de operarios en dicho trabajo.

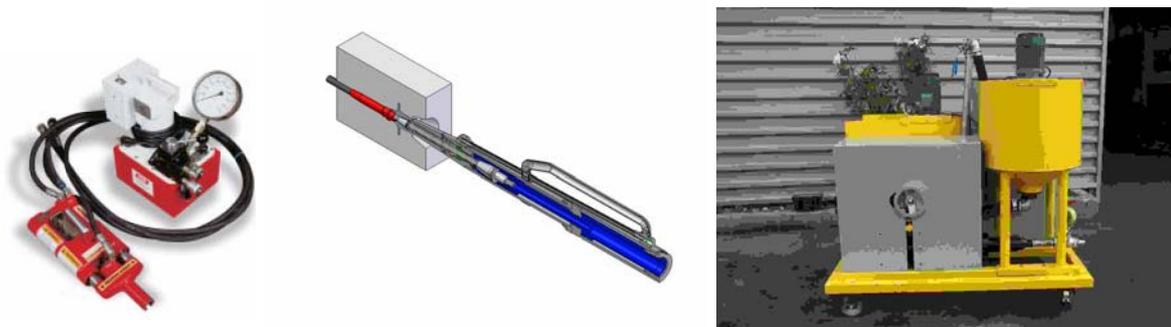
Los gatos deben disponer de un sistema de clavado de cuñas que permita la transferencia de carga del gato al anclaje con una pérdida de penetración mínima.



También es aconsejable que el gato clave cuñas de forma automática después de realizar el tesado. De este modo se evitan olvidos al tratarse de un trabajo repetitivo.

Las centrales hidráulicas son las maquinas que proporcionan energía hidráulica al gato de tensado y deben ser compatibles con este.

La fuerza de tesado que aplica el gato es directamente proporcional a la presión hidráulica que le transmite la central. La central dispone de un manómetro hidráulico que mide la presión que se aplica al circuito y nos indica la fuerza a la que estamos tensando.



6.2.4.4. Batibombas de Inyección

La bondad del tesado de un tendón Adherente depende en gran medida de que la inyección de lechada de cemento, que proporcionará la adherencia necesaria entre el tendón tensado y la estructura, se realice correctamente.

Las batibombas de inyección mezclan el producto a inyectar, agua, cemento y aditivos y lo impulsan mediante una tubería al interior del tendón.

6.3. INSTALACIÓN

6.3.1. ENCOFRADO

El encofrado se monta según las instrucciones del fabricante de igual forma que en un forjado de hormigón armado convencional. Si es aconsejable, preparar los tapes de forma que puedan reutilizarse sin error en el mayor número de plantas posible con el orificio de alojamiento del anclaje practicado.

Es aconsejable, también, marcar el encofrado con las calles de paso de tendones con el mismo código de colores que identifica los cordones.

Esta simple operación facilita en gran manera la puesta en obra de los tendones y evita errores.

6.3.2. ARMADURA PASIVA

Deben observarse los mismos cuidados que en cualquier obra de hormigón armado o postesado.

Aquí es importante asegurar la correcta colocación de las sillas de soporte de la armadura activa, las armaduras de refuerzo en torno a los anclajes y las armaduras especiales en puntos singulares como capiteles y huecos.

6.3.3. ARMADURA ACTIVA

Para que el postesado sea efectivo debe seguir el trazado marcado en el proyecto. Este trazado sinusoidal busca, por lo general, el punto más bajo posible en el centro de los vanos y el más alto a su paso por pilares o jacenas.

- **Tendones no adherentes**

Hoy en día existen dos tendencias de diseño, ambas totalmente validas. La forma de diseño mas clásica precisa que el tendón describa su trazado correctamente y debe, por tanto amarrarse adecuadamente en los puntos clave del trazado; puntos altos, bajos e inflexiones y amarrarse cada metro entre dichos puntos, observando que el trazado sea correcto a buena vista.

La tendencia actual aboga por dejar caer el tendón libremente, su curvatura natural se ajusta bastante al trazado parabólico ideal y el montaje es mucho más sencillo. Se disponen longitudes rectas mayores en puntos altos y bajos eliminando muchas interferencias con la armadura pasiva de la losa. La cuantía de postesado es algo mayor pero el ahorro de tiempo lo justifica.

Se amarra los tramos rectos inferiores cada 3 metros y los superiores se amarran a la parrilla superior pescando el cordón desde la misma.

El cordón llega a la planta precortado y enrollado en bobinas individuales identificadas por colores.

Se desenrolla manualmente dejándolo caer en las sillas que generan el trazado siguiendo la alineación marcada en el encofrado.

Se corta la funda de ambos extremos y se introduce el cordón en su anclaje que se ha fijado previamente a los tapes de encofrado.

Cuando el cordón ha atravesado el anclaje se le vuelve a colocar el trozo de funda retirado para protegerlo hasta su tesado.

Tendones adherentes.

En este caso si es preciso colocar sillas. Se depositan las vainas en tramos de 6 metros sobre su trazado y cuando la alineación es completa se empalman y se sellan las uniones con cinta. Se introducen los extremos en las trompetas de los anclajes que ya han sido fijadas a los tapes y se procede a amarrar la vaina a las sillas y la ferralla. Es importante comprobar que la vaina no hace ningún gesto extraño ni quiebro.

A continuación se procede al enfilaro de los cordones desde el exterior de los anclajes a mano o utilizando una enfiladora.

El tendón discurre por encima de la losa curvándose en la plataforma de trabajo hasta que se introduce en el anclaje.

Es conveniente enfilar antes de hormigonar, pero si ello no fuese posible por plazos, es posible enfilar únicamente un cordón de cada tendón y después del hormigonado, en el tiempo de curado el resto.

6.3.4. HORMIGONADO

Durante el hormigonado debe tenerse la precaución de vibrar adecuadamente detrás de los anclajes para evitar que aparezcan coqueras.

También debe extremarse el cuidado de no desplazar las vainas o los tendones y evitar que floten los aligeramientos, si se han empleado aligeramientos de porexpan.



6.3.5. TESADO

Cuando se alcanza la resistencia necesaria en el hormigón y la dirección de obra lo autoriza se procede al tesado. Se retiran los tapes y los accesorios de fijación de los anclajes y se montan sus cuñas. En la mayoría de anclajes de más de un cordón, en tendones adherentes, se monta también la placa de anclaje que suele ser independiente de la trompeta.

Se marcan las sobre longitudes de los cordones con pintura y se procede al tesado. Introduciendo el gato, aplicando la presión necesaria y finalmente clavando.

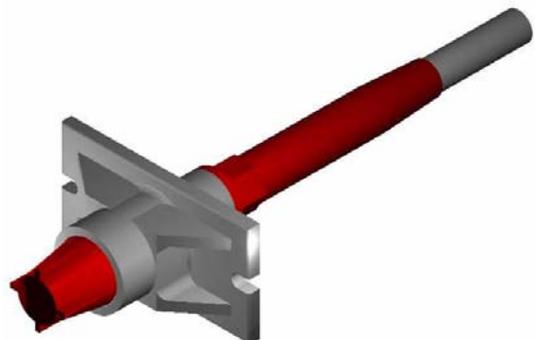
El orden de tesado debe haberse preestablecido con el proyectista. Por lo general se intenta poner en carga la losa de una forma centrada alternando cordones y laterales.

La pintura facilita reconocer que cordones han sido tesados y orienta sobre el alargamiento del tendón que sirve como comprobación de que la operación ha sido correcta.

6.3.6. DESCIMBRADO Y DESAPEO

Por lo general las losas se desapean solas después del tesado. Después del tesado se puede proceder inmediatamente al descimbrado y retirada de puntales. Es importante dejar los puntales que el proyectista haya estimado oportuno en cada fase de construcción.

Es importante observar que si una losa tiene un peso propio de 500 Kg/m² y esta diseñada para una sobrecarga de 500 Kg/m². Un forjado puede apearse sobre el inferior sin puntales al resto de losas inferiores, lo que constituye la mejor prueba de carga para la estructura y un ahorro en volumen de puntales y encofrados.



6.3.7. SELLADO DE CAJETINES E INYECCIONES

Una fase importante durante la construcción de la losa es el aprobado de la operación de tesado.

Se medirán sobre embolo del gato el alargamiento de porcentaje acordado de cordones y se medirán también las marcas de pintura en las sobrelongitudes de los tendones tesados.

El alargamiento medido sobre marcas de pintura no es preciso, como tampoco es relevante el alargamiento de tendones cortos. No obstante si es indicativo de un proceso constante y un orden de magnitud que sirve para contrastar la bondad de la actuación y detectar problemas.

Corresponde a la dirección de obra aprobar el tesado analizado por el Jefe de Obra de la constructora y de la empresa suministradora de los anclajes que realiza el tesado.

Una vez aprobado el tesado se pueden cortar los cordones a una longitud entre 2 y 4 cm. exterior a la cuña de los anclajes.

Se procede al sellado de cajetines y a la inyección de la lechada de cemento.

No es preciso inyectar la losa que se acaba de tensar. Se puede dejar sin inyectar hasta 4 semanas.

Si es preciso inyectar cada semana los tendones de plantas inferiores para liberar tajos.

6.4. PUNTOS SINGULARES

6.4.1. HUECOS Y ESCALERAS

La mayoría de tendones de postesado se pueden desviar para salvar huecos de escaleras y otros huecos en general. No obstante es habitual que algún anclaje, activo o pasivo, vaya a parar a los laterales de dichos huecos.

Podemos encontrar puntos en que el postesado circundante tenga la tendencia a abrir y desgarrar el hueco. Es preciso disponer los tendones de forma que esto no ocurra ó se minimice. También, es necesario disponer armadura pasiva que resista las tensiones del desgarre.

6.4.2. JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN

Las juntas de construcción se resuelven con anclajes tipo Empalme ó intermedios. Este tipo de anclajes permiten el tesado de la primera fase hormigonada y dar continuidad al tendón en la siguiente fase.

Las juntas estructurales entre forjados deben preverse a priori para dejar los anclajes a una cota determinada que no interfiera con los pernos de anclajes de dichas juntas.

6.4.3. TALADROS A POSTERIORI

Quizás uno de los mayores handicaps del postesado en edificación es la posibilidad de dañar un tendón cuando se realizan taladros en los forjados durante la vida útil del edificio.

No se conoce ningún colapso ni daño grave en edificios postesados por esta causa. Si el tendón dañado es no adherente el tendón se pierde completamente y su reparación, aunque fácil es muy costosa. Si el daño es en un tendón adherente se produce una discontinuidad en el postesado.

Se recomienda extremar el cuidado en el replanteo de los tendones para identificar en el futuro que zonas son susceptibles de ser taladradas. También se recomienda instalar una placa en el edificio que recuerde la prohibición de taladrar los forjados sin consentimiento del Arquitecto. Otra buena practica y hacer referencia a la prohibición en los contratos de venta ó arrendamiento.

7. REALIZACIONES

7.1. SEDE DE LA OFICINA DE ARMONIZACION DEL MERCADO INTERIOR (O.A.M.I.) EN ALICANTE

7.1.1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

El edificio que alberga la Sede Definitiva de la Oficina de Armonización del Mercado Interior, está situado en las afueras de la ciudad de Alicante, en el emplazamiento de Agua Amarga frente al mar.

El edificio tiene tres plantas de aparcamiento, bajo rasante, que ocupan un total de 16000 m². Sobre rasante el conjunto está formado por un módulo principal, de seis plantas, y otros dos módulos anexos, de sólo dos plantas, destinados a oficinas y otras actividades diversas, que ocupan un total de 15500 m².



Figura 1. Vista general del edificio.

La solución estructural adoptada presenta algunas singularidades interesantes.

En primer lugar, los edificios ubicados sobre rasante se han resuelto mediante soluciones pretensadas. Las distintas plantas del módulo principal, que presentan una gran diafaneidad con luces de 15.0 x 7.2 m², están resueltas mediante un forjado bidireccional de casetones recuperables y pretensado con tendones no adherentes en la dirección de mayor longitud. Los dos edificios auxiliares, con luces y voladizos importantes, están resueltos mediante vigas de hormigón



pretensado con armadura adherente sobre las que se apoya un sistema de losas de hormigón armado.

En segundo lugar, tanto las plantas situadas sobre rasante del módulo principal, con una dimensión máxima de 170.0 m de longitud, como la planta baja y las situadas bajo rasante, cuyas dimensiones máximas son de 170.0 m por 70.0 m, se han proyectado sin juntas de dilatación.

Por último, el edificio se ubica en una zona de sismicidad importante, con un valor de aceleración básica de 0.13.g, lo que implica la disposición de un sistema estructural destinado a absorber los esfuerzos derivados de la acción sísmica. Este sistema estructural está compuesto por pantallas de hormigón armado.

7.1.2. SOLUCION ESTRUCTURAL

En este edificio se han utilizado dos sistemas de pretensado diferentes: tendones monocordón no adherentes y cables multicordones adherentes con vaina circular.

El edificio principal, sobre rasante, tiene una planta trapezoidal de dimensiones medias 155.0 x 16.0 m². Estas plantas se apoyan en dos alineaciones de pilares, situadas en los bordes del edificio paralelos a la dimensión larga y configurando una cuadrícula de 15.0 x 7.2 m², y en las pantallas extremas de los testeros, e intermedias, correspondientes a los núcleos de circulación vertical.

Para conseguir la máxima diafaneidad, la solución estructural adoptada está constituida por un forjado reticular de 40+5 cm de canto total, pretensado con tendones no adherentes, en la dirección de mayor luz y armado, en la dirección perpendicular de menor luz. La relación canto luz resultante es de 1/34 (Figura 3).

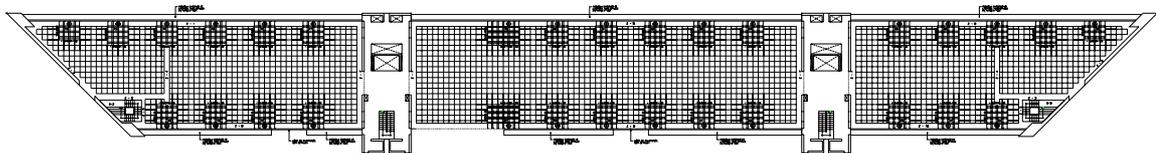


Figura 2. Planta tipo del edificio principal sobre rasante. Solución estructural adoptada.



Figura 3. Vista del forjado reticular con cables monocordón.

Todas estas plantas se proyectaron para una carga total de 11.2 kN/m^2 , correspondiente a 6.50 kN/m^2 peso propio, 1.67 kN/m^2 de solado y 3.00 kN/m^2 de sobrecarga de uso. El diseño del pretensado se ha realizado para compensar un 80 % de la carga permanente dado que la sobrecarga es de magnitud moderada.

Debido a la disposición de los pilares en los bordes del forjado, éste trabaja fundamentalmente en una dirección, la de mayor luz.

La solución adoptada permite disponer un canto suficiente y, al mismo tiempo, con un peso propio mínimo. El pretensado ubicado en la dirección de mayor luz compensa los mayores esfuerzos.

Los nervios del forjado están separados 0.80 m entre sí. En cada nervio se disponen dos tendones monocordón no adherente de $0.6''$ con un trazado parabólico.

El análisis estructural se ha llevado a cabo con un modelo de emparrillado espacial, utilizando el programa STATIK3 de Cubus AG.

El efecto vertical del pretensado se ha tenido en cuenta utilizando unas cargas equivalentes que se sitúan en cada nervio, representando la disposición real de la armadura activa.

El efecto horizontal del pretensado se ha considerado sólo para tener en cuenta su influencia sobre los pilares pero se ha despreciado a los efectos del comportamiento del forjado. Este criterio, que resulta del lado de la seguridad, se justifica si se tiene en cuenta la incertidumbre que supone considerar el efecto horizontal del pretensado en el forjado porque es un valor que depende directamente de la rigidez de los pilares y del resto de los elementos que constituyen el soporte vertical del forjado.

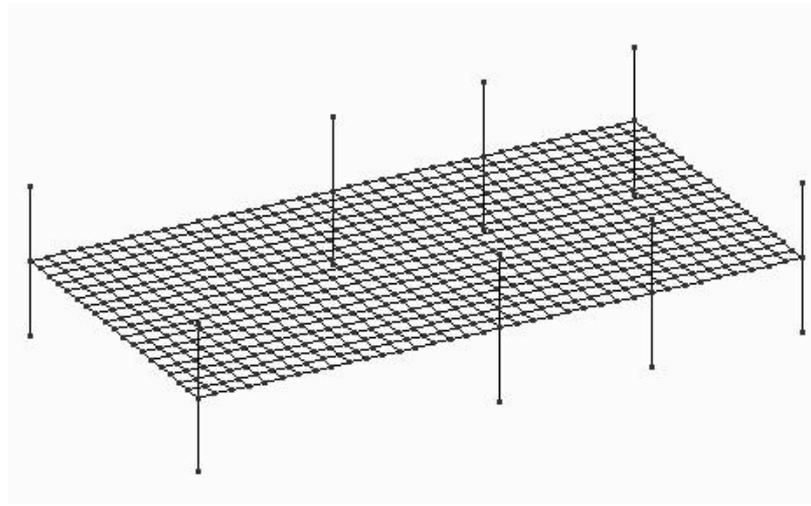


Figura 4. Modelo correspondiente a una zona del forjado del edificio principal.

El forjado se ha proyectado con un hormigón de resistencia característica a 28 días de 30 Mpa.

El tesado de los cables se realizaba cuando el hormigón alcanzaba una resistencia de 20 MPa, lo que se producía a los dos o tres días después de hormigonado.

Para la comprobación de los Estados Límite correspondientes, el efecto del pretensado considerado es el que se obtiene con el modelo de cargas equivalentes indicado y para un valor del pretensado igual al inicialmente introducido en los anclajes deducidas las pérdidas correspondientes, en cada caso.

A los efectos de la comprobación del Estado Límite Ultimo debido a Flexión se ha despreciado el incremento de deformación de la armadura activa, que se produce debido a la deformación global de la estructura y el alargamiento total de cada tendón entre anclajes. Este efecto normalmente es pequeño y puede suponer incrementos de tensión de 100 MPa, aproximadamente.

El proyecto se ha resuelto con una cuantía de 2,8 kg/m² de armadura activa y 15 kg/m² de armadura pasiva.

Para la construcción de los forjados se han utilizado como encofrado unas mesas móviles, sobre la que se replanteaban los casetones y las armaduras activas y pasivas.



Figura 5. Vista general del forjado durante la construcción.

Para optimizar el uso de las mesas, el hormigonado de un forjado se realizaba sobre el anterior sin apear. Esta situación de construcción constituye la situación más desfavorable para forjados y pilares en la vida útil de la estructura.

Por un lado, el peso propio de cada forjado es mayor que la suma de las cargas muertas más sobrecarga, por lo que el estado de sollicitación es superior al estado en servicio; y, por otro lado, el esquema estructural en esa situación es mucho más flexible para el forjado y mucho más exigente para los pilares, que en la situación final cuando el edificio está totalmente construido.

Para los edificios anexos, con dos niveles sobre rasante y planta cuadrada de 26.00 m de lado se ha utilizado pretensado adherente con vaina circular.

Se trata de edificios muy diáfanos, donde las plantas están soportadas verticalmente por ocho pilares situados en el perímetro.

La solución estructural adoptada está constituida por un emparrillado de vigas de 1.00 m de canto y 0.60 m de anchura. Las vigas principales, apoyadas sobre los pilares, son postesadas y el resto, situadas en el perímetro, son armadas. Sobre estas vigas se ha dispuesto una losa de hormigón armado de 0.30 m de espesor. Las vigas forman una cuadrícula con cuatro importantes zonas voladas.

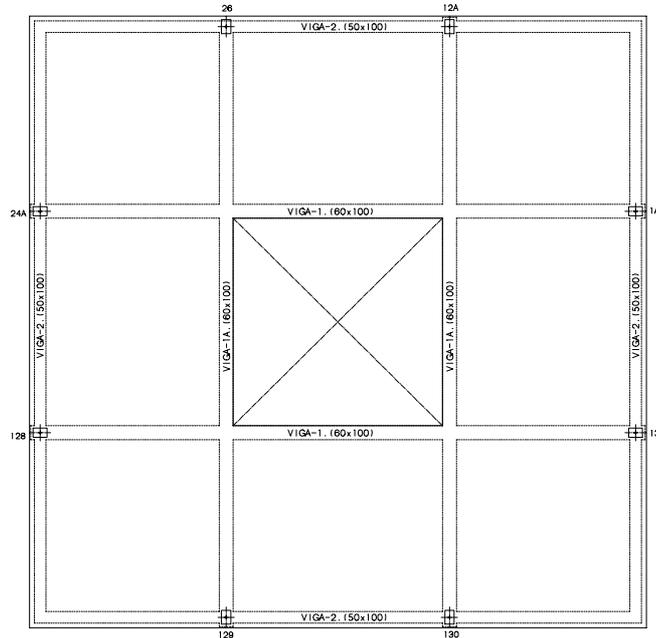


Figura 6. Planta de los edificios anexos. Solución estructural adoptada.

El trazado de pretensado de las vigas es parabólico. En cada viga se han utilizado dos cables de 22 cordones de 0.6".

Los criterios y medios utilizados para la definición del pretensado y su consideración estructural son idénticos a los descritos para los forjados reticulares. La única diferencia es la consideración especial de la adherencia de la armadura activa en la comprobación del Estado Límite Ultimo debido a Flexión. En estos edificios las características del hormigón y las armaduras utilizadas son también las mismas que para los forjados reticulares.

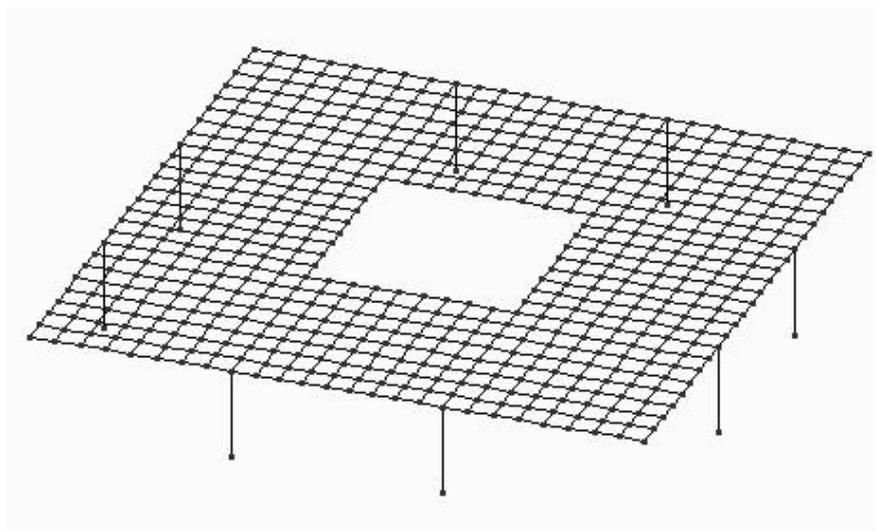


Figura 7. Modelo correspondiente a una planta de los edificios anexos.

Estos edificios se han resuelto con unas cuantías de $7,5 \text{ kg/m}^2$ de armadura activa y $22,00 \text{ kg/m}^2$ de armadura pasiva.

Para la construcción de estos edificios se ha utilizado una cimbra tradicional y el hormigonado de cada planta se ha realizado sobre la inferior apeada.



Figura 8. Vista general de una de las plantas del edificio anexo, durante la construcción.

7.2. CENTRO COMERCIAL AVENIDA DE LAS PROVINCIAS. FUENLABRADA. LOSAS POSTESADAS ADHERENTES CON VAINA OVAL



Figura 9. Vista general del edificio

7.2.1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

El edificio tiene una forma en planta semitrapezoidal, con unas dimensiones medias de 107.00 x 78.00 m. En altura consta de cinco niveles, dos de los cuales se sitúan parcialmente bajo rasante. Concebido como una edificación de uso multifuncional, el primer nivel corresponde a la zona de aparcamiento, muelles de descarga de mercancías y almacenes; en los segundo y tercer niveles se sitúa el área de uso comercial; mientras que los dos niveles superiores se dedican a uso deportivo y de ocio. La superficie total del conjunto es de 35.000 m² construidos. Estructuralmente existen cuatro forjados postesados, correspondientes a los niveles dos a cinco del conjunto. Las diferentes plantas se articulan en una malla ortogonal de 12.00 x 12.00 m² entre pilares (figura 10).

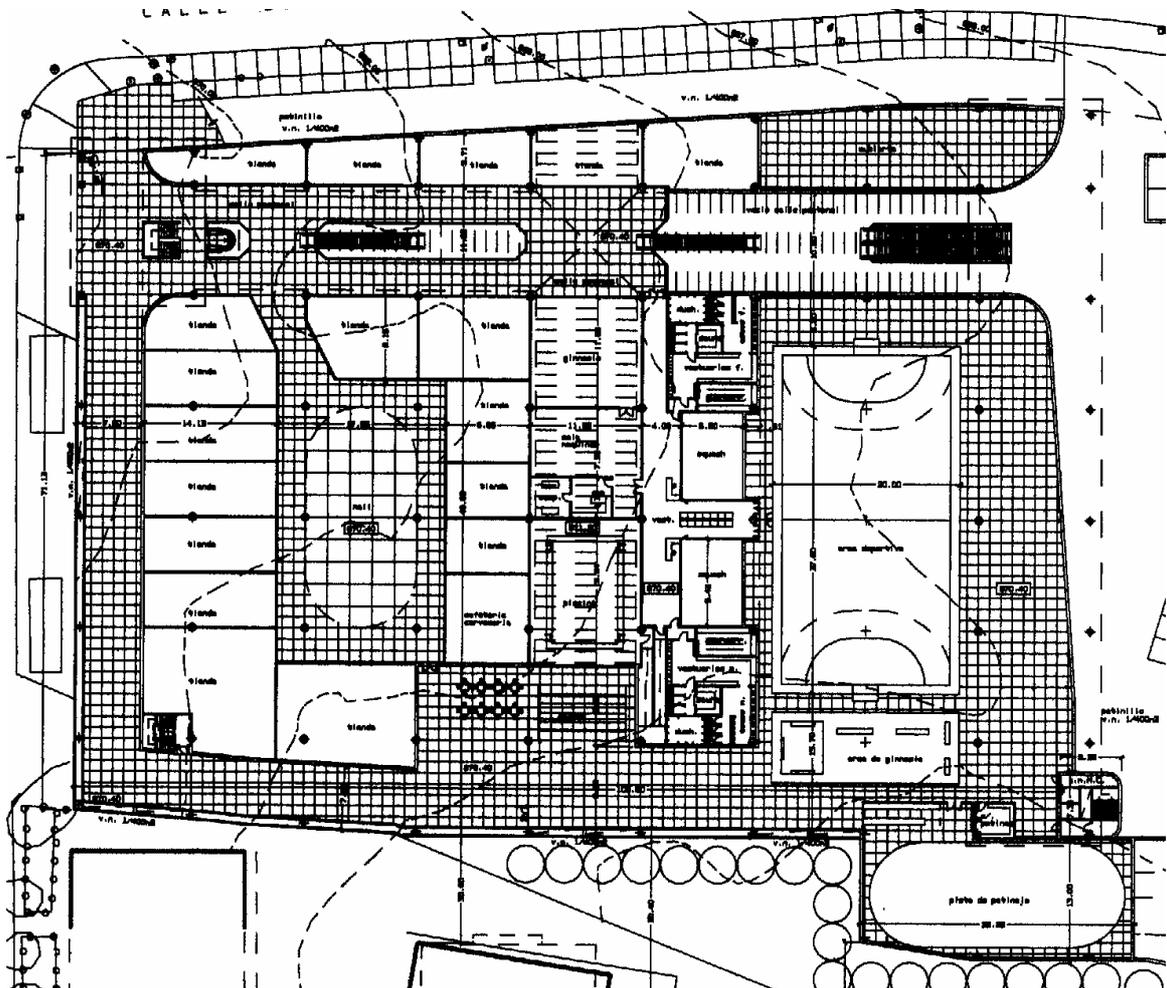


Figura 10. Planta del edificio

7.2.2. SOLUCIÓN ESTRUCTURAL

Las luces de 12.00 m, venían impuestas por necesidades arquitectónicas para optimizar la explotación del edificio. Para estas luces y con las fuertes sobrecargas exigidas, 10 kN/m^2 en las zonas de uso comercial, la solución más racional se orientaba hacia la tipología de losa maciza postesada, ya que este sistema permite minimizar los cantos y da una solución estructural, constructiva y económicamente muy interesante.

Una vez escogida la solución pretensada, se plantea la disyuntiva entre el sistema de pretensado no adherente o pretensado adherente con vaina oval, lo que exige efectuar un estudio comparativo de ambas soluciones. El primer sistema tiene la ventaja de no requerir inyección posterior al tesado, con las facilidades de ejecución que esto supone; sin embargo, con este sistema, en Estado Límite Último sólo se puede disponer de la tensión media de pretensado en servicio más un cierto incremento, compatible con la deformación global entre anclajes. Esto puede llevar a un

incremento de la armadura activa requerida, especialmente en el caso de cargas elevadas, como ocurre con el edificio en cuestión.

En el sistema de pretensado con tendones adherentes con vaina oval se hace necesaria la inyección posterior a la operación de tesado; pero, en contrapartida, se puede disponer de una mayor capacidad resistente de la armadura activa con la consiguiente disminución de cuantías respecto del sistema anterior. El uso de la vaina oval permite obtener un brazo mecánico muy similar al que resulta con cordones no adherentes. La vaina oval presenta una gran flexibilidad y, por consiguiente, permite con facilidad abordar cualquier tipo de trazado, el enfilado resulta una operación sencilla y fácil de realizar y la inyección resulta, asimismo, muy rápida.

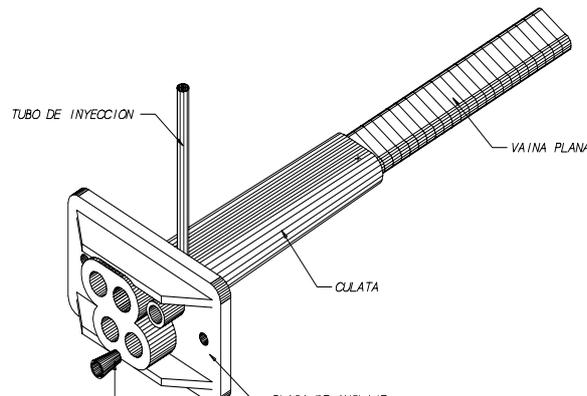


Figura 11. Características del sistema de pretensado utilizado.

Efectuado el estudio, se consideró como óptima la tipología estructural formada por losas macizas postesadas de 0.32 m de canto con tendones adherentes con vaina oval (figura 11).

Con las esbelteces resultantes y las elevadas cargas actuantes se planteó el aumento del canto alrededor de los pilares con el fin de aumentar la capacidad resistente frente a punzonamiento. El canto total de estos ábacos es de 0.55 m, es decir, se produce un descuelgue de 0.23 m bajo la losa. Teniendo en cuenta los condicionantes estéticos y funcionales del edificio, los ábacos tienen canto constante en el nivel de aparcamiento, mientras que en el resto de los niveles tiene una forma troncopiramidal (figura 12)

El postesado se realiza mediante tendones constituidos por cuatro cordones de 0,6", agrupados en una vaina oval. El ancho de la vaina es de 80 mm, y su altura de 25 mm.



Figura 12. Aspecto de los capiteles

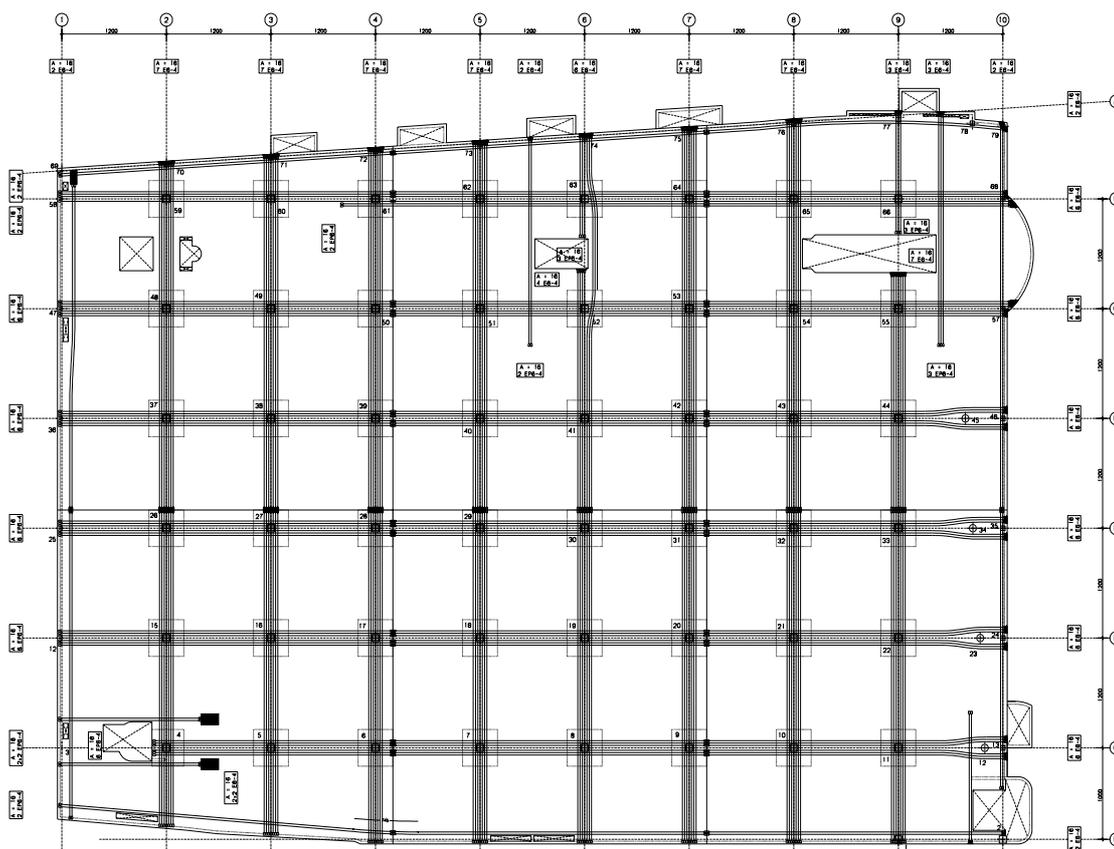


Figura 13. Distribución en planta de los tendones de pretensado del primer nivel.

La distribución en planta del pretensado se realiza de forma diferente en función de los distintos condicionantes geométricos de la planta. Para los niveles inferiores, constituidos por una malla ortogonal de pilares con luces de 12.00 m se concentran los tendones en una franja sobre los pilares (figuras 13 y 14).

La concentración de tendones en banda de pilares presenta, para la distribución en planta reseñada, diferentes ventajas sobre otras distribuciones. Estructuralmente, se ha comprobado que los tendones cercanos a los pilares son mas eficaces. Funcionalmente, la concentración de tendones permite liberar una gran parte de la losa para el paso de instalaciones. Constructivamente, se disminuye al mínimo el número de sujeciones para las vainas, lo que facilita el replanteo de las mismas.

El pretensado se agrupa en dos familias de tendones ortogonales formadas por seis tendones en dirección X y siete tendones en dirección Y. En la dirección X la armadura activa tiene menor recubrimiento y, consecuentemente, tiene un tendón menos.



Figura 14. Aspecto de la ferralla y de las vainas antes del hormigonado de la losa del primer nivel.

En las plantas de cubierta, la disposición en planta se modifica sustancialmente, pues desaparece la continuidad en una de la direcciones quedando una única luz de 12.00 m. Para esta disposición se mantiene la concentración de tendones en banda de pilares en la dirección que conserva la continuidad, y se distribuye uniformemente en la dirección ortogonal (figura 15).

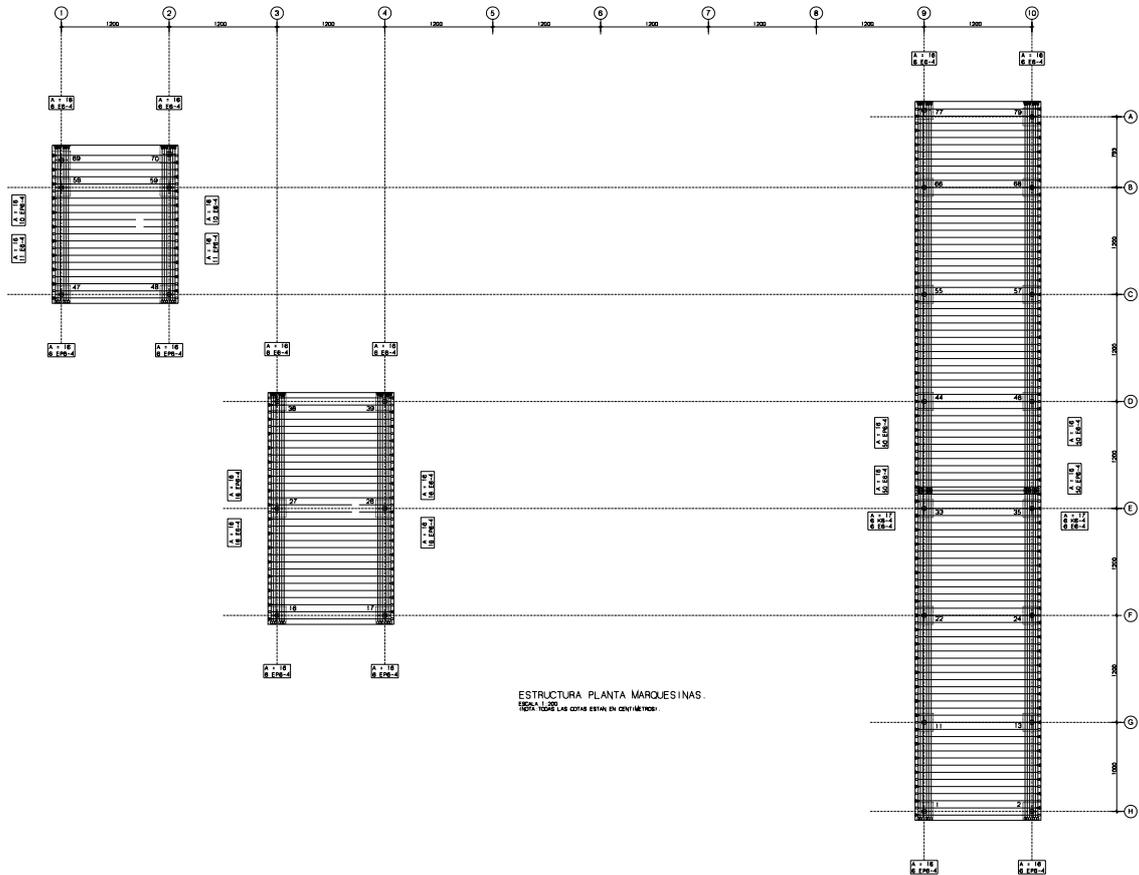


Figura 15. Distribución en planta de los tendones de pretensado en cubierta.

El trazado en alzado de los tendones se realiza mediante una poligonal compuesta de tramos rectos. Con ello se facilitan notablemente las operaciones de replanteo de los tendones, que se reducen a cuatro puntos por vano. Se trata de un aspecto importante ya que, dado el reducido canto de la losa, posibles desviaciones de ejecución pueden tener una importancia apreciable.

La cuantía de pretensado se proyectó para compensar la carga permanente de los forjados. Dada la magnitud de las sobrecargas fue necesaria la disposición de una cuantía de armadura pasiva importante.

Con el objeto de sistematizar y optimizar las operaciones de colocación de la armadura pasiva necesaria, se recurrió al uso de mallas electrosoldadas. El uso de mallas electrosoldadas permite la obtención de grandes rendimientos en el ferrallado, sistematizándose el proceso. Para ello se diseñaron unas mallas específicas, en total 16 tipos de mallas para toda la obra, que optimizaba el consumo de acero. Debido a la cantidad de armadura pasiva requerida y teniendo en cuenta las condiciones de fabricación y de colocación, cada malla tiene solo la armadura requerida en una dirección y otra de montaje en la perpendicular. Para poder disponer dos mallas en cada sección y perder el mínimo brazo mecánico, el diseño y colocación de las mallas debe ser específico.

Con el fin de poder realizar la operación de tesado en el menor plazo de tiempo después del hormigonado de la losa se consideró un hormigón de resistencia característica 30 MPa. El tesado de los tendones se realizó tres días después del hormigonado cuando el hormigón alcanzó una resistencia mayor de 20 MPa.

La edificación no presenta juntas de dilatación a pesar de sus dimensiones. En este tipo de edificios siempre es difícil resolver el problema de las juntas ya que crean incomodidades funcionales (duplicación de pilares) o inconvenientes estructurales (si se mantiene la cuadrícula de pilares la luz extrema condiciona el proyecto y si se disminuye la luz del vano extremo, se alternan las dimensiones de las cuadrículas de los pilares). También genera problemas de explotación ya que las juntas frecuentemente tienen problemas de estanqueidad y de durabilidad ya que la falta de control del drenaje del agua origina carbonatación, y a continuación problemas de oxidación de armaduras.

La existencia del pretensado puede hacer pensar que las condiciones frente a la fisuración producida por deformaciones impuestas, debidas a la retracción y la temperatura, son más favorables que en una estructura idéntica armada. Esta idea es correcta si es posible contar con el efecto de compresión del pretensado, que aumenta indirectamente la capacidad resistente a tracción del hormigón. Sin embargo, en losas pretensadas la rigidez de los elementos verticales de soporte, muros y pilares, puede impedir que la compresión del pretensado pueda estar presente en la losa y, consecuentemente, tal como se ha considerado en este proyecto, se suele despreciar su efecto. En este caso, para el control de las deformaciones impuestas se siguen los criterios de proyecto y cuantías mínimas correspondientes a una estructura de hormigón armado.

El criterio adoptado para la definición del pretensado fue, tal como se ha indicado, compensar los efectos de la carga permanente, que en este caso representa aproximadamente la mitad de la carga total.

El análisis de los esfuerzos se realizó con un programa de elementos finitos tipo placa, CEDRUS3 de la casa CUBUS, que permite considerar el efecto estructural del pretensado. Cada tendón, cuyo trazado puede definirse de forma genérica, da lugar a un sistema de esfuerzos equivalentes, que luego son utilizadas para la evaluación de los esfuerzos debidos al pretensado.

Tal como se ha comentado anteriormente, se ha despreciado el efecto horizontal de compresión debido al pretensado. En estructuras como las de este proyecto, resulta muy difícil asegurar que el efecto horizontal del pretensado produzca las compresiones debidas a la componente horizontal de la fuerza introducida en los anclajes porque la placa está vinculada rígidamente a pilares y muros. Despreciar este efecto está del lado de la seguridad y constituye una simplificación aceptable en proyecto.

En una estructura de este tipo resulta muy importante que el modelo permita representar adecuadamente todas las singularidades geométricas de la placa (huecos, discontinuidades, etc.), y el trazado exacto del pretensado (figura 16)



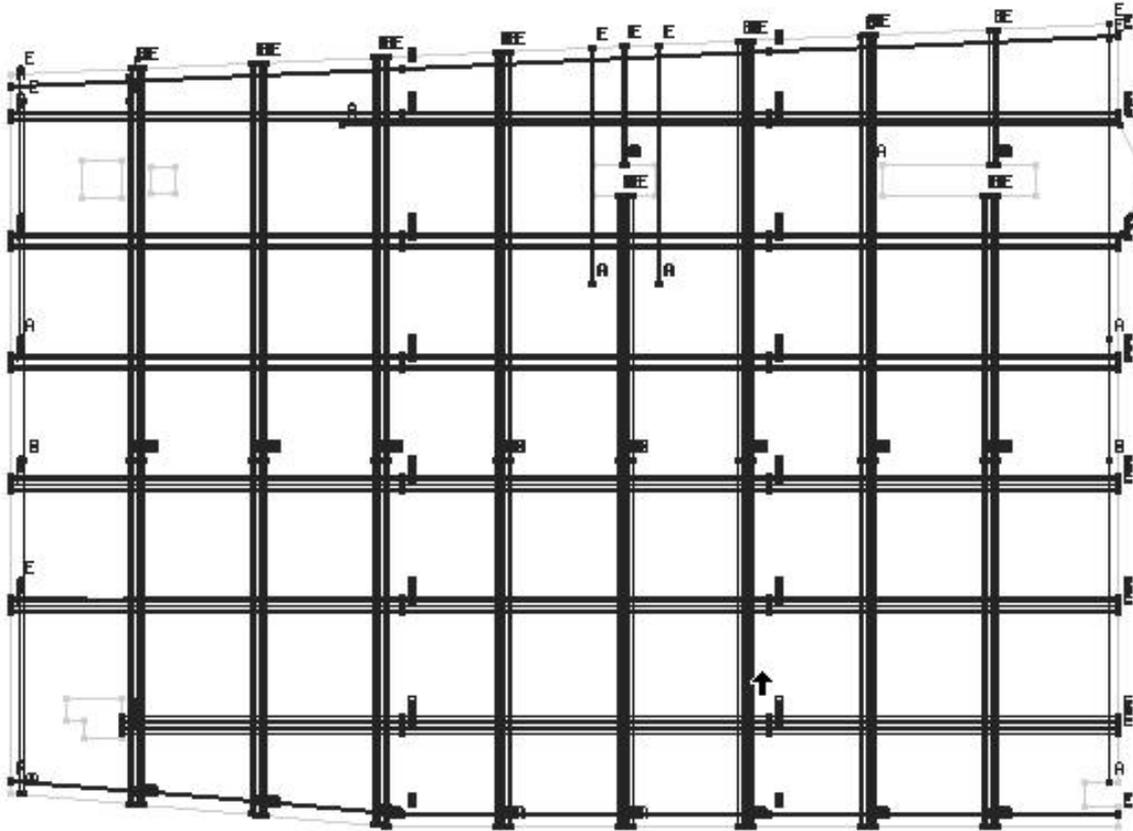


Figura 16. Modelo para el cálculo de esfuerzos de la placa del primer nivel. Representación de discontinuidades geométricas y pretensado.

La disposición y trazado de la armadura activa es la descrita anteriormente. Además en el borde la losa se dispuso un pretensado perimetral con dos cometidos. El primero, es evitar la fisuración que se podría producir en las zonas próximas a los muros perimetrales, derivada de coacciones al movimiento horizontal de estos elementos. El segundo, es absorber las tracciones que se producen en la zona de anclaje, en dirección perpendicular al trazado de los cables principales.

La mayor parte de la armadura pasiva está constituida por mallas. Para garantizar una colocación rápida, fácil y, al mismo tiempo, optimizando las cuantías se utilizaron mallas especialmente diseñadas, de acuerdo con las posibilidades de fabricación disponibles en el mercado.

Debido a la magnitud de las cuantías y para no sobrepasar la capacidad de grúas normales de obra, cada malla disponía sólo la armadura resistente de una dirección y una armadura de sujeción en la perpendicular. En total se han proyectado únicamente 16 tipos de mallas diferentes para toda la obra.

Para la definición de las cuantías de armadura pasiva requeridas y comprobación de las distintas secciones en el Estado Límite Último debido a tensiones normales se utilizó una ley de esfuerzos integrada de banda de pilares y bandas centrales, utilizando los criterios establecidos a tal efecto

por la EH-91. Este sistema permite redistribuir los picos de momento que se producen sobre los apoyos que simulan los pilares.

Un aspecto peculiar de este tipo de proyecto es que para permitir que el pretensado pase sobre los pilares debe estudiarse pormenorizadamente la disposición de la armadura longitudinal. En la figura 17 se muestran algunos casos que se han presentado en este proyecto.

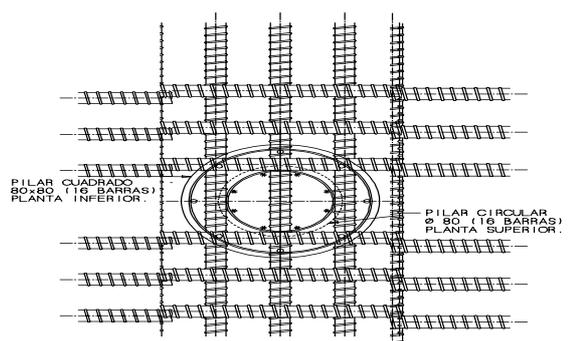


Figura 17. Disposición de armadura en pilares para permitir el paso de las vainas de pretensado.

Las cuantías medias obtenidas son de 6,5 kg/m² de acero de pretensado y 35 kg/m² de armadura pasiva.

7.3. CENTRO COMERCIAL PLAZA DE LA ESTACIÓN EN EL CAESI DE FUENLABRADA. MADRID



Figura 18. Vista general del edificio en construcción

7.3.1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

El edificio del Centro Comercial Plaza de la Estación en el C.A.E.S.I. de Fuenlabrada tiene una forma pentagonal, con unas dimensiones interiores máximas de 190.0 m Hungría y de 139.0 m paralelo a la calle Italia.

Estas dimensiones comprenden el área comercial con seis niveles en alzado: tres niveles de sótanos, dos plantas comerciales y un nivel de cubierta. De este nivel emergen dos edificios con nueve niveles más destinados a hotel y oficinas. Estos dos últimos edificios tienen forma rectangular de 48.0 x 13.0 m.



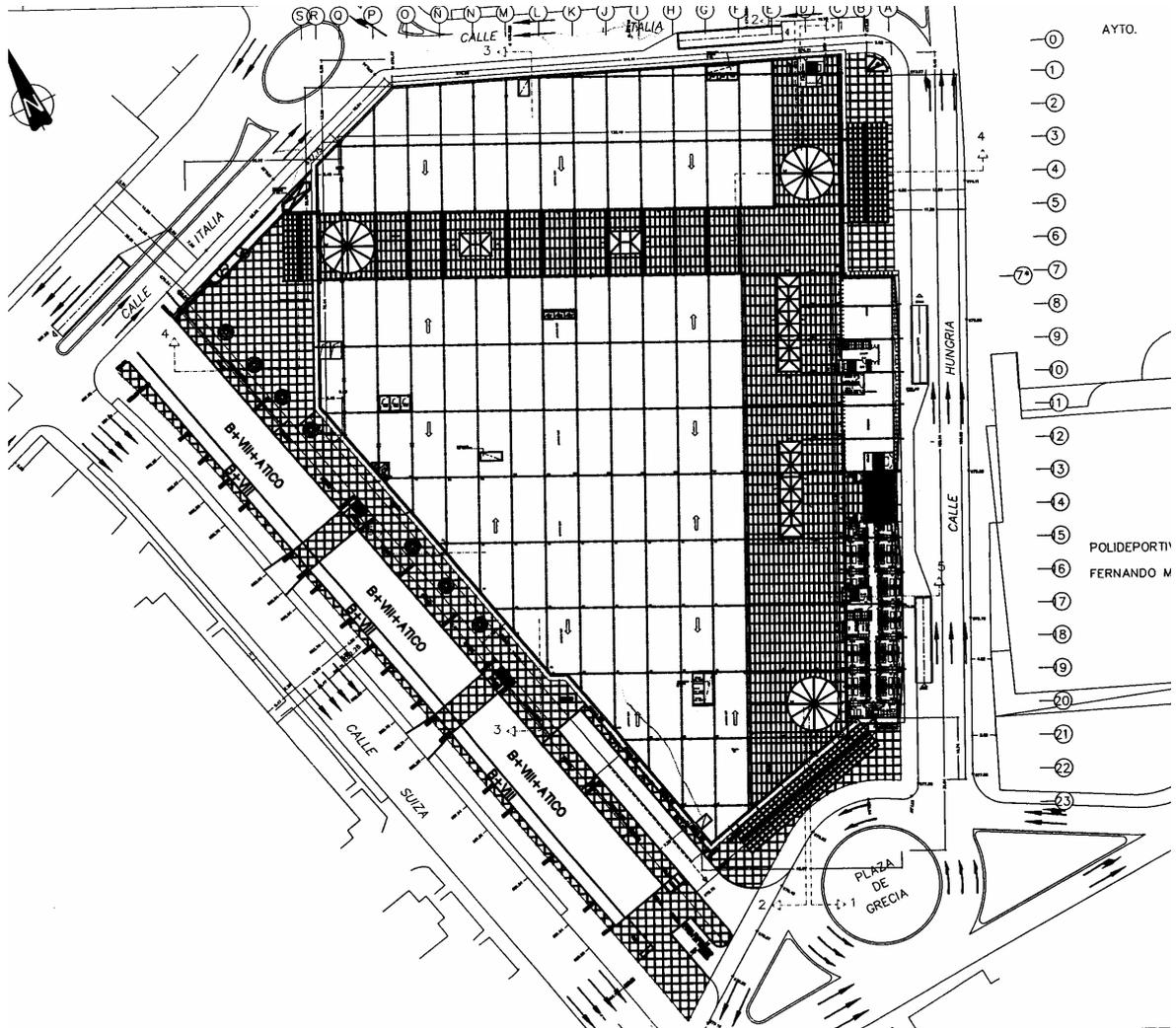


Figura 19. Planta general

Los niveles inferiores (Sótanos 1, 2 y 3) corresponden a aparcamiento de vehículos, en planta baja se sitúa el hipermercado y la zona comercial, en planta primera se ubica parte de la zona comercial y la zona de ocio. Sobre la cubierta del centro comercial se ubican las instalaciones del edificio.

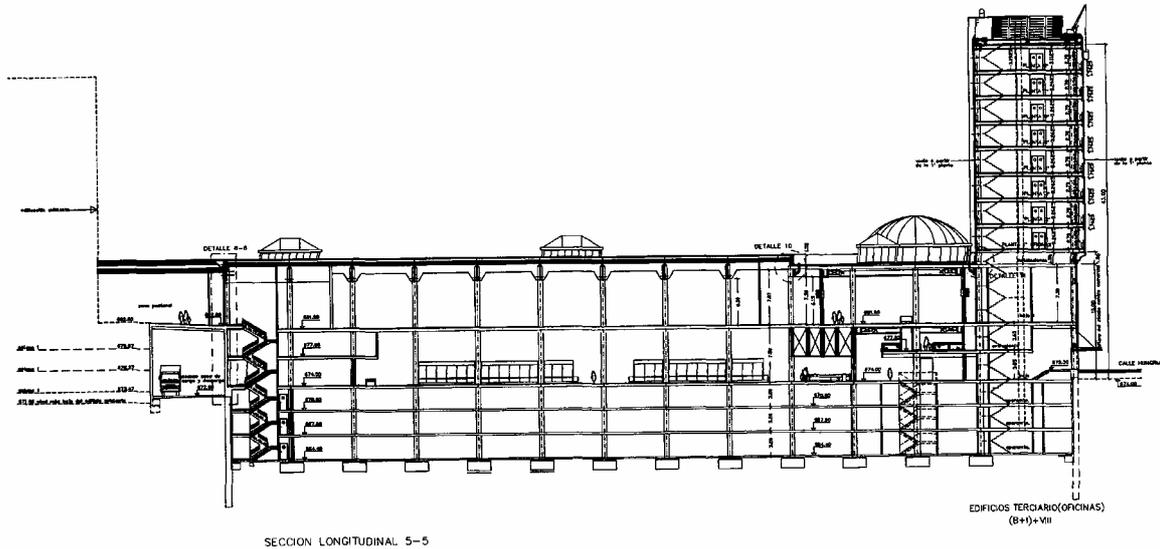


Figura 20. Sección transversal del edificio.

7.3.2. SOLUCIÓN ESTRUCTURAL

Los niveles de sótano se apoyan sobre una cuadrícula de pilares con luces de 8.0 x 8.0 m. Con esa distribución de pilares y considerando la geometría del conjunto y las cargas actuantes, los forjados se resuelven mediante losas macizas de hormigón armado de 25 cm de espesor. Esto supone una esbeltez del forjado de L/32. En las zonas extremas bajo los edificios destinados a hotel y oficinas las luces entre pilares son mayores (12.0 m). en esta zona el canto de la losa se aumenta hasta 40 cm, con una esbeltez de L/30.

En el nivel de planta baja la sollicitación debida a la sobrecarga de uso es mayor, por lo que se aumenta el espesor de la losa hasta 32 cm, lo que supone una esbeltez de L/25. De igual forma que en los forjados de sótano, en la zona extrema del edificio bajo los edificios de oficinas y hotel, el forjado se hace de 40 cm de canto.

Sobre la planta baja, se sitúa una serie de forjados inconexos entre sí que constituyen la entreplanta. En este caso, y en función de luces y magnitud de cargas, se ha resuelto con losas de espesores entre 30 y 40 cm. La entreplanta de instalaciones que se ubica sobre los obradores y en la que se ubican instalaciones de frío, se resuelve mediante una losa postesada con pretensado adherente de 40 cm de espesor.

La elección de pretensado adherente frente a otras posibles soluciones con pretensado no adherente viene dada por la mayor capacidad resistente del pretensado en E.L.U. debido a la adherencia de los cables.

El pretensado está formado por tendones de 0.6" de diámetro agrupados en una vaina que contiene cuatro cordones. A fin de disminuir lo menos posible el brazo útil del pretensado la vaina es plana oval con 8.0 cm de ancho y 2.0 cm de canto total.

El pretensado se concentra en bandas sobre los pilares dejando libre el espacio entre bandas.

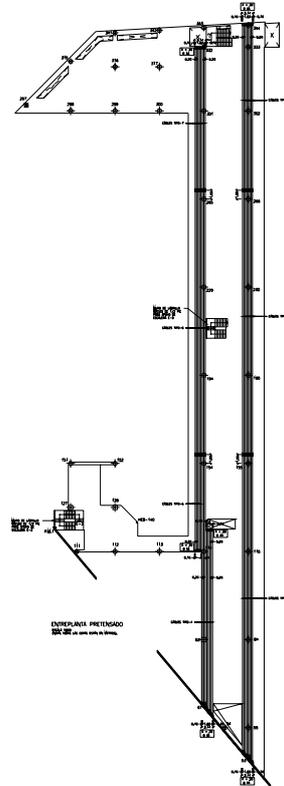


Figura 21. Entreplanta. Distribución de pretensado.

La planta primera, se apoya sobre una cuadrícula de pilares de 8.0 x 16.0 m, desapareciendo una de cada dos alineaciones de pilares que llegan hasta planta baja. Al aumentar las luces hasta 16.0 m se hace necesario, o bien aumentar notablemente el canto del forjado aumentando notablemente el peso propio de la estructura, o disponer vigas descolgadas complicando la distribución de instalaciones en el techo o bien disponer un forjado pretensado que permite hacer frente con menor canto a solicitaciones y luces elevadas. Por ello se opta por una losa maciza de 40 cm de espesor postensada con pretensado adherente.

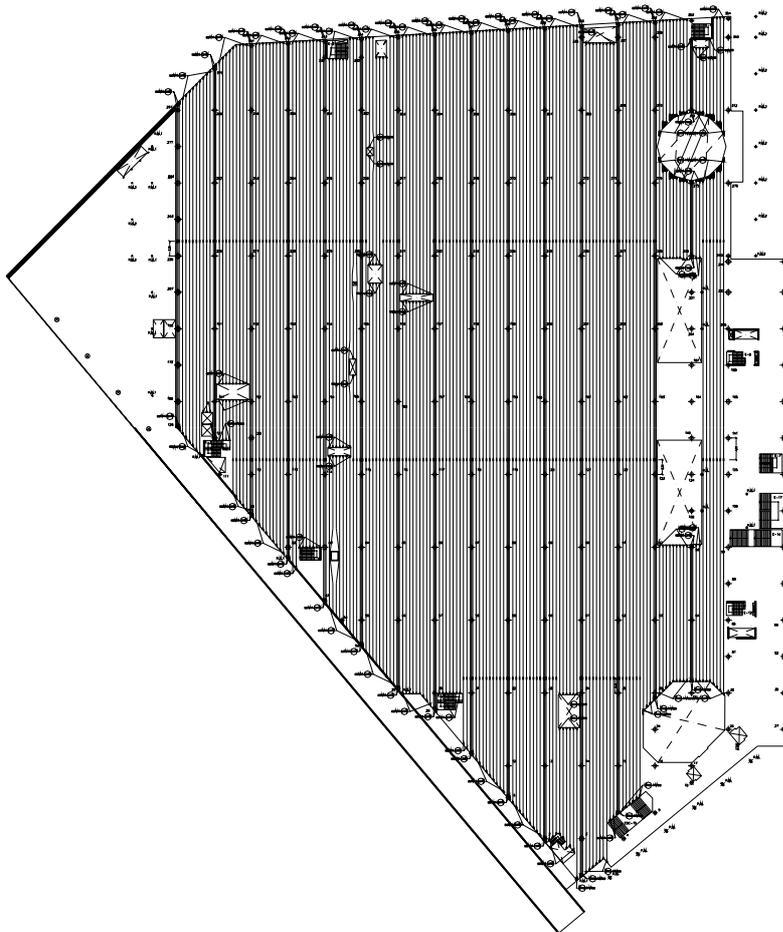


Figura 22. Planta primera. Distribución de pretensado.

La disposición del pretensado en planta se hace según la dirección en la que se producen las mayores luces (16.0m), en la dirección ortogonal la losa trabaja como una losa de hormigón armado. La disposición se realiza agrupando una parte de los tendones sobre la banda de pilares (25%) quedando el resto de cables repartido uniformemente.

Los edificios destinados a hotel y oficinas se resuelven mediante losas macizas de hormigón

armado de 32 cm de espesor pretensadas con pretensado adherente, como en los casos anteriores. El pretensado se dispone en la dirección de mayor luz (12.00 m) y está formado por tendones adherentes de 4 cordones de 0.6" en vaina oval.

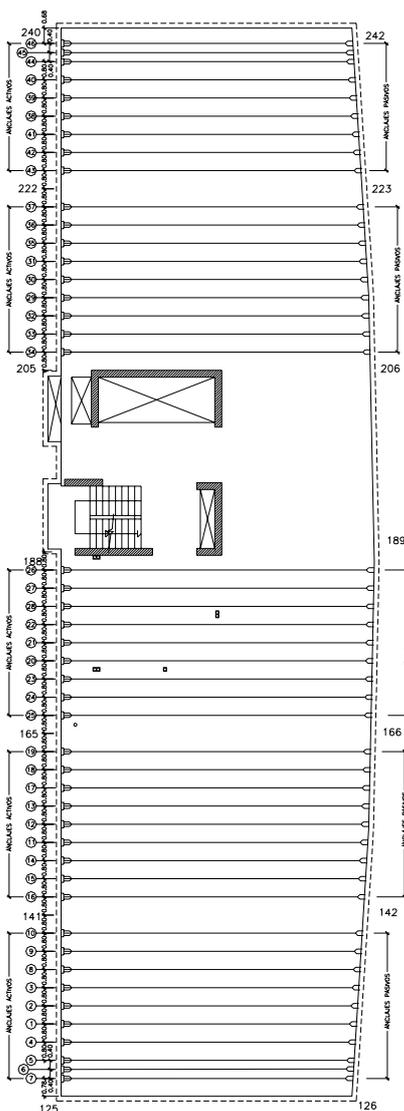


Figura 23. Planta tipo Hotel y Oficinas. Distribución de pretensado.

7.4. EDIFICIOS DE OFICINAS EN EL PARQUE EMPRESARIAL CRISTALIA. MADRID

7.4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS EDIFICIOS

Los Edificios de Oficinas en el Parque Empresarial Crystalia, son dos edificios gemelos de planta rectangular de 71.30 m x 18.40 m con 7 plantas sobre rasante en cada uno de ellos. Bajo rasante constan de 3 niveles comunes a ambos edificios: planta baja, sótano -1 y sótano -2. Las superficies destinadas a la planta baja, el sótano -1 y el sótano -2 engloban de manera conjunta a los dos módulos anteriores y se amplían hasta donde los límites de la parcela lo permiten. Las dimensiones del rectángulo en la que se inscriben estas plantas bajo rasante son aproximadamente de 95 x 70 m.

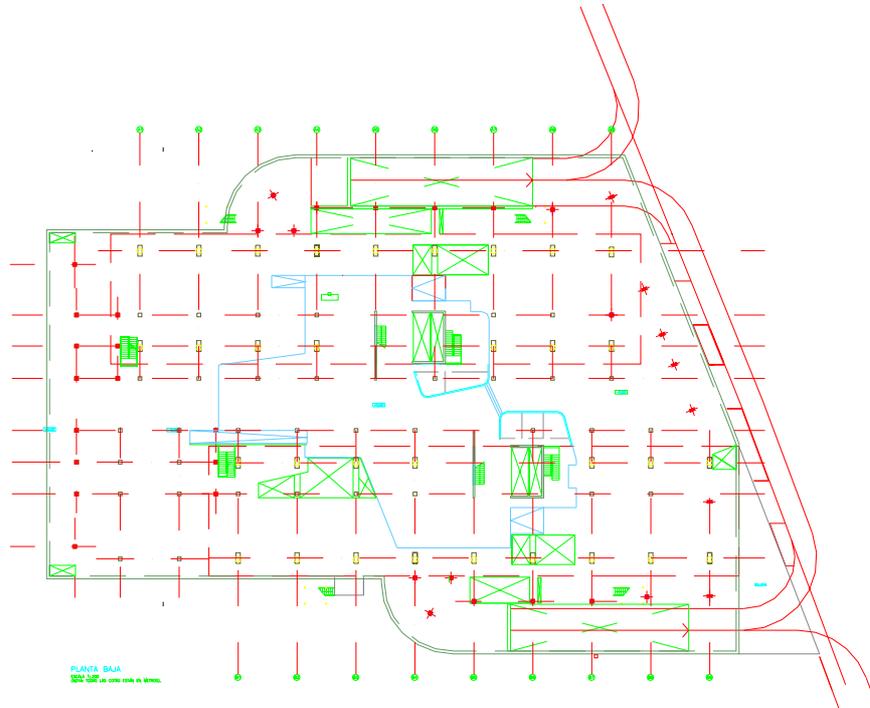


Figura 24. Planta general. Planta baja

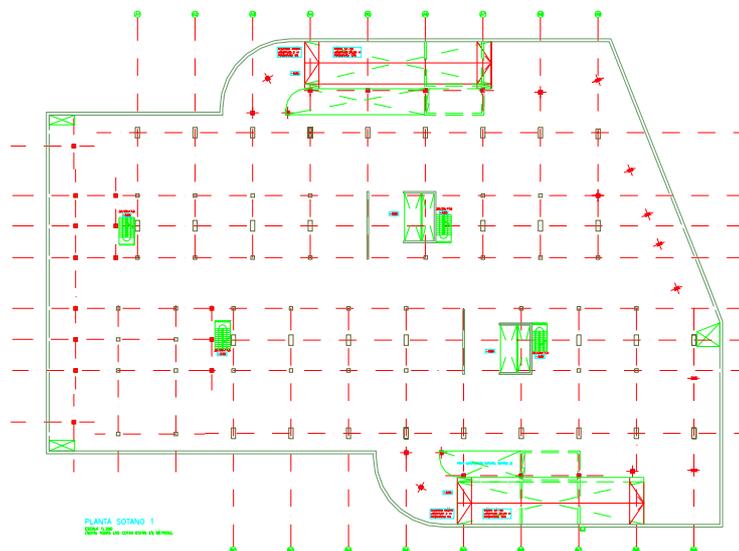


Figura 25. Planta Sótano

En las plantas sobre rasante destinadas a oficinas, con objeto de conseguir la máxima diáfaneidad, sólo presenta pilares en fachada, de manera que las luces en cada dirección son de 8.10 m y 17.10 m respectivamente. Estas plantas se han resuelto con forjado reticular 40+10 postesado.

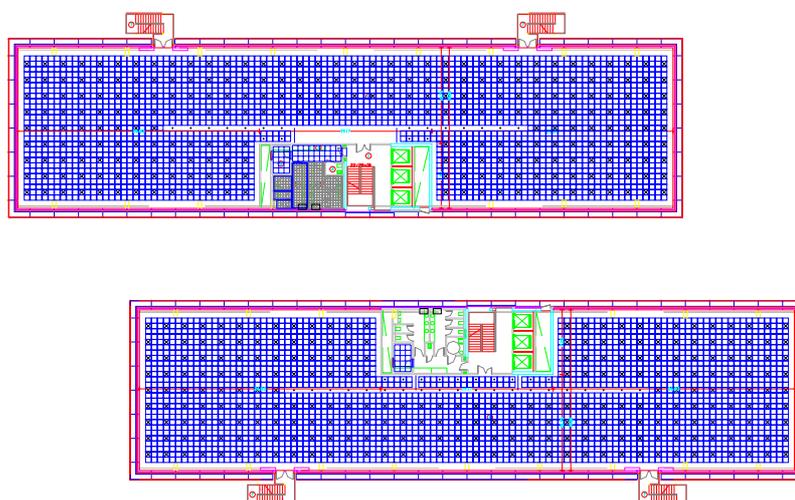


Figura 26. Planta Tipo sobre rasante

En sótano -1 y planta baja, donde las luces máximas son, como máximo, de 9.00 m, la solución es de forjado reticular de hormigón armado de 25+10 en sótano -1 y de 30+10 en planta baja.

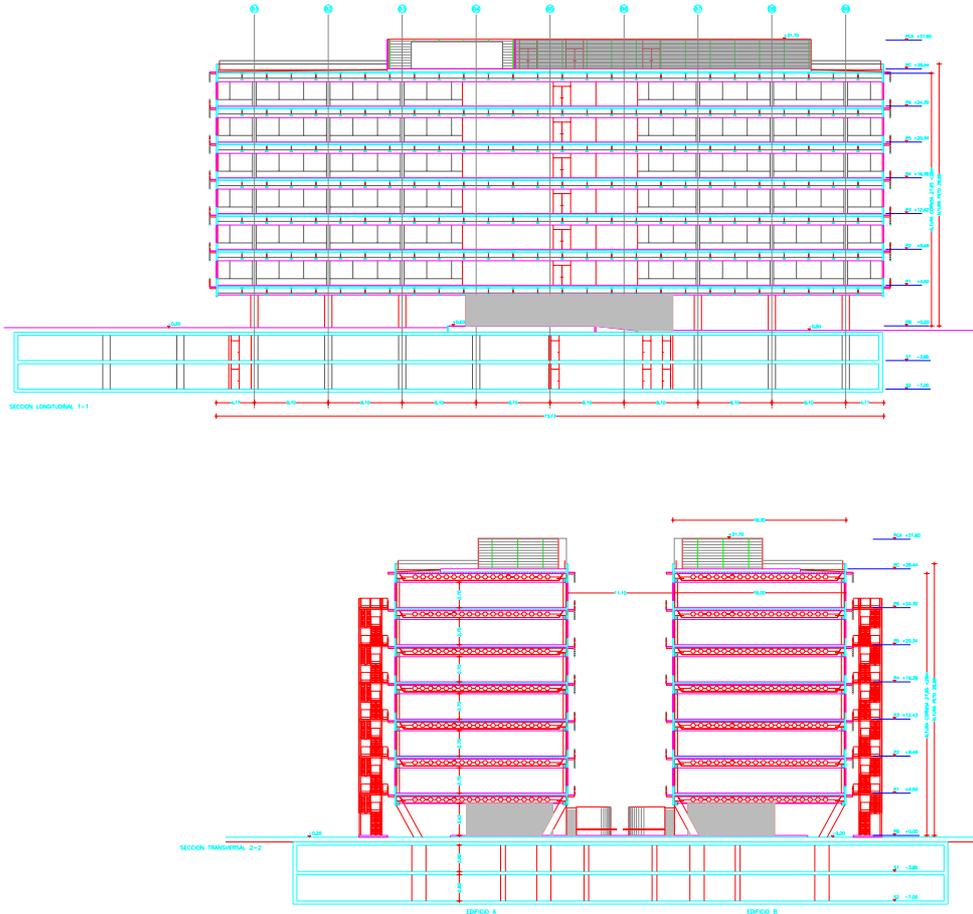


Figura 27. Secciones transversales

7.4.2. SOLUCIÓN ESTRUCTURAL

La estructura está formada en la totalidad de las plantas por forjados reticulares con encofrado recuperable. Cabe distinguir entre los forjados reticulares de planta tipo, planta baja y planta sótano -1, cuyas principales características se acompañan a continuación:

- PLANTA TIPO (sobre rasante): Forjado reticular postesado 40+10 (cm), ancho de nervio 18 cm, intereje entre nervios 86 cm. Luces 17.10 m en dirección N-S y 8.10 m en dirección E-O.
- PLANTA BAJA: Forjado reticular 30+10 (cm), ancho de nervio 16 cm, intereje entre nervios 84 cm. Luces máximas de 8.90 m en dirección N-S y 8.10 m en dirección E-O.

- PLANTA SÓTANO -1: Forjado reticular 25+10 (cm), ancho de nervio 16 cm, intereje entre nervios 84 cm. Luces máximas de 8.90 m en dirección N-S y 8.10 m en dirección E-O.

Esta triple tipología de forjado viene motivada en el caso de la planta tipo por las grandes luces a salvar (17.10 m) entre pilares, mientras que la diferencia entre la tipología de forjado de la planta baja y el sótano -1 viene dada por las grandes cargas existentes en la primera de ellas debido a las diferencias de cotas entre la cota superior de forjado y el nivel de piso terminado que se resuelven con recrecidos y rellenos, así como a la zona destinada para acceso de bomberos.

El sistema de pretensado elegido para las plantas tipo sobre rasante consiste en un tendón adherente de 4 cordones de 0.6" con vaina circular de 4.5 cm de diámetro por cada nervio del forjado reticular en la dirección de la luz principal de 17.10 m. Asimismo, se ha estudiado el replanteo de los casetones de forma que, en las alineaciones de pilares se disponga de un nervio de 54 cm de ancho que permita concentrar dos tendones de las mismas características que en los nervios interiores.

Adicionalmente al pretensado principal en la dirección de mayor luz, presenta un pretensado transversal en los voladizos para controlar las deformaciones en fachada. Este pretensado es de las mismas características que el de los nervios principales, es decir, un tendón adherente formado por 4 cordones 0.6" en vaina circular.

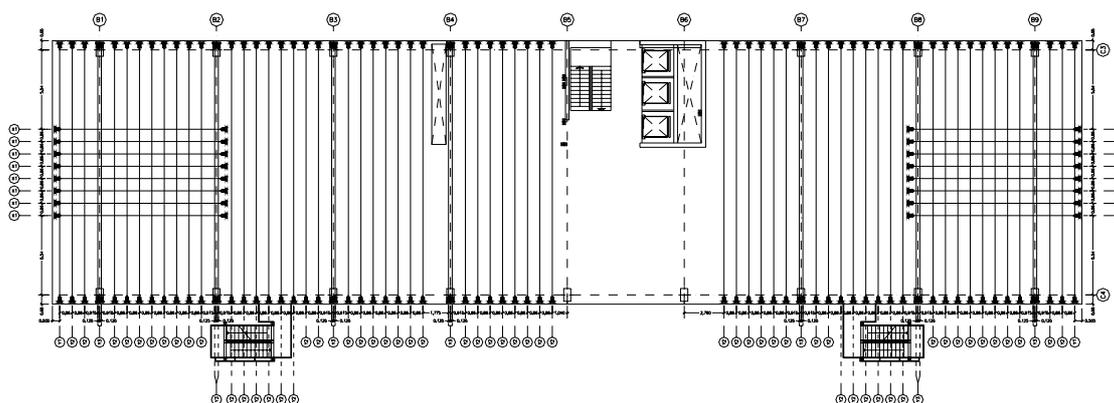


Figura 28. Distribución en planta de los tendones de pretensado en plantas tipo

La cuantía de pretensado se ha proyectado para compensar el peso propio de los forjados, añadiéndose la armadura pasiva necesaria a la hora de realizar el dimensionamiento frente a la totalidad de las acciones.

El análisis de los esfuerzos se ha realizado con el programa de elementos finitos tipo placa, CEDRUS4 de la casa CUBUS, que permite considerar el efecto estructural del pretensado. Cada tendón, cuyo trazado puede definirse de forma genérica, da lugar a un sistema de fuerzas equivalentes, que luego son utilizadas para la evaluación de los esfuerzos debidos al pretensado.

Un aspecto característico de esta estructura lo constituye el hecho de que los pilares de fachada, de 0.90 x 0.50 m, presenten su mayor dimensión en la dirección de la luz principal. Esto supone, a efectos de comportamiento del forjado, que existe un empotramiento considerable en pilares que

ha sido tenido en cuenta, tanto a la hora de definir el trazado de los cables en sus extremos como en el dimensionamiento del propio forjado.

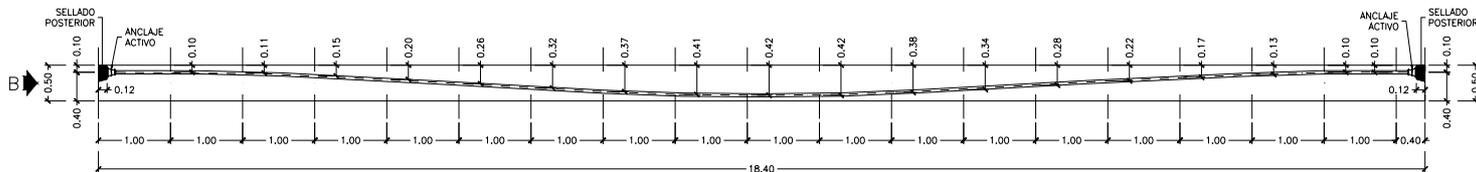


Figura 29. Trazado en alzado de los tendones