

Sistemas constructivos:
Hormigón pretensado y postesado

Tutor: Jorge Schinca

Estudiantes: Anahí Torres-Pardo | Fernanda Morales

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

2.1. ORÍGENES DEL HORMIGÓN PRETENSIONADO

2.2. GENERALIDADES

2.3. CONCEPTOS BÁSICOS

2.3.1. Definiciones

2.3.2. Formas de presforzar un elemento estructural

2.4. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

2.4.1. Diagramas de momento en hormigón armado y pretensionado

2.4.2. Diagramas de tensiones en hormigón armado y pretensionado

2.5. MATERIALES

2.5.1. Tipos de acero utilizados

2.5.2. Tipos de hormigón utilizados

2.6. MÉTODO CONSTRUCTIVO

2.6.1. Generalidades en el sistema tradicional

2.6.2. Etapas de un elemento pretensionado

2.6.3. Requisitos complementarios

3. USOS Y APLICACIONES

3.1. USOS GENERALES

3.2. APLICACIONES EN URUGUAY

3.2.1. Hormigón pretesado aplicado a piezas estructurales

CERRAMIENTOS a) Paneles 2T

HORIZONTALES b) Sistema Pi

c) Sistema Gaviota

d) Losas Huecas

e) Sistema Prelam

f) Sistema Rippen

g) Sistema Stalton

h) Sistema Stalton Porteña

VIGAS a) Vigas VP: Doble pendiente / Sección I

b) Vigas VC: Sección U

c) Vigas VR: Sección rectangular

d) Vigas sección T

e) Vigas sección L

3.2.2. Hormigón postesado aplicado a piezas estructurales

VIGAS

LOSAS

4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA

4.1. GENERALES

4.2. ESPECÍFICAS

5. ANÁLISIS DE PROYECTOS

5.1 VIADUCTO SOBRE ACCESOS AL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE CARRASCO: SISTEMA DE VIGAS PREFABRICADAS PRETENSIONADAS

- 5.1.1. Planteo estructural general
- 5.1.2. Determinantes de la elección del sistema estructural
- 5.1.3. Elementos del sistema y puesta en obra
- 5.1.4. Integración con los acondicionamientos y las terminaciones
- 5.1.5. Unión con otras piezas estructurales no pretensionadas
- 5.1.6. Previsiones frente a incendios

5.2 WORLD TRADE CENTER AVENIDA: SISTEMA POSTESADO DE LOSAS SIN VIGAS

- 5.2.1. Planteo estructural general
- 5.2.2. Determinantes de la elección del sistema estructural
- 5.2.3. Elementos del sistema y puesta en obra
- 5.2.4. Integración con los acondicionamientos y las terminaciones
- 5.2.5. Unión con otras piezas estructurales no postesadas
- 5.2.6. Previsiones frente a incendios

5.3 MAUSOLEO AL GENERAL ARTIGAS: SISTEMA POSTESADO CON ADHERENCIA DEL ACERO AL HORMIGÓN

- 5.3.1. Planteo estructural general
- 5.3.2. Determinantes de la elección del sistema estructural
- 5.3.3. Elementos del sistema y puesta en obra
- 5.3.4. Integración con los acondicionamientos y las terminaciones
- 5.3.5. Unión con otras piezas estructurales no postesadas
- 5.3.6. Previsiones frente a incendios

6. CONCLUSIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo desarrolla un estudio del sistema de hormigón pretensionado, analizando sus principales características, propiedades estructurales, y procedimientos constructivos, con el objeto de brindar posibles herramientas útiles a la hora de elegir un sistema constructivo para un proyecto en particular.

Mediante la recopilación diversa de información técnica de los sistemas, visitas a empresas dentro del rubro y entrevistas a profesionales idóneos, se desarrolla un trabajo estructurado en 4 bloques principales que permiten una completa comprensión del sistema, sus posibilidades de aplicación, condicionantes, ventajas y desventajas.

Se comienza el trabajo con un capítulo destinado a la descripción de conceptos generales que permiten entender el funcionamiento y las diferencias del hormigón pretensionado con el tradicional, mediante un análisis estructural y material. El segundo bloque refiere a los posibles usos y aplicaciones del mismo, distinguiendo entre los tipos existentes en nuestro mercado y las distintas piezas estructurales que los componen. Sigue luego un capítulo dedicado al análisis de ventajas y desventajas del sistema en general y de sus sub-sistemas, a modo de resumen de los temas tratados. De esta forma, luego de la presentación y descripción del sistema, se reorganizan todos los puntos de manera de brindar una información ordenada y clasificada.

Una vez llegado a este punto, es posible proceder al análisis de ciertos ejemplos concretos en nuestro medio local, evaluando la adecuación del mismo a los requerimientos y posibilidades tecnológicas existentes en nuestro país.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

2.1. ORÍGENES DEL HORMIGÓN PRETENSIONADO

El hormigón armado es utilizado desde hace ya más de un siglo y medio, habiendo sido aplicado inicialmente en los edificios industriales y conquistando progresivamente los elementos arquitectónicos tradicionales. Dicho material revolucionó la arquitectura, posibilitando la creación de obras insospechadas antes de su invención y convirtiéndose hoy en día en una de las técnicas constructivas más utilizada en todo ámbito arquitectónico.

Se trata de la combinación de la masa de hormigón y un conjunto de armaduras de acero. El hormigón como masa material posee una muy buena resistencia a la compresión pero es débil frente a los esfuerzos de tracción (del orden de 1/12 de su resistencia a la compresión), por lo que es reforzado con varillas de acero en las zonas donde pueden aparecer estas tensiones, para suplir dicha falta de resistencia.

En el hormigón armado se trata de que todos los esfuerzos de tracción sean absorbidos por la armadura metálica y los de compresión por el hormigón. Pese a esto, *el hormigón que recubre las armaduras está traccionado al igual que éstas, y no puede acompañarlas en su alargamiento sin romperse. Como consecuencia, inevitablemente aparecen fisuras, cuya abertura puede ser controlada al escoger el diámetro y la tensión del acero.*¹

El acero queda sólidamente unido al hormigón formando así una pieza solidaria, sin que se produzca deslizamiento de un material sobre el otro. Esto se debe a la adherencia entre ambos materiales y al anclaje que se realiza del acero en las extremidades del elemento de hormigón. Debido a la adherencia mencionada, el hormigón está también sometido a tracción, y está por lo tanto, trabajando en condiciones desfavorables; y es el acero quien impide la disgregación del material pétreo.

Frente a esta observación, aparece una nueva posibilidad de comprimir el hormigón previamente al trabajo: *El hormigón pretensado corresponde a una forma especial de construcción en hormigón armado que tiene por objeto evitar la formación de fisuras bajo la carga de trabajo y al mismo tiempo utilizar mejor los materiales.*² *Por sus características de flexibilidad y reducida sección, aparece (en ciertas situaciones) como el material más apto para sustituir ventajosamente al hormigón armado.*³

Si bien en gran parte de las obras arquitectónicas se recurre a la utilización del hormigón armado tradicional como sistema constructivo, no siempre representa una solución económica y/o práctica. Existen variadas situaciones en las que es más conveniente, y hasta a veces necesaria, la utilización de otros sistemas que brinden determinadas características y propiedades que éste no posee.

Los hormigones pretensionados añaden al sistema tradicional cualidades estructurales y resistentes necesarias en obras de mayores exigencias, posibilitando la realización de estructuras de gran porte

¹ “El hormigón precomprimido” _ Dres. M. Ritter y P. Lardy

² Tesis “Hormigón Pretensado” _ Farq. _ Udelar.

³ Tesis “Hormigón Pretensado” _ Farq. _ Udelar.

que no serían viables utilizando el método tradicional, ya que conducirían a elementos demasiado pesados, rígidos y difíciles de operar.

En el hormigón armado las partes traccionadas de hormigón son útiles solamente para recubrir el acero, constituyendo su peso un inconveniente tan grande que, para vigas de grandes luces, la estructura metálica resulta generalmente más económica.

2.2. GENERALIDADES

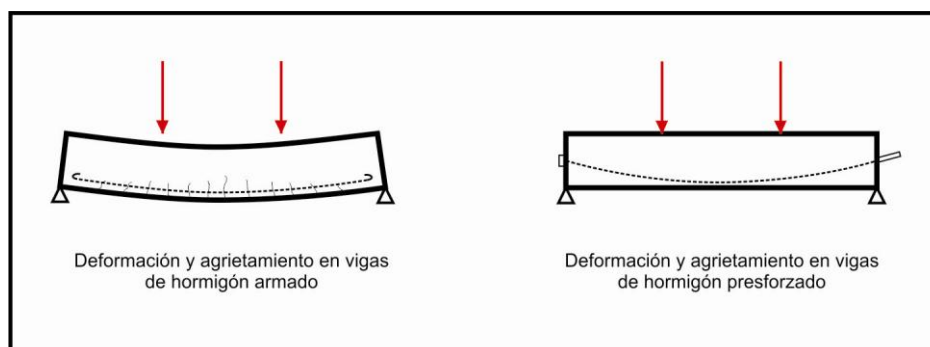
El hormigón pretensionado es un sistema estructural en el cual *se introducen esfuerzos internos de tal magnitud y distribución, que los esfuerzos resultantes de las cargas externas se equilibran hasta un grado deseado.*⁴

*Gracias a la combinación del concreto y el acero traccionado es posible producir, en un elemento estructural, esfuerzos y deformaciones que contrarresten total o parcialmente a los producidos por las cargas gravitacionales que actúan en el elemento, lográndose así diseños más eficientes.*⁵

Se trata de someter al hormigón a unas compresiones superiores a las tracciones que va a soportar en las secciones más desfavorables de la pieza, con el objetivo de que trabaje exclusivamente a compresión. Para lograr esto se otorga a las armaduras una tracción previa a la puesta en servicio de la pieza estructural. Una vez liberadas las armaduras que fueron estiradas, tenderán a recuperar su dimensión original, provocando en el volumen del hormigón un esfuerzo de compresión contrario al esfuerzo de tracción al que será sometido por las cargas externas luego de su puesta en servicio.

A diferencia de lo que sucede en las piezas de hormigón armado, donde el hormigón se fisura en las partes traccionadas aunque no sea éste el que resista el esfuerzo, en las piezas de hormigón pretensionado, el hormigón usualmente no se fisura.

En los elementos de hormigón pretensionado, la deformación y el agrietamiento disminuyen, o incluso desaparecen (con un riguroso cálculo estructural), debido a la compresión y al momento producidos por los tendones. Esto se aprecia esquemáticamente en la siguiente figura que muestra el estado de deformación y agrietamiento de dos vigas sometidas a una misma carga vertical, una de hormigón armado y otra de hormigón pretensionado. Por lo tanto nos encontramos ante elementos más eficientes desde el punto de vista estructural y estético.



⁴ Definición de **hormigón pretensado** del Comité de Hormigón Pretensado del ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE)

⁵ <http://www.anippac.org.mx/capitulo02.pdf>

Los hormigones denominados pretensionados se utilizan estructuralmente con la finalidad de *superar la debilidad natural del hormigón frente a esfuerzos de tracción*.⁶

2.3. CONCEPTOS BÁSICOS

2.3.1. Definiciones

Cabe aclarar, antes de continuar, la nomenclatura adoptada en el presente trabajo, ya que existen muy diversas designaciones según la bibliografía consultada.

Se denomina **hormigón pretensionado** a la combinación de hormigón y acero de presfuerzo en una pieza estructural, es decir, al sistema constructivo en el que se aplica un esfuerzo de tracción a las armaduras previamente a su puesta en servicio.

Dentro de este sistema constructivo distinguimos dos *formas* en las que se puede presforzar un elemento estructural, dando lugar a lo que denominamos **hormigones pretesados y postesados**. La diferencia entre ellos radicará principalmente en su proceso de ejecución, y será desarrollada a continuación.

2.3.2. Hormigón pretesado y postesado.

Hormigón Pretesado

El término *pretesado* se usa para describir el método de pretensionado en el cual las armaduras activas de la pieza se tesan antes del vertido del hormigón.

El hormigón se adhiere al acero en el proceso de fraguado, y cuando éste alcanza la resistencia requerida, se retira la tensión aplicada a los cables y es transferida al hormigón en forma de compresión. Este método produce un buen vínculo entre las armaduras y el hormigón, el cual las protege de la oxidación, y permite la transferencia directa de la tensión por medio de la adherencia del hormigón al acero.

La mayoría de los elementos pretesados tienen un tamaño limitado debido a que se requieren fuertes puntos de anclaje exteriores que estarán separados de la pieza a la distancia correspondiente a la que se deberán estirar las armaduras. Consecuentemente, éstos son usualmente prefabricados en serie dentro de plantas con instalaciones adecuadas, donde se logra la reutilización de moldes metálicos o de concreto y se pueden pretesar en una sola operación varios elementos.

Las piezas comúnmente realizadas con hormigón pretesado son dinteles, paneles para cubiertas y entrepisos, vigas, viguetas y pilotes, aplicados a edificios, naves, puentes, gimnasios y estadios principalmente.

Hormigón Postesado

El hormigón postesado se diferencia del hormigón pretesado, por el retraso de aplicación de la tensión a los tendones en el proceso de ejecución. El postesado es el método de pretensionado que

⁶ Nawy, Edward G. (1989). *Prestressed Concrete*. Prentice Hall. (Wikipedia)

consiste en tesar los tendones y anclarlos en los extremos del elemento después de que el concreto ha fraguado y alcanzado su resistencia necesaria.

En este sistema, los cables de presfuerzo serán colocados *con la trayectoria deseada, lo que permite variar la excentricidad dentro del elemento a lo largo del mismo para lograr las flechas y esfuerzos deseados.*⁷ Al hacer las trayectorias del acero de presfuerzo curvas, se logra diseñar con mayor eficiencia los elementos hiperestáticos y evitar esfuerzos en los extremos del elemento.

En el proceso de postesado, se colocan en los encofrados de las piezas, vainas de plástico, acero o aluminio que contienen los tendones sin tensionar, antes del vertido del hormigón. Los conductos se atan con alambres a los estribos constructivos auxiliares para prevenir su desplazamiento accidental, y luego se vierte el hormigón. Cuando éste alcanza la resistencia necesaria, los tendones son estirados de acuerdo a las especificaciones de diseño, y mediante cuñas u otros sistemas de anclaje quedan atrapados en su posición. Después de que los gatos hidráulicos se retiran, los tendones, que mantienen la tensión aplicada, transfieren la presión hacia el hormigón.

Este procedimiento permite prescindir de anclajes exteriores apartados una determinada distancia de los elementos estructurales para este estiramiento, gracias a la existencia del hormigón endurecido que ejerce de soporte para aplicar el esfuerzo de tracción.

Existen dos formas de encarar el postesado de una losa: el postesado adherente y el no adherente. En el primero, los ductos serán rellenos con mortero o lechada de cemento una vez que el acero de presfuerzo haya sido tensado y anclado. Las funciones primordiales del mortero o lechada son las de proteger al acero de la corrosión y evitar movimientos relativos entre los cables durante cargas dinámicas. Este sistema en muchos casos no resulta competitivo y no ha tenido mucha difusión en construcciones edilicias.

El postesado no adherente es un sistema más moderno que ha tenido una enorme aceptación, existiendo hoy en día más de 10 millones de m² de losas postesadas construidas en EEUU. El sistema consta de cables individuales cubiertos con grasa y protegidos por una vaina de plástico lisa. Existen en el mercado cables de 0.5" y 0.6", siendo el primero el más utilizado, pudiéndose tesar a 14 o 15 Ton.

Este postesado puede emplearse tanto para elementos fabricados en planta, a pie de obra o colados in situ. Las aplicaciones más usuales son para vigas de grandes dimensiones, dovelas para puentes, losas con pretensionado bidireccional, vigas hiperestáticas y tanques de agua, entre otros.



Esquema de cables en hormigón pretensado



Esquema de cables en hormigón postesado

⁷ <http://www.anippac.org.mx/capitulo02.pdf>

2.4. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

En los elementos estructurales de hormigón pretensado y postesado, la combinación del hormigón y el acero traccionado permite producir esfuerzos y deformaciones que contrarrestan los producidos por las cargas verticales, lográndose así diseños estructuralmente más eficientes que los de hormigón armado.

Para visualizar esta compensación de esfuerzos, se consideran 4 vigas iguales (figuras 1 y 2), simplemente apoyadas, con una misma carga vertical (P) y eventualmente una fuerza de compresión (C) que estaría generada por los tendones tensionados en los correspondientes casos.

2.4.1. Diagramas de momento en hormigón armado y pretensado

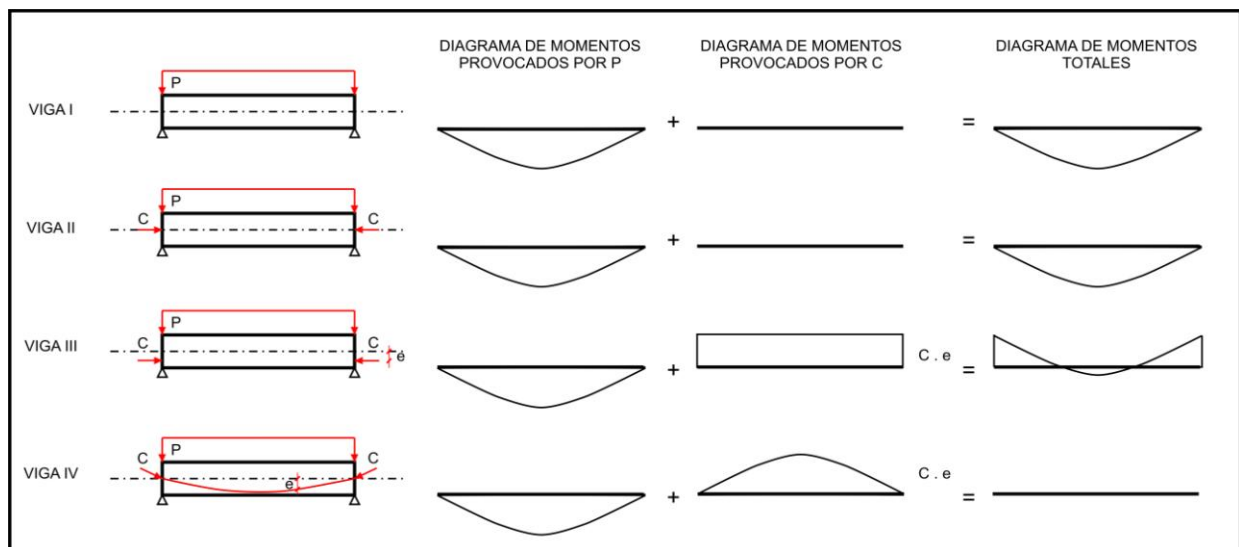


Figura 1

Se puede apreciar, a través de los diagramas de momento de cada pieza, los diferentes comportamientos estructurales, debido a las distintas condiciones o ausencia (en el caso del hormigón armado) de la fuerza C.

En la viga I de hormigón armado, el momento resultante es igual al generado por la carga vertical, ya que no se aplica ninguna tensión horizontal que genere un momento que lo contrarreste.

En la viga II se aplica un esfuerzo de compresión axial, es decir, que los tendones de acero se encuentran en el eje neutro de la sección. El esfuerzo así colocado no provoca ningún momento en la sección, por lo que desde este punto de vista no hay ventajas al colocar esta fuerza axial.

En la viga III, (caso teórico de una viga pretensada), la tensión aplicada con una excentricidad (e) produce un diagrama de momento constante a lo largo del elemento debido a que la trayectoria de la fuerza C es recta y horizontal, aplicada con una excentricidad. Con esto se logra contrarrestar el momento máximo en el centro del elemento provocado por la carga vertical. Sin embargo, en los extremos de la viga el momento provocado por esta fuerza C resulta excesivo ya que no existe momento por cargas verticales que disminuya su acción. En este caso, un diseño adecuado deberá corregir este exceso de momento.

Por último, en la viga IV, (caso teórico de una viga postesada), se obtiene un diagrama de momentos provocado por la fuerza inclinada C, de igual magnitud y signo contrario al generado por la carga vertical, debido a que el esfuerzo de compresión es aplicado de forma similar a la curva del momento provocada por la carga vertical. De esta manera al multiplicar la fuerza C por la

excentricidad 'e' que varía a lo largo del elemento de forma proporcional a la variación del momento generado por P, se obtiene este momento que es cero en los extremos de la pieza y máximo en su centro, e igual y contrario al momento de la carga vertical. Se deberá entonces calcular cual será la magnitud de la fuerza C a aplicar, para obtener estos valores y así contrarrestar eficientemente el efecto de las cargas en cada sección de la viga.

2.4.2. Diagramas de tensiones en hormigón armado y pretensado

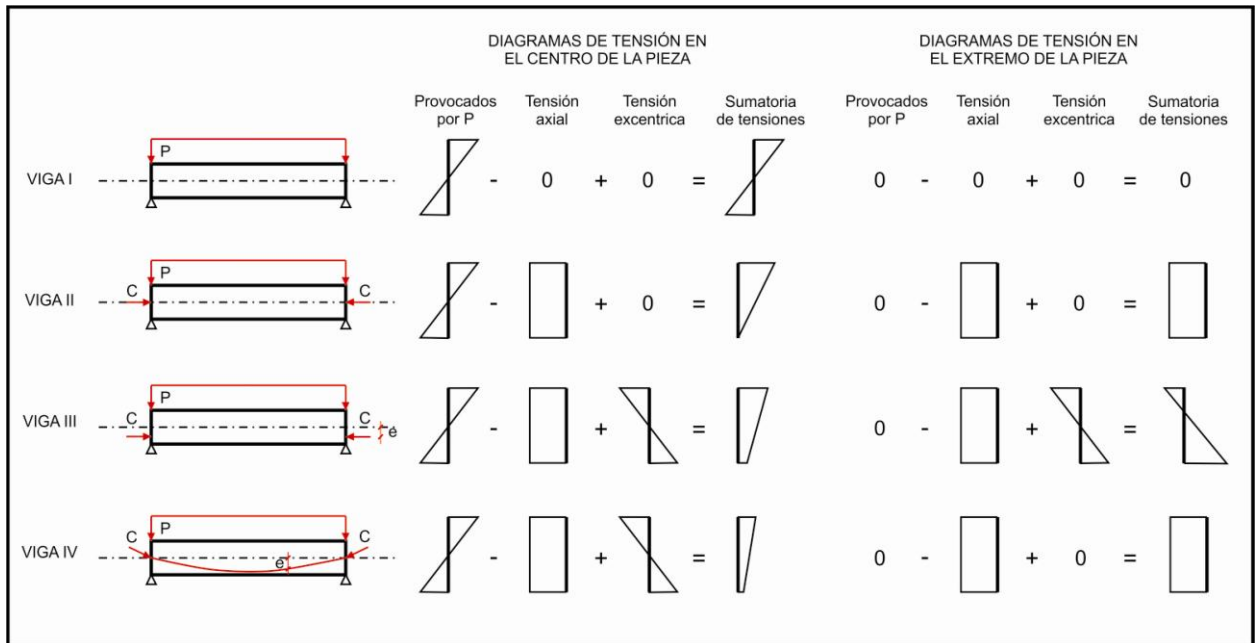


Figura 2

En este cuadro (figura 2) se muestran los diagramas de tensión, correspondientes a las vigas de la Figura anterior, para las secciones en el centro de la viga y en los extremos. Se aprecia que, contrario a lo observado en la figura 1, el comportamiento de la viga II en el centro de la viga sí mejora al aplicar la fuerza C, aunque ésta sea sólo axial. Esto es debido a que esta fuerza provoca compresiones que disminuyen las tensiones provocadas por P en la parte inferior de la sección. Para las vigas III y IV estas tensiones son todavía menores por el momento provocado por la excentricidad de la fuerza C. En los extremos, las vigas II y IV tienen esfuerzos sólo de compresión, mientras que la viga III presenta esfuerzos de tracción y compresión debidos a la excentricidad de la fuerza C; estos esfuerzos son mayores que los de las vigas II y IV y en general mayores también que los esfuerzos permisibles.

La comparación de las 4 vigas en ambas figuras nos permite concluir que el acero tensionado disminuye tanto los esfuerzos de tracción en la sección, como los momentos en el centro de la pieza. Los efectos secundarios del pretensionado, como los momentos y esfuerzos excesivos en los extremos de la viga III, pueden suprimirse o inhibirse con procedimientos sencillos. Encamisando el acero en los extremos se evita que la fuerza C actúe en dicho sector, logrando así tener cero momento y cero tensiones en los extremos.

2.5. MATERIALES

2.5.1. Tipos de acero utilizados para el hormigón pretensionado.

Acero de presfuerzo

El acero de presfuerzo es el material que va a provocar de manera activa momentos y esfuerzos que contrarresten a los causados por las cargas. Existen tres formas comunes de emplear el acero de presfuerzo: alambres paralelos atados en haces, cables torcidos en torones, o varillas de acero.

- i. **Alambres:** Se fabrican individualmente laminando en caliente lingotes de acero hasta obtener alambres redondos que, después del enfriamiento, pasan a través de troqueles para reducir su diámetro hasta su tamaño requerido. El proceso de estirado se ejecuta en frío, lo que modifica notablemente sus propiedades mecánicas e incrementa su resistencia. Posteriormente se les libera de esfuerzos residuales mediante un tratamiento continuo de calentamiento hasta obtener las propiedades mecánicas prescritas. Los alambres se fabrican en diámetros de 3, 4, 5, 6, 7, 9.4 y 10 mm y las resistencias varían desde 16.000 hasta 19.000 kg/cm². Los alambres de 5, 6 y 7 mm pueden tener acabado liso, dentado y tridentado.
- ii. **Torón.** El torón se fabrica con siete alambres firmemente torcidos cuyas características se mencionaron en el párrafo anterior; sin embargo, las propiedades mecánicas comparadas con las de los alambres mejoran notablemente, sobre todo la adherencia. El paso de la espiral o hélice de torcido es de 12 a 16 veces el diámetro nominal del cable. Los torones pueden obtenerse entre un rango de tamaños que va desde 3/8" hasta 0.6" de diámetro, siendo los más comunes los de 3/8" y de 1/2" con áreas nominales de 54.8 y 98.7 mm², respectivamente.
- iii. **Varillas de acero de aleación.** La alta resistencia en varillas de acero se obtiene mediante la introducción de algunos minerales de ligazón durante su fabricación. Adicionalmente se efectúa trabajo en frío en las varillas para incrementar aún más su resistencia. Después de estirarlas en frío se les libera de esfuerzos para obtener las propiedades requeridas. Las varillas de acero de aleación se producen en diámetros que varían de 1/2" hasta 13/8".

Acero de refuerzo

El uso del acero de refuerzo ordinario es común en elementos de hormigón pretensionado. La resistencia nominal de este acero es $f_y = 4,200$ kg/cm². Este acero es muy útil para:

- aumentar ductilidad
- aumentar resistencia
- resistir esfuerzos de tensión y compresión
- resistir cortante y torsión
- restringir agrietamiento por maniobras y cambios de temperatura
- reducir deformaciones a largo plazo
- confinar al concreto

2.5.2. Tipos de hormigón utilizados para el hormigón pretensionado.

Generalmente se requiere un hormigón de mayor resistencia para el trabajo de pretensionado que para el hormigón armado. Un factor por el que es determinante la necesidad de hormigones más resistentes, es que el hormigón de alta resistencia está menos expuesto a las grietas por contracción que aparecen frecuentemente en el concreto de baja resistencia antes de la aplicación del presfuerzo.

Es importante seguir todas las recomendaciones y especificaciones de cada proyecto a fin de cumplir con las solicitaciones requeridas. Puesto que con una cantidad excesiva de cemento se tiende a

aumentar la contracción, es deseable siempre un factor bajo de cemento. Con este fin, se recomienda un buen vibrado siempre que sea posible, y para aumentar la maniobrabilidad pueden emplearse ventajosamente aditivos apropiados.

2.6. MÉTODO CONSTRUCTIVO

2.6.1. Generalidades en el sistema tradicional

Toda construcción en hormigón armado exige una ejecución de mucha atención en la preparación del encofrado, en la confección y colocación de las armaduras metálicas y en la preparación del hormigón.

En el sistema tradicional, una vez armado el encofrado se procede al posicionamiento de las armaduras correspondientes. El conjunto de armaduras es elaborado previamente en el obrador, y una vez posicionadas y verificadas, sigue el llenado, compactado y curado del hormigón.

A fin de obtener el máximo resultado de resistencia de los materiales empleados, es absolutamente necesario cuidar que las armaduras metálicas sean ejecutadas de acuerdo a lo indicado en el proyecto. Llenados los encofrarlos con el hormigón, es imposible comprobar luego la posición y el diámetro de las barras, y es por esto que se hace imprescindible una vigilancia rigurosa durante la preparación de la armadura metálica y su colocación en los encofrados.

Los cuidados durante el llenado del hormigón tienen como fin mantener la mezcla homogénea, es decir, con buena distribución de los áridos. Es importante que se elimine el aire atrapado por lo que es recomendable el vibrado, ya sea utilizando un vibrador como herramienta o una simple varilla para obras más pequeñas.

Para que el hormigón alcance toda su resistencia y las características para las que fue diseñado es necesario que no pierda la humedad de la mezcla aceleradamente. Con este objetivo debe protegerse la superficie del hormigón para evitar su secado antes de tiempo. Un buen curado contribuye a obtener las resistencias de diseño; y en caso de un mal curado, las resistencias pueden quedar hasta un 30% por debajo de lo esperado.

2.6.2. Etapas de un elemento pretensionado

En los sistemas de hormigón pretensionado resulta de extrema importancia la correcta elección y diseño de los aceros de presfuerzo y de refuerzo para que la pieza obtenga un comportamiento adecuado durante todas sus etapas dentro del marco de un reglamento vigente.

Un elemento pretensionado está sometido a distintos estados de carga. Estos estados pueden representar condiciones críticas para el elemento en su conjunto o para alguna de sus secciones. Existen por lo tanto dos instancias en las que las condiciones de servicio y seguridad del elemento deben revisarse: la etapa de transferencia y la etapa final; no descartándose para muchos elementos la existencia de otras etapas intermedias que resultan igualmente críticas.

Etapas de Transferencia. Esta tiene lugar cuando se cortan los tendones en elementos pretesados o cuando se libera en los anclajes la presión del gato en hormigón postesado; es decir, cuando se transfieren las fuerzas al hormigón que comúnmente ha alcanzado el 80% de su resistencia. Aquí ocurren las pérdidas instantáneas, y las acciones a considerar son: el presfuerzo que actúa en ese instante y el peso propio del elemento. Dado que la acción del presfuerzo solo es contrarrestada por la del peso propio del elemento, en esta etapa se presentará la contraflecha máxima.

Estado intermedio. Dentro de esta etapa se presenta el transporte y montaje del elemento prefabricado. Se debe tener especial cuidado en la colocación de apoyos temporales y ganchos y

dispositivos de montaje para no alterar la condición estática para la que fue diseñado el elemento prefabricado. En general, los ganchos para izaje estarán hechos de acero de presfuerzo de desperdicio, y el área de acero será la necesaria para cargar el peso propio del elemento con un factor de seguridad mayor o igual a 4. En los planos debe quedar perfectamente indicada la posición de estos ganchos.

Etapa final. El diseñador debe considerar las distintas combinaciones de cargas en la estructura en general, y en cada elemento en particular, para garantizar el comportamiento adecuado de los elementos. En la etapa final se considerarán las condiciones de servicio tomando en cuenta esfuerzos permisibles, deformaciones y agrietamientos, y las condiciones de resistencia última, de tal manera de alcanzar la resistencia adecuada. En esta etapa ya han ocurrido todas las pérdidas de presfuerzo y en la mayoría de los casos el elemento pretensionado se encuentra trabajando en conjunto con el hormigón, lo que incrementa notablemente su inercia y resistencia.

2.6.3. Requisitos complementarios

Recubrimiento.

El recubrimiento libre de toda barra de refuerzo, tendón de presfuerzo, ductos o conexiones en los extremos no será menor que su diámetro, ϕ , ni menor que los valores que se detallan a continuación:

- En elementos no expuestos al clima ni en contacto con el terreno: 2 cm para vigas y pilares, y 1.5 cm para losas.
- En elementos expuestos al clima o en contacto con el terreno: 4 cm para vigas, pilares y losas.

En localidades donde los miembros están expuestos a agua salada, rocío o vapor químico, se deberá proveer a juicio del diseñador un recubrimiento adicional de al menos un 50 %.

Separación entre tendones.

La separación libre entre tendones de presfuerzo en los extremos de los elementos no debe ser menor que $4 \phi_b$ ó 1.5 veces el Tamaño Máximo del Agregado (TMA) para alambres, ni que $3 \phi_b$ ó 1.5 veces TMA para torones (siendo ϕ_b el diámetro de la barra más gruesa del conjunto). En la zona central del claro, se permite una separación menor y hacer grupos de tendones, conservando una separación libre entre grupos de 2.5 cm ó 1.33 TMA.

Encamisados en elementos pretensionados.

La cantidad de acero de presfuerzo en un elemento pretensionado está regida por las condiciones de flexión más críticas, tanto en niveles de servicio como finales. En el caso de elementos isostáticos, la sección que rige el diseño es la del centro del claro por lo que en los extremos del elemento, si no se desvieron los torones, el presfuerzo es excesivo y en la mayoría de los casos se sobrepasan los esfuerzos permisibles. La solución a esto es encamisar o enductar algunos torones en los extremos para eliminar la acción del presfuerzo.

Para encamisar torones se acostumbra, en general, a revisar primero hasta qué distancia, a partir del extremo del elemento, todos los torones actúan sin rebasar los esfuerzos permisibles. Una vez determinada dicha distancia, se definen cuántos torones se encamisán, generalmente en número par.

Aunque en muchos casos se ha utilizado grasa como elemento aislante entre el torón y el hormigón, no es recomendable porque no elimina totalmente el contacto entre ambos elementos y la consecuente adherencia puede provocar los problemas mencionados. Los elementos de encamisado

más usados son de polietileno (poliducto de plástico para instalaciones eléctricas) debido a su eficiencia y bajo costo. Los tubos metálicos de acero helicoidal o articulados flexibles son costosos, y su uso se limita a ductos para sistemas postesados. Los tubos de PVC (policloruro de vinilo) reaccionan químicamente con el hormigón por lo que hoy son obsoletos para estas aplicaciones.

Protección de tendones de presfuerzo.

Las operaciones con soplete y las de soldadura en la proximidad del acero de presfuerzo deben realizarse de modo que éste no quede sujeto a altas temperaturas, chispas de soldadura, o corrientes eléctricas a tierra. Los tendones no adheridos deberán estar completamente cubiertos con material adecuado para asegurar la protección contra la corrosión. El recubrimiento de los tendones deberá ser continuo en toda su longitud no adherida, y se deberá prevenir que se introduzca lechada o se pierda el material de recubrimiento durante la colocación del hormigón.

3. USOS Y APLICACIONES

3.1. USOS GENERALES

El empleo de hormigón pretensionado suele atribuirse a estructuras sometidas a grandes cargas y con grandes separaciones entre apoyos, en las cuales la reducción de la cantidad de materiales utilizados y la disminución de la altura de los elementos estructurales, compensa el aumento de la complejidad del sistema. A partir de los 6 metros de luz entre apoyos estructurales cualquier proyecto arquitectónico debería evaluar la posible utilización de un sistema pretensionado.

Existen aplicaciones que solamente son posibles gracias al empleo del pretensionado. Este es el caso de puentes sobre avenidas con tránsito intenso o de luces muy grandes, algunas naves industriales o donde se requiere de una gran rapidez de construcción, entre otras.

Principalmente debido a las grandes luces que salva el hormigón pretensionado, ya sea postesado o pretesado, suele aplicarse a estacionamientos, edificios industriales, hoteles, complejos deportivos, piscinas cubiertas, estaciones de ómnibus, salas de recepción de pasajeros en terminales aéreas y marítimas, grandes auditorios, basílicas, cines, teatros, hospitales, almacenes, comercios y oficinas que requieren de grandes espacios libres. Por lo tanto, es utilizado en recintos cuya función de albergar un público numeroso implica la necesidad de cubrir amplias áreas preferiblemente diáfanas. Así como para puentes y pasarelas dentro de las obras públicas.

Sin embargo es importante diferenciar las características de estos dos sistemas. En general, existen aplicaciones y elementos que son solamente posibles ya sea para pretesado o postesado. Se prefiere utilizar elementos pretesados cuando se aprovecha la producción en serie y se desea mayor rapidez de construcción, cuidando que no se sobrepase la capacidad de las mesas o moldes de tesado y que los elementos se puedan transportar por las carreteras y avenidas existentes. El postesado, al tratarse de elementos tanto prefabricados como hechos en obra, es cada vez más utilizado en altos edificios de vivienda, edificios de oficinas, edificios comerciales y hoteles, debido a la reducción de la altura de las piezas estructurales como vigas y losas, para lograr un mayor aprovechamiento en altura y poder tener más cantidad de pisos construidos dentro de una misma altura total del edificio.

3.2. APLICACIONES EN URUGUAY

Alrededor de 1970 era mayor la cantidad de obras civiles estatales construidas, producidas mayormente con hormigón postesado. Por consiguiente, en nuestro país hoy en día, a diferencia de la mayoría de los países desarrollados, ha disminuido porcentualmente el uso del hormigón postesado. Lo que sí está en auge y ha cobrado fuerza es todo el sistema prefabricado pretesado, y dentro del hormigón postesado el sistema de losas sin vigas dentro de los emprendimientos privados.

3.2.1. Hormigón pretesado aplicado a piezas estructurales

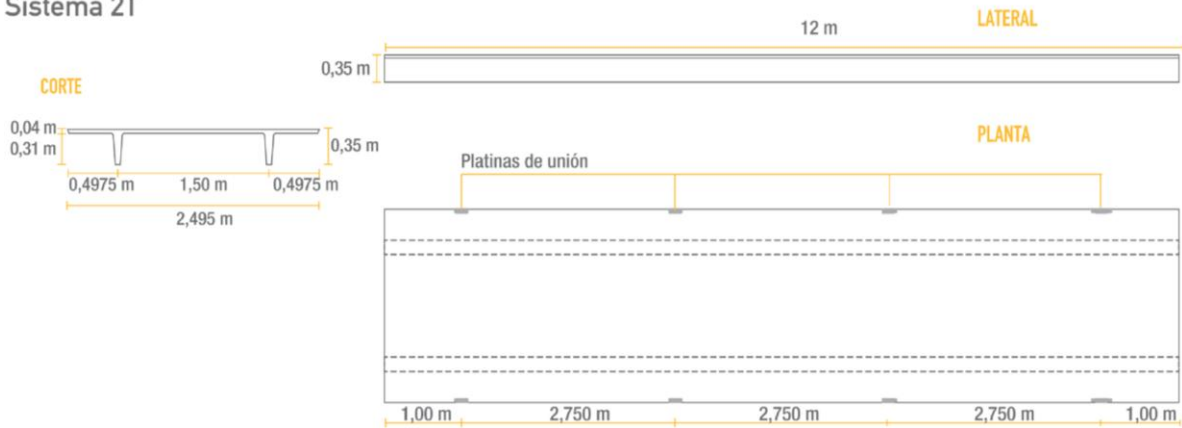
CERRAMIENTOS HORIZONTALES

a) Paneles Doble T

Sistema constituido por paneles nervados pretesados de 2,50 m de ancho y hasta 12 m de longitud. Estos paneles nervados se pueden usar tanto para techos como para entresijos y cerramientos verticales. Los más finos se usan para techos y cerramientos verticales y los más gruesos para entresijos, a los que se les da una terminación rugosa para facilitar la adherencia con la carpeta. Estos elementos resistentes a la flexión, son generalmente utilizados en construcciones industriales

y comerciales. En el caso de los cerramientos verticales, estos no entrarían dentro de nuestro trabajo ya que son elementos prefabricados, pero no pretesados. Simplemente con la armadura pasiva obtienen la resistencia necesaria para su puesta en servicio, donde las mayores cargas serán las fuerzas horizontales del viento.

Sistema 2T



Paneles Doble T para entrepisos en la planta de producción de Flasur



Moldes para paneles doble T en planta de producción de Flasur

En el proceso de ejecución de estos paneles que se utilizarán para cubiertas o entrepisos, se realiza en primer lugar la armadura pasiva en el sector de herrería de la planta de producción. Se coloca la armadura que será activa en los nervios de la pieza y luego la pasiva. Antes de hormigonar, se tensa la armadura activa que se encuentra ubicada en los 2 nervios del panel. Estas armaduras son de un acero de altísima resistencia. Cada torón aguanta 19000 kg a la rotura. Se colocan 4 cables en cada nervio, que no se tesan al máximo por seguridad. Una cuña en forma de cono es el anclaje de cada torón y se ajusta con el gato después de cada tracción. Al día siguiente de hormigonar el hormigón ya ha adquirido la resistencia necesaria y se cortan los cables.



Sector de herrería en la planta de producción de Flasur



Área de producción techada de Flasur, realizada en su totalidad con un sistema prefabricado pretensado de vigas y paneles



Sector de herrería en la planta de producción de Flasur



Armaduras prontas en el sector de herrería



Anclaje del molde que tiene enterrado un bloque de concreto que lo hace capaz de soportar el total de la fuerza del pretensado durante el vertido y curado del hormigón hasta cortar los torones



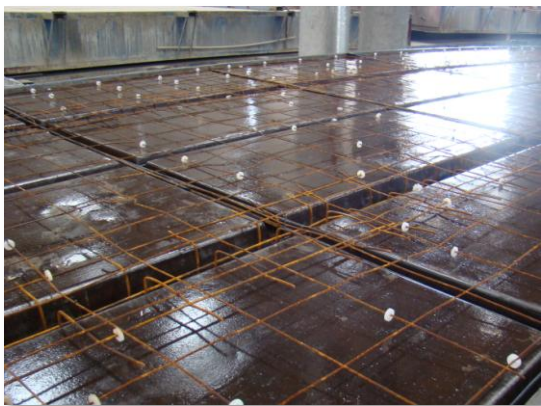
A este anclaje se engancha el gato hidráulico para el pretensado y es donde quedan las cuñas que luego se recuperan. En este panel solamente va un cable en cada nervio



Gato hidráulico utilizado para tesar los torones de los paneles en la planta de producción de Flasur



Gato hidráulico



Armaduras pasivas colocadas en un molde



Vertido del hormigón en un molde



Sacando los agarres para la manipulación y traslado del panel, después del vertido de hormigón



Terminación rugosa de un panel doble T a utilizar como entrepiso



Panel doble T pronto con sus agarres para su manipulación y traslado



Paneles doble T en espera para su traslado

En la empresa uruguaya Flasur se utilizan tres moldes de distintas alturas ($h=35$, $h=50$, $h=75$). Toda la planta de fabricación de Flasur consta de un circuito enterrado que inyecta vapor a estos moldes para que el hormigón adquiera la resistencia necesaria más rápido. Utilizan además un aditivo acelerador de resistencia, para disminuir la cantidad de vapor utilizado, ya que su fabricación es muy cara. De esta forma, a las 15-16, horas el hormigón de estas piezas adquiere la resistencia que se podría adquirir a los 28 días en condiciones normales.

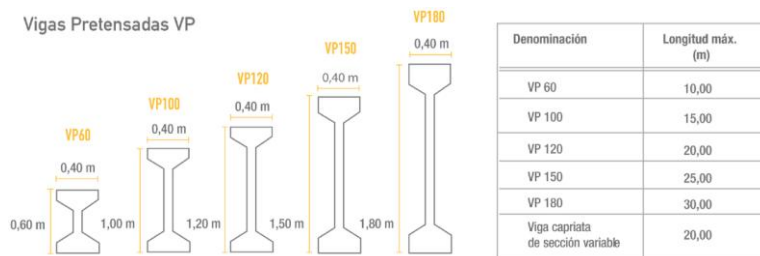


Salida de las cañerías de vapor de la sala de calderas



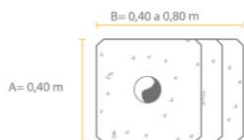
Recorrido de las cañerías de vapor que luego se entierran por debajo de cada molde

Estos paneles se apoyan sobre vigas pretensadas de diferentes alturas según las luces a salvar. Las vigas para apoyo permiten alcanzar luces de hasta 30 m. Una modulación adecuada, evitando piezas de ajuste, permite optimizar económicamente el proyecto.



La evacuación de pluviales se realiza con canalones y la bajada puede ser realizada por el interior de los pilares. Pilares de sección rectangular sirven de apoyo a las vigas. Estos pueden incluir ménsulas a diferentes niveles para entresijos o vigas de puentes grúa, de acuerdo con los requerimientos del proyecto.

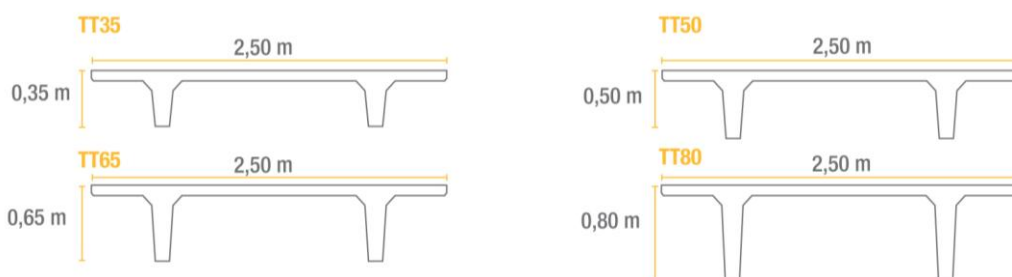
Pilares



Sección	Para vigas
40 x 40	VP 60 / VP 100
	VP 120
40 x 50	VP 150
40 x 80	VP 180

En el caso particular de los paneles nervados pretesados de un sistema de entrepisos, los bordes de los paneles se vinculan entre sí, y en sitio se hormigona una carpeta superficial, logrando de este modo la uniformidad horizontal. En la planta de Flasur se fabrican diferentes alturas de nervios y espesores de paneles, que permiten cubrir un amplio rango de luces a salvar y de sobrecargas admisibles. Se realizan estos entrepisos en cuatro moldes de distintas alturas (h=35, h=50, h=65, h=80)

Sistema de Entrepisos

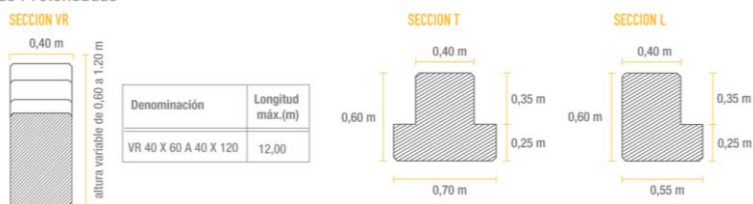


Paneles

Denominación: TT35 Sobrecarga kg/m ²	Luz máx.(m)	Denominación: TT50 Sobrecarga kg/m ²	Luz máx.(m)	Denominación: TT65 Sobrecarga kg/m ²	Luz máx.(m)	Denominación: TT80 Sobrecarga kg/m ²	Luz máx.(m)
250	11,90	350	14,80	750	14,40	1500	12,00
350	11,00	500	13,40	1000	13,00	2000	11,00
500	9,90	750	11,80	1250	12,00	2500	10,00
750	8,70	1000	10,70	1500	11,10		
1000	7,80	1500	9,10	2000	9,90		

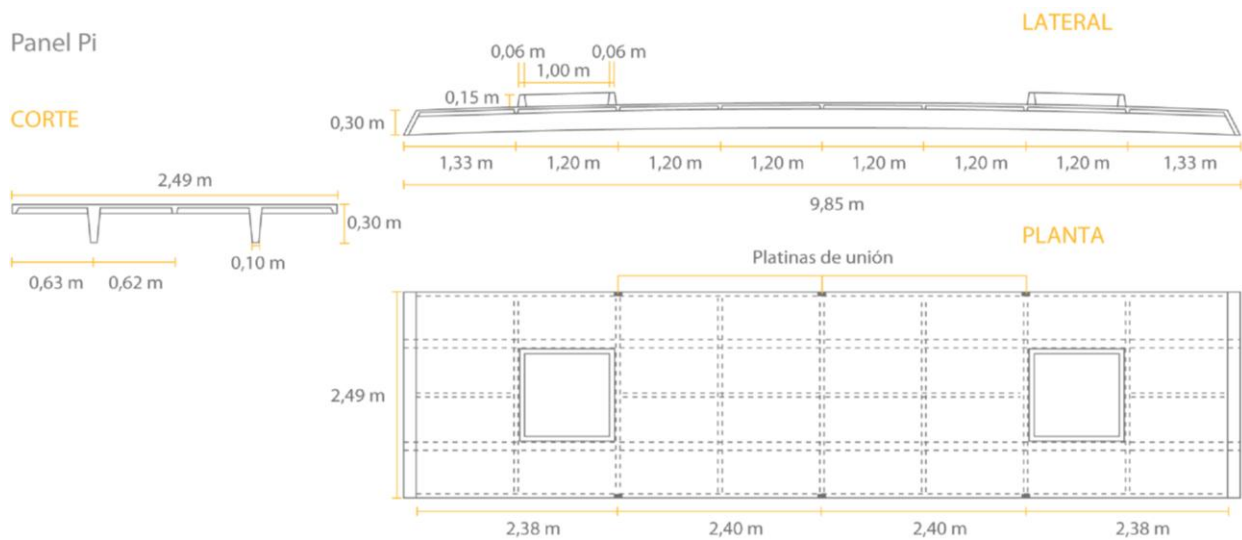
Estos paneles se apoyan sobre vigas de diferentes tipos en función de las necesidades de alturas libres del proyecto: vigas rectangulares, vigas “T”, vigas “L”. Los pilares de apoyo presentan diferentes niveles de ménsulas según los requerimientos del proyecto.

Vigas Pretensadas



b) Sistema Pi

Sistema de cubierta constituido por paneles nervados pretesados, de dimensiones 2,50 m x 10 m y con un peso de 120 kg/m². Son paneles curvos para la evacuación de pluviales, que pueden llegar a tener 2 cm de espesor, (sin considerar los nervios), de forma que compiten con la chapa. Los cables pretesados se ubican en los nervios. Estos paneles admiten la realización de aberturas para lucernarios, lográndose de este modo una iluminación cenital de la nave.



Paneles Pi en el área de estiba de la planta de Flasur



Molde de un panel Pi (se aprecia su curvatura)



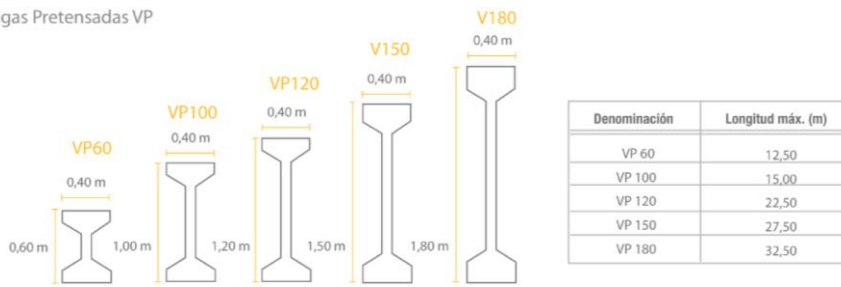
Paneles Pi colocados en la cubierta de la planta de producción de Flasur, donde se pueden observar sus lucernarios



Paneles Pi colocados en la cubierta de la planta de producción de Flasur, donde se pueden apreciar sus lucernarios

Las vigas para apoyo permiten alcanzar luces de hasta 33 m. Se trata de vigas pretensadas de sección doble T y con diferentes alturas de acuerdo con las luces a salvar.

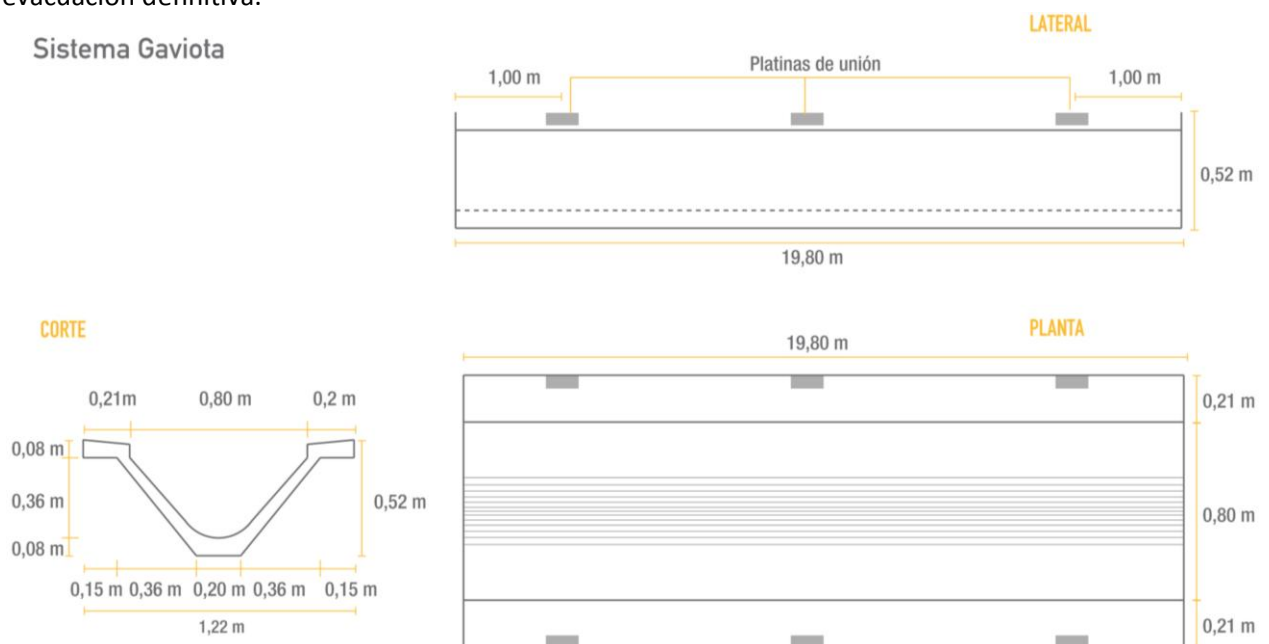
Vigas Pretensadas VP



c) Sistema Gaviota

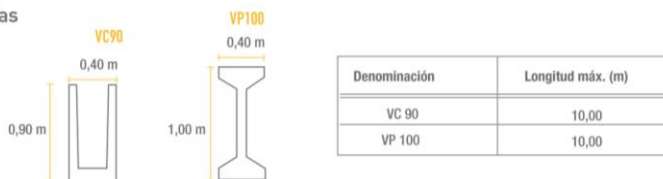
Sistema de cubierta constituido por paneles pretensados que permiten salvar luces de hasta 20 m. Estos paneles tienen un ancho de 1,24 m y un peso de 260 kg/m. Con una leve pendiente se conducen las aguas hacia un extremo del panel, donde son recibidas en una viga canalón para su evacuación definitiva.

Sistema Gaviota



Las vigas de apoyo permiten salvar luces de hasta 10 m.

Vigas Pretensadas



Pilares



d) Losas Huecas

La losa hueca es un elemento prefabricado de hormigón de gran utilidad. Son aptas para la construcción de todo tipo de techos y entrepisos, horizontales o inclinados. Su uso en obra hace más

eficiente los procesos de construcción, además de reducir costos y tiempos de ejecución. Son elementos realizados con acero de alta resistencia. El hormigón utilizado es de muy baja relación agua cemento y posee muy alta resistencia a la compresión, superando los 400 kg/cm². Su sección rectangular ahuecada brinda mayor liviandad, teniendo un peso propio de 130kg por metro. Permiten salvar luces de hasta 10m.

Son elementos industrializados fabricados por extrusión en planta bajo estrictos controles de calidad. En la planta de producción de la fabrica uruguaya Hopresa, son realizadas en mesas de chapa de 75m de largo a razón de 1 por día, utilizándose una máquina diferente para cada espesor de losa. Se realizan con un ancho estándar de 60cm, largo variable en función de la geometría de la obra, y espesores de 8, 12, 15, 20, 25 y 30cm según la luz a salvar.



Losas huecas en la planta II de producción de Hopresa



Muestras de losas huecas en las oficinas de venta de la planta I de Hopresa



Máquina de extrusión que corre por la mesa de chapa. Se aprecia en la parte inferior del frente los caños cilíndricos que ahuecan la losa



Parte superior de la máquina de extrusión donde se va volcando el hormigón durante el proceso de producción

Una vez terminada la producción son regadas, tapadas con nylon para no perder humedad y se dejan fraguar. Luego de pasados los 3 días adquieren la resistencia necesaria para poder ser cortadas en los largos necesarios y son quitadas de las maquinas y trasladadas a la zona de acopio.



Producción de dos mesas de losas huecas tapadas con nylon. Se puede observar que la losa de la derecha está más seca que la central ya que fue realizada el día anterior



Anclajes donde se tesan los cables de las losas con un gato hidráulico



Vista de los anclajes con las cuñas presionando los cables



Losas huecas en la zona de acopio de la planta 2 de Hopresa

La colocación es rápida y sencilla, colocándose 50 a 100 m² por hora (dependiendo de la experiencia y eficiencia de la mano de obra), resultando por tanto más económica que una planchada original.

Para su montaje en obra la junta entre losas es rellena con mortero. Por lo general el sistema se complementa con la realización de una carpeta de compresión de arena y portland sobre las losas, que aumenta la sobrecarga admisible del entrepiso, mejora la distribución de las cargas y proporciona una superficie nivelada como para recibir cualquier tipo de piso.

Muchas veces, por una cuestión de economía y rapidez de ejecución, se prescinde de la capa de compresión, ya que este tipo de losas son autoportantes con el sólo llenado de las juntas. En cubiertas se podrá colocar directamente la membrana sobre las losas sin necesidad de una carpeta. Esta es una diferencia fundamental con los cerramientos horizontales compuestos por viguetas pretensadas, en los cuales es estrictamente necesario el hormigonado superior.

El espesor de dicha carpeta varía según el caso, utilizándose para la misma, hormigón con una resistencia de 200 kg/cm² y para la armadura, malla de 30 x 30 cm. Además se debe completar el sistema con hierros $\phi 6$ c/25 en los apoyos intermedios y en los apoyos de borde, y se debe reforzar con hierros F $\phi 10$ en apoyos intermedios calculando largo y cantidad según el caso.

El montaje es rápido y sencillo y se realiza con grúa, lo cual da una mayor velocidad en el avance de las obras. El costo de montaje es bajo y no se necesita mano de obra calificada. El sistema tiene una rápida habilitación: 48 hs. luego de colocado el mortero en las juntas entre losas.

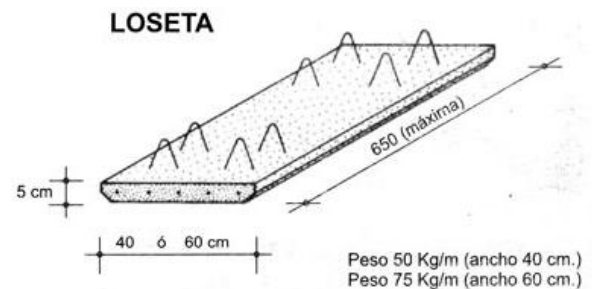
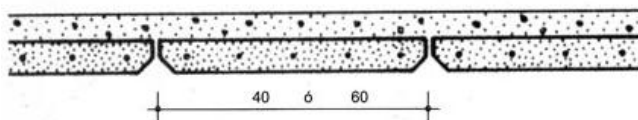
e) Sistema Prelam

Sistema de cubierta o entrepiso que permite salvar luces de hasta 6m.

En la planta de Hopresa se realizan en dos anchos distintos (40 y 60 cm). Se debe realizar una carpeta de compresión de 4 a 8 cm con una armadura malla de 34 x 34 cm y un hormigón con 200 kg/cm² de resistencia.

El ancho mínimo del pilar de apoyo deberá ser de 10cm.

Luz máxima aproximada 6.50 m.



Losetas prelam en la zona de acopio de la planta II de Hopresa

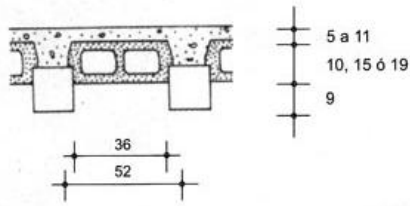
f) Sistema Rippen

Es un sistema de entrepisos utilizado para grandes sobrecargas. Permite salvar luces de 7 a 12 m.

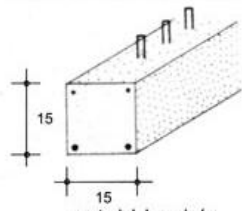
Está constituido por viguetas y bovedillas de diferentes alturas. Se deberá realizar una carpeta de unificación con hormigón de 200 kg/cm² de resistencia de 5 a 11 cm de altura según cálculos, que penetrará entre las bovedillas. La armadura de la carpeta y el apuntalado se determinará según cálculos.

El ancho mínimo del pilar de apoyo deberá ser de 12cm.

Luz máxima aproximada 12 m.

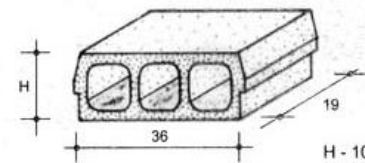


VIGUETAS RIPPEN



material: hormigón
 Peso: 56 kg/m
 Consumo: vigueta simple: 1,9 m/m²
 vigueta doble: 3,0 m/m²

BOVEDILLAS



Material: Hormigón
 Peso: 9.5, 10.60, 16 Kg/un
 Consumo: 10 unidades/m²

H - 10 cm
 H - 15 cm
 H - 19 cm

g) Sistema Stalton

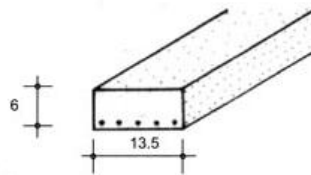
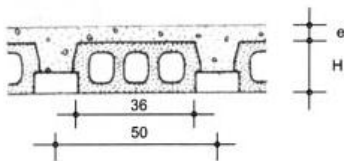
Sistema de cubierta o entrepiso constituido por viguetas y bovedillas. Permite salvar luces de hasta 7,50 m.

Se deberá realizar una carpeta de unificación con hormigón de 200 kg/cm² de resistencia, que penetrará entre las bovedillas. La armadura de la carpeta será una malla de 34 x 34 cm y unos nervios transversales \varnothing 10 cada 1,5 m. Se deberá apuntalar cada 1,5 m.

El ancho mínimo del pilar de apoyo deberá ser de 10cm.

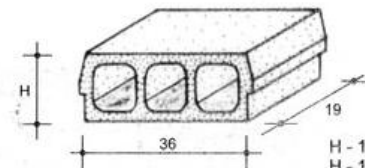
Luz máxima aproximada 7.50 m

VIGUETA



Material: Hormigón
 Peso: 20 Kg/m
 Consumo: Simple: 2m/m² - Doble 3,2m/m²

BOVEDILLAS



Material: Hormigón
 Peso: 9.5, 10.60, 16 Kg/un
 Consumo: 10 unidades/m²

H - 10 cm
 H - 15 cm
 H - 19 cm



Viguetas sobre la mesa de extrusión con sus cables tensados sujetos en los anclajes en la planta II de Hopresa



Muestra del sistema Stalton en las oficinas de venta de la planta I de Hopresa

Losas Stalton de hormigón según la Fábrica Hopresa

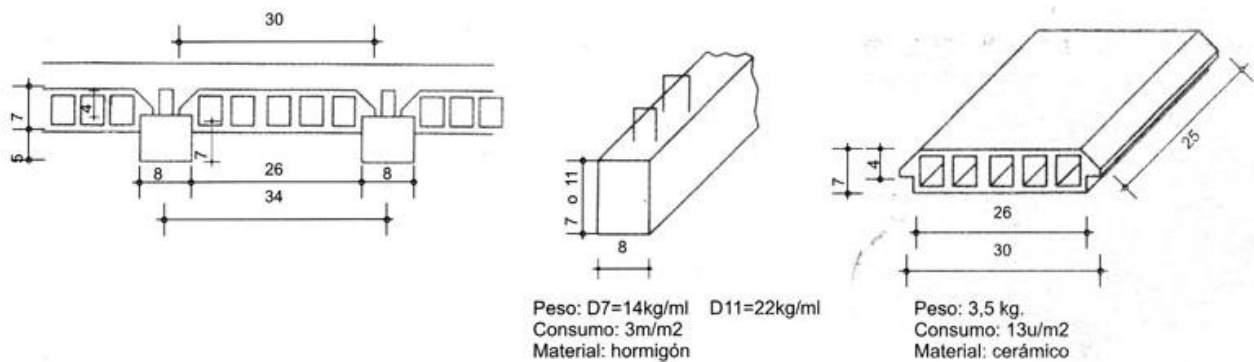
	L	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0						
ENTREPISOS COMUNES AZOTEAS pp + 300 kg/m ²	e	3	3	4	5	4	4	4	5	4	5	7	6				
	Bovedilla	10	10	10	10	15	10	15	10	20	15	20	15	20			
	Vigueta	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2			
	peso propio	250	250	275	300	325	275	325	300	400	350	400	350	425	400	450	
TECHOS INCLINADOS HASTA 30° q = 550 kg/m ²	e	3	3	3	4	4	4	4	5	5	7	5	5	5	7		
	Bovedilla	10	10	10	10	10	10	10	15	10	15	10	20	15	20	15	
	Vigueta	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	
	peso propio	250	250	250	275	275	275	275	325	300	350	350	425	350	425	400	
BANOS DEPOSITOS PARA 500 kg/m	e	5	5	5	5	5	7	7	8	5	5	8	8				
	Bovedilla	10	10	15	10	15	10	15	10	20	15	20	15	20			
	Vigueta	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	2	2				
	peso propio	300	300	350	300	350	300	400	350	500	350	425	425	500			

h) Sistema Stalton Porteña

Permite salvar luces de hasta 5,80m. El sistema está compuesto por viguetas y bovedillas cerámicas.

Se deberá realizar una carpeta de compresión de 4 a 8 cm con un hormigón de 200 kg/cm² de resistencia y una malla de 34 x 34 cm, apuntalando cada 2m.

El ancho mínimo del pilar de apoyo deberá ser de 10cm.



Muestras del sistema Stalton porteña en las oficinas de venta de la planta I de Hopresa

VIGAS

En la fábrica Flasur las vigas pretensadas son de hormigón de alta resistencia. Soportan cargas de paneles de cubierta, de entresijos o puentes grúa y se fabrican de distintas alturas y tamaños de acuerdo a los requerimientos del proyecto.

Para techos se utilizan vigas VP y para entrepisos vigas rectangulares, vigas L y vigas T. Para el sistema Gaviota se pueden utilizar vigas VC que son vigas canalón para la evacuación de pluviales.



Vigas rectangulares en el banco de vigas pretensadas de Flasur



Dos vigas rectangulares con la armadura de espera y platinas para soldar previstos

La utilización de vigas pretensadas conlleva secciones más finas y menores alturas que las vigas convencionales de hormigón para una misma luz a salvar. Como vemos en la tabla a continuación, si tomamos a modo de ejemplo una Viga VP 100 que tiene 1 m de altura, vemos que esta podrá salvar una luz de 20m. Para una viga de hormigón armado de 1 m de altura la luz a salvar no será mucho mayor a los 10 m. Por lo que la altura de una viga pretensada disminuye en un 50% de la altura de una viga de hormigón armado.



Viga rectangular con agarres y hierros de unión previstos



Viga I en su molde desarmado

Características generales de las vigas prefabricadas más utilizadas

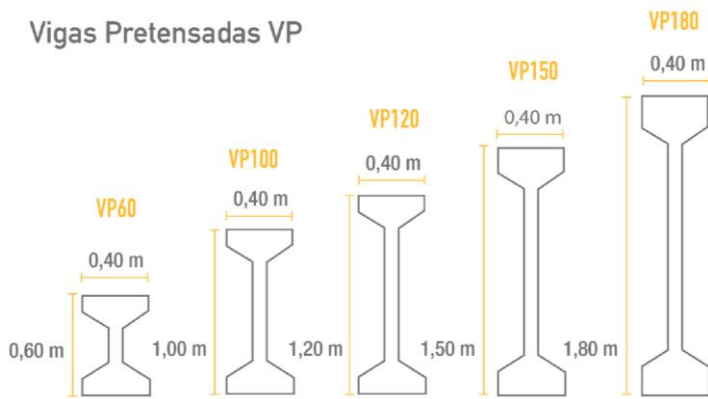
Viga	Tipo	Luz máxima (m)	Altura (cm)
Capriata (de doble pendiente)	Pretensada	33	Variable
Viga I , VP150	Pretensada	25	150
Viga I , VP 100	Pretensada	20	100
Rectangular	Pretensada o pasiva		De 20 a 100
Viga L	Pretensada o pasiva		De 30 a 100
Viga T invertida	Pretensada o pasiva		De 30 a 100

Tipos de Vigas

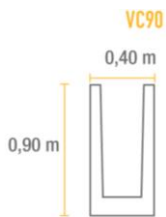
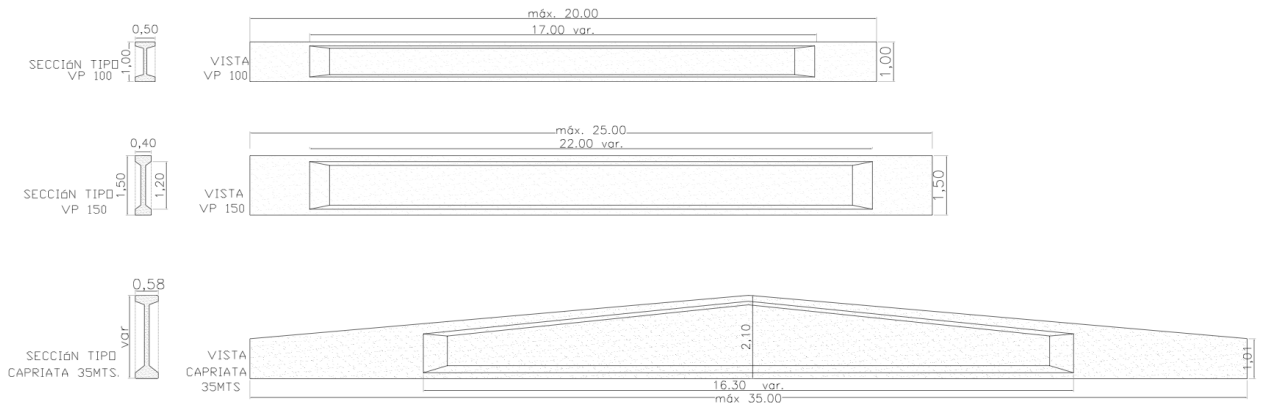
- a) Vigas VP: Capriata o Sección I
- b) Vigas VC: Sección U

- c) Vigas VR: Sección rectangular
- d) Vigas sección T
- e) Vigas sección L

Vigas Pretensadas VP

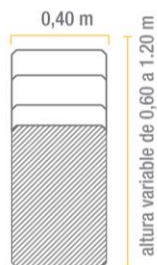


Denominación	Longitud máx. (m)
VP 60	10,00
VP 100	15,00
VP 120	20,00
VP 150	25,00
VP 180	30,00
Viga capriata de sección variable	20,00



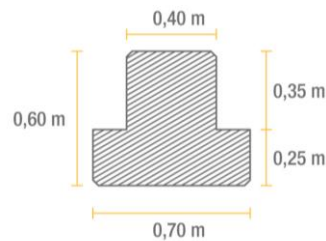
Denominación	Longitud máx. (m)
VC 90	10,00

SECCION VR

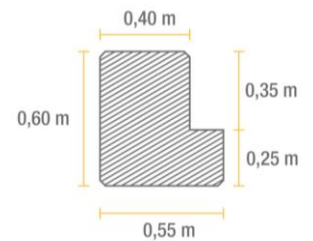


Denominación	Longitud máx. (m)
VR 40 X 60 A 40 X 120	12,00

SECCION T



SECCION L



3.2.2. Hormigón postesado aplicado a piezas estructurales.

El postesado puede emplearse tanto para elementos fabricados en planta, a pie de obra o colados en sitio. Se utiliza para lograr que las estructuras sean más livianas, salven mayores luces y para cargas más importantes, por lo que las aplicaciones más usuales son para vigas de grandes dimensiones, dovelas para puentes, losas con pretensionado bidireccional, vigas hiperestáticas y tanques de agua, entre otros.



Cables de postesado en puentes



Ejecución de postesado en obra de ingeniería

VIGAS

Debido a que el postesado requiere de un gato portátil y anclajes permanentes; su costo hace que sea empleado para piezas de grandes luces, pesadas, cuyo transporte no es económico. Por esta razón, la utilización de vigas postesadas es apropiada cuando existen altas exigencias, utilizándose mayormente para obras de ingeniería civil (como puentes, rutas aéreas, etc.), más que para obras arquitectónicas.



Uso de vigas postesadas en puentes.



Colocación de ductos en viga postesada

LOSAS

Consisten en losas coladas en sitio, postesadas mediante el uso de cables de acero o torones de alta resistencia dispuestos según un trazado parabólico, y anclados a través de cuñas a sus anclajes extremos. Una vez colada la losa, cada cable es tensado en forma independiente

según las indicaciones del proyecto, generando de esta manera una compresión en toda su sección, y un balanceo de las cargas en el centro de éstas.

La flexibilidad del sistema ofrece mejores posibilidades creativas para el diseño, permitiendo mayores luces, plantas libres y estructuras más livianas. La utilización del postesado en losas supone una cierta limitación en las actuaciones, una vez terminada la estructura: su uso requiere que se haya definido, con cierta precisión, el paso de instalaciones para, de esta forma, poder plantear una disposición de cables compatible, que evite actuaciones posteriores. Sin embargo siempre es posible plantear un trazado de cables concentrado sobre pilares, por ejemplo, que permita dejar extensas áreas libres de cables, y consecuentemente, susceptibles de ser perforadas.

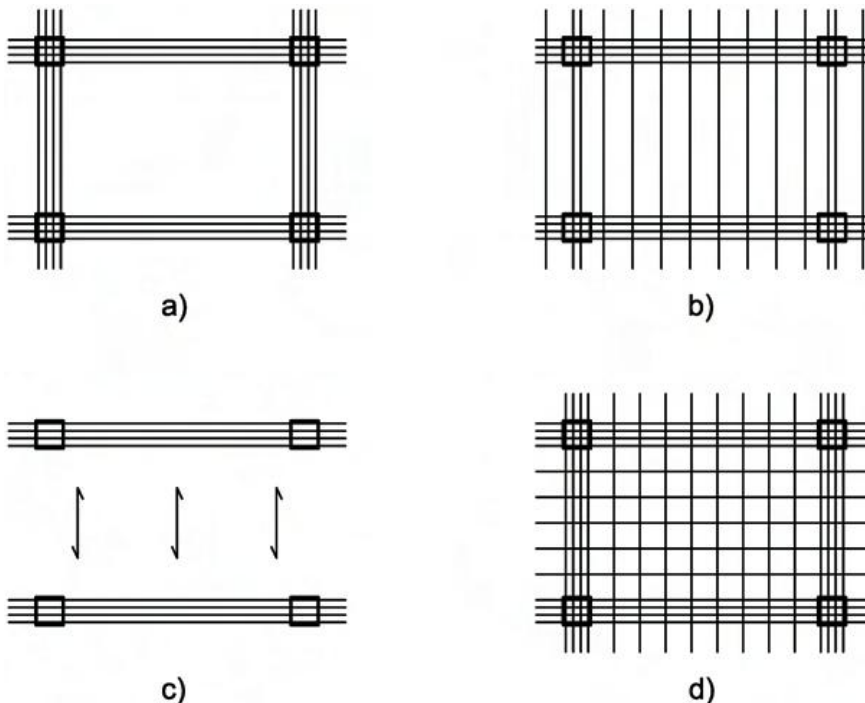
Procedimiento constructivo

El procedimiento constructivo comienza con la instalación del sistema de encofrado, y una vez finalizado se inicia la instalación de la armadura tradicional y los cables de postesado en forma simultánea. El hormigonado es igual al de una losa tradicional, donde un sistema de bomba puede ser utilizado.

El procedimiento de tesado se ejecuta una vez que el hormigón ha alcanzado la resistencia suficiente, período que se cumple en promedio al tercer día de vertido el hormigón. Luego de tesada la losa, ésta es capaz de soportar las cargas para la que fue diseñada, por lo que se puede retirar la totalidad del encofrado. Finalmente se corta el resto del cable que sobresale de la losa, y se sella la cavidad mediante un mortero.

Disposiciones de armado

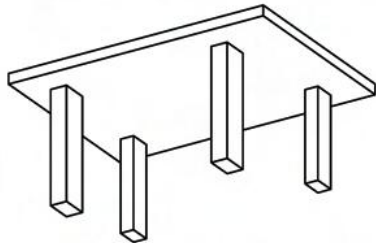
Para la distribución de los cables en planta existen distintas posibilidades:



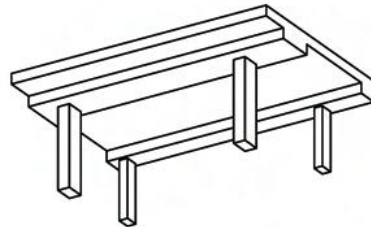
Las soluciones a) y d) son las situaciones extremas para losas de luces similares en ambas direcciones. En general, la a) tiene más ventajas tanto desde el punto de vista resistente como al permitir dejar un espacio muy importante de la estructura sin cables, con las ventajas que ello conlleva en relación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

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

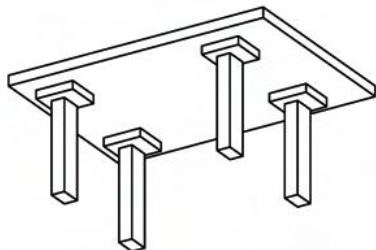
Tipologías usuales de losas postesadas



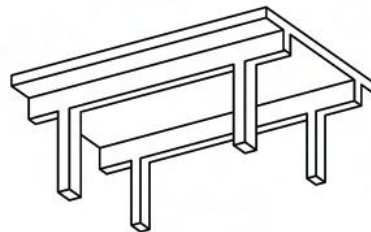
Losa maciza de canto constante



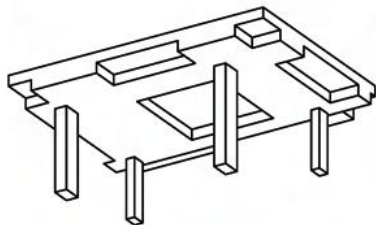
Losa unidireccional con vigas planas



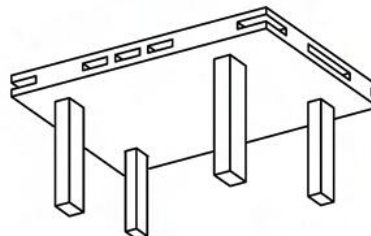
Losa maciza de canto constante con capiteles



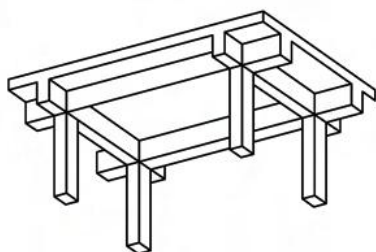
Losa unidireccional con vigas de canto



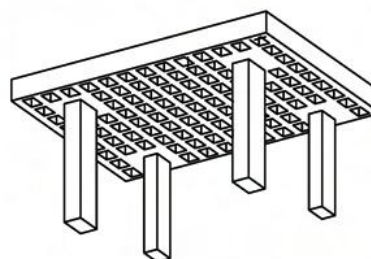
Losa bidireccional con vigas planas



Losa aligerada de canto constante



Losa bidireccional con vigas de canto



Forjado reticular postesado

Losas sin vigas

Si bien las losas sin vigas postesadas, es decir, losas apoyadas directamente sobre pilares, surgieron en EEUU a mediados del SXX, en Uruguay durante muchos años se limitó su uso a edificios industriales o proyectos de ingeniería civil. Desde hace unos años han comenzado a difundirse en nuestro país las estructuras con losas sin vigas aplicadas a viviendas, oficinas y estacionamientos, utilizándose para grandes emprendimientos edilicios como World Trade Center, Hotel Sheraton Montevideo, Coral Tower en Punta del Este, etc.

Este sistema permite ampliar considerablemente la capacidad resistente de las losas sin aumentar el espesor ni la cuantía de acero. Se debe destacar también que al eliminar las vigas tradicionales estáticas, se logra una mayor altura útil de piso a piso, dejando mayor espacio para la instalación de ductos y servicios. En este caso el procedimiento se simplifica en forma considerable, ya que al no contar con vigas, el encofrado se transforma en una superficie plana acortando tiempos de ejecución.



Instalación de Cables en losa postesada



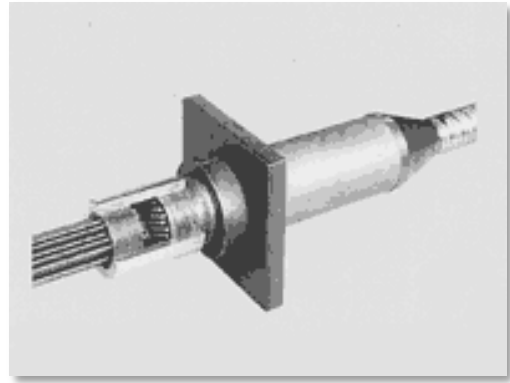
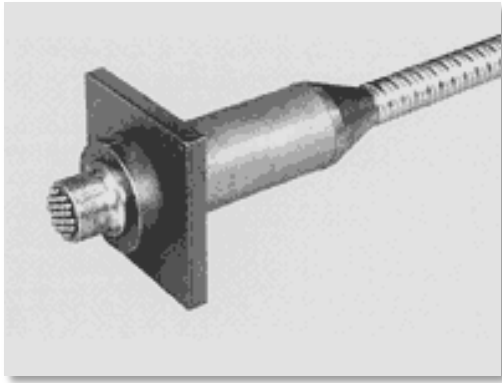
Placas de anclaje de los cables de postesado

Tipos de anclaje

Las cabezas de anclaje son de tipos muy diversos, según las necesidades de proyecto, y se pueden englobar en 2 grandes grupos: anclajes móviles, por medio de los cuales se realiza el tesado de los cables, y anclajes fijos. De acuerdo a las condicionantes de cada proyecto, se pueden alternar anclajes fijos y móviles o hacer un extremo enteramente fijo y otro móvil desde el cual se tesan los cables.

Los tipos de anclaje utilizados para losas postesadas han ido variando a lo largo del tiempo. En el mercado uruguayo el primer sistema utilizado fue el BBRV patentado en 1948 por la empresa *BBR Holdings*, empresa líder en hormigón postesado a nivel mundial. El anclaje móvil más característico es el tipo "B", formado por un disco roscado dentro de una trompeta, en el cual la cabeza de anclaje se apoya por intermedio de una tuerca sobre una placa que queda embebida en el hormigón. Existen dentro de este sistema otros tipos de anclajes móviles como el "J", que resulta más económico, o el "C", utilizado para cables de fuerzas elevadas, etc.

Dentro de los anclajes fijos, el "S" resulta el más económico y conveniente en la mayoría de los casos, quedando sus alambres íntimamente ligados al hormigón gracias a su forma de abanico. En caso de no haber suficiente espacio físico para este tipo de anclaje, este puede ser sustituido por uno tipo "F", tipo "E", u otro que sea conveniente.



Sistemas de anclaje BBRV: Formados por placas de acero que se apoyan en el hormigón y reciben barras roscadas que luego se ajustan mediante tuercas.

En 1972 fue desarrollado por la misma empresa el sistema CONA y aplicado por representantes mediante licencia alrededor de todo el mundo, siendo hoy en día el más utilizado en Uruguay. Este sistema está formado por hilos que pasan por cuñas de modo que el esfuerzo de pretensionado se transmite por fricción. Estos cables de acero trenzado son por lo general de 1/2" y pueden ser multi-torones o mono-torones dependiendo del caso, utilizándose cables individuales en losas y cables múltiples en vigas y puentes.



Esquema de componentes del sistema CONA de BBR

Anclaje activo multi-torón CONA



Sistema de cuñas mono-torón en fábrica Hopresa



Sistema de cuñas multi-torón en fábrica Hopresa

4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE HORMIGÓN PRETENSIONADO

A modo de resumen de los temas planteados en este trabajo, se reorganizan éstos en dos grandes grupos de ventajas e inconvenientes: generales y específicos.

Se plantean en primer lugar las ventajas y desventajas del conjunto de piezas de hormigón pretensionado, sin diferenciar entre piezas pretesadas o postesadas, ya que debido a sus principales características se pueden englobar en un mismo grupo. En segundo lugar diferenciaremos las ventajas y desventajas de cada uno de estos sistemas.

4.1 GENERALES

Ventajas del hormigón pretensionado:

- Mejora el comportamiento estructural.
- Conlleva un uso más eficiente de los materiales, por lo que permite reducir el peso y el costo total de la estructura.
- Mayor resistencia frente a fenómenos de fatiga.
- Menores deformaciones.
- Disminuye la fisuración del hormigón, aumentando su vida útil.
- Permite el uso óptimo de materiales de alta resistencia.
- Importancia de luces que salvan.
- Se utiliza una baja cuantía de acero, sobretodo una baja cuantía de armadura pasiva.
- Se obtienen elementos más eficientes y esbeltos, con menos empleo de material. En vigas, por ejemplo, se utilizan alturas del orden de $L/20$ a $L/23$, donde L es la luz de la viga, a diferencia de $L/10$ utilizado en el hormigón armado.
- Disminuyen las alturas y secciones de los elementos.
- Menos peso para pilares y fundaciones.
- Rapidez de ejecución.
- Poco personal en obra.

Desventajas del hormigón pretensionado:

- La falta de coordinación en el transporte de los elementos pretesados o de los materiales y herramientas para el postesado, puede encarecer el montaje.
- En general, la inversión inicial es mayor por la disminución en los tiempos de construcción.
- En ocasiones, se requiere también de un diseño relativamente especializado de armaduras, uniones y apoyos.
- Se debe planear y ejecutar cuidadosamente el proceso constructivo, sobre todo en las etapas de montaje y colados en sitio.
- El cálculo suele ser más complejo.

4.2 ESPECÍFICAS

Ventajas en piezas pretesadas:

- La producción en serie en plantas permite mayor control de calidad y disminución de costos.

- Rapidez de ejecución al atacarse al mismo tiempo varios sectores o construirse simultáneamente distintas partes de la estructura; esto en general conlleva importantes ventajas económicas en un análisis financiero completo.
- Cronogramas precisos de fabricación y montaje.
- Menor tiempo en el retorno del capital invertido.
- Menor susceptibilidad a variaciones climáticas durante el proceso de fabricación.
- Rastreabilidad del proceso.
- Poco personal en obra lo que reduce la exposición a riesgos.
- Todo el sistema compite con el de estructura metálica.
- Durabilidad.
- Mínimo mantenimiento.
- Alta resistencia del sistema ante inclemencias climáticas y naturales, en comparación con el sistema revestido en chapa.
- Máxima seguridad del sistema ante intento de robos, en comparación con el sistema revestido en chapa.
- El sistema se puede desmontar y relocalizar.
- Ahorro en hormigón, acero, mano de obra y encofrados, ya que el sistema disminuye en forma considerable cada uno de ellos.

Desventajas en piezas pretesadas:

- La falta de coordinación en el transporte de los elementos pretesados, puede encarecer el montaje.
- En general, la inversión inicial es mayor por la disminución en los tiempos de construcción.
- En ocasiones, se requiere también de un diseño relativamente especializado de armaduras, uniones y apoyos.
- Se debe planear y ejecutar cuidadosamente las etapas de montaje en el proceso constructivo.
- Requiere de maquinaria más especializada que el hormigón armado.
- Requiere de mano de obra más especializada que el hormigón armado.
- Menor flexibilidad en el diseño.

Ventajas en piezas postesadas:

- Acortamiento significativo de plazos de ejecución de la obra rústica gracias a rápidos y eficientes programas de construcción. El sistema de encofrado se puede retirar inmediatamente concluido el tesado. Por lo general hay siempre eficientes programas de ejecución debido a que los moldes se deben reusar en niveles superiores.
- Ahorro en hormigón, acero, mano de obra y encofrados, ya que el sistema disminuye en forma considerable cada uno de ellos.
- Integridad estructural superior proporcionada por la continuidad de la losa y cables, con un buen desempeño sísmico.
- Livianas estructuras que permiten disminuir la altura del edificio, reducir las cargas de fundación y aumentar las luces.
- Uniones sencillas y eficientes entre losas, vigas, muros y columnas, que eliminan problemas de juntas entre dichos elementos. En losas sin vigas estas uniones son aún más sencillas ya que al no existir las vigas no hay que ser tan cuidadoso en el plomo de la viga que coincidiría con el plomo del muro.
- Bajos requerimientos de mantenimiento.
- Disminuye la fisuración del hormigón, aumentando su vida útil.

- Mayor firmeza, durabilidad y resistencia al fuego.
- Más eficiente que el hormigón pretensado porque se le da la forma al cable según los momentos, de forma de contrarrestarlos en toda la extensión de la pieza.
- Mayor flexibilidad en el diseño que el hormigón pretensado.
- En el caso de losas sin vigas, al eliminarse las vigas tradicionales estáticas, se logra una mayor altura útil de piso a techo, dejando mayor espacio para la instalación de ductos y servicios. Esto permite resolver problemas de rasante así como, en algunos edificios en altura, agregar pisos adicionales sin modificar la altura total del edificio, o bien, agregar un subterráneo para una determinada profundidad.
- En caso de realizar estos elementos postesados de forma prefabricada, se cumplen varias ventajas nombradas en la lista de ventajas de piezas pretensadas.

Desventajas en piezas postesadas:

- Requiere de maquinaria más especializada que el hormigón sin postesar.
- Requiere de mano de obra más especializada que el hormigón sin postesar.
- El cálculo es más complejo y por lo tanto más caro.
- El sistema es más caro que el de hormigón pretensado. Los anclajes no se recuperan y quedan perdidos en el hormigón. Precisa una vaina (ducto metálico corrugado) e inyección posterior de gran complejidad de ejecución en el caso de no utilizarse el acero engrasado (que ya viene envainado y engrasado de fábrica y es más caro aún). El acero utilizado es un acero especial de “baja relajación” más caro que el acero común.
- Se deberá tener extrema precaución al utilizar acero engrasado en el diseño y ejecución de los anclajes y sus recubrimientos. En este caso los cables no quedan adheridos en ningún punto del recorrido, más que en el principio y en el fin, a través de anclajes pasivos o activos, por lo que cualquier anclaje que se rompa generará un gran desequilibrio estructural y puede llegar a generar el colapso del edificio o sector. Se deberá tener extrema precaución en el diseño de los anclajes y recubrimientos que queden en la caja de ascensores de un edificio o en cualquier elemento arquitectónico que pueda funcionar de chimenea para la propagación de humo y gases calientes en caso de incendio.
- Los códigos sísmicos de algunos países no permiten su uso en zonas sísmicas, por la transmisión de fuerzas producidas por la excitación dinámica. Es lo que se conoce como sistema de losas planas.

5. ANÁLISIS DE PROYECTOS

5.1 VIADUCTO SOBRE ACCESOS AL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE CARRASCO (AIC): SISTEMA DE VIGAS PREFABRICADAS PRETENSIONADAS



El proyecto del viaducto sobre el acceso al Aeropuerto Internacional de Carrasco forma parte del proyecto vial de los Accesos Este a la ciudad de Montevideo realizados en el año 2009. El total del proyecto de esta obra pública fue encomendado a la empresa concesionaria del Aeropuerto (AIC): Puertas del Sur, S.A, con un costo total de 33 millones de dólares. El costo del viaducto fue de 6 millones de dólares dentro de ese total.



Las obras para la construcción del viaducto fueron encargadas a la empresa Ciemsa quien a su vez subcontrató a la empresa Schmidt Premoldeados para el suministro e izaje de todas las piezas prefabricadas y al Ingeniero Ponce para la puesta en obra de los postesados a realizarse, entre otros subcontratos.

5.1.1. Planteo estructural general

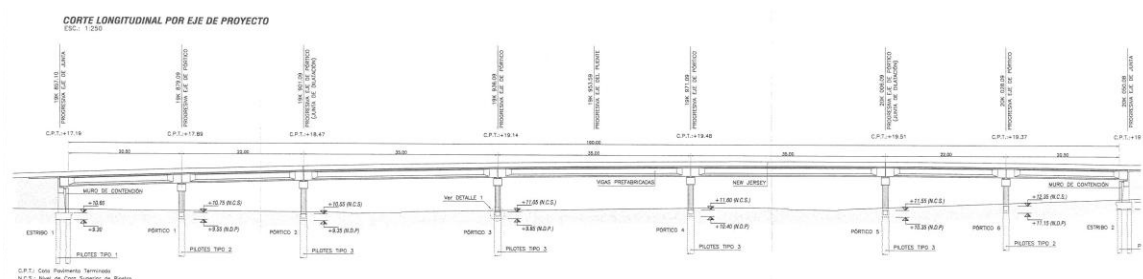
El proyecto del viaducto consiste en un puente que se eleva por encima de la rotonda de acceso al Aeropuerto y permite la continuidad de la ruta 101.

Consiste en la sucesión de seis pórticos y dos estribos, uno en cada extremo. Cada pórtico se conforma por cuatro pilares circulares arriostrados entre sí bajo tierra y dos vigas dintel sobre las que descansan los extremos de ocho vigas prefabricadas en cada una.

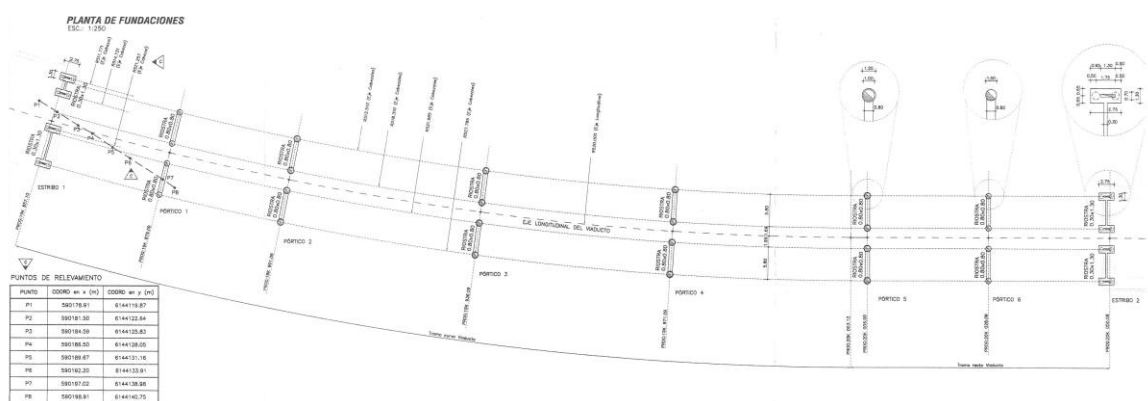
Estas vigas pretensionadas poseen la particularidad de ser vigas postesadas prefabricadas. Obtienen de esta forma la doble ventaja de ser vigas realizadas en paralelo a la obra en moldes reutilizables, como en el caso del hormigón pretesado, y al mismo tiempo no requieren de

fuertes puntos de anclaje que soporten la tensión de los cables, ya que éstos se tesan luego del vertido del hormigón. El costo de estas vigas no es tan bajo como el costo de una viga pretensada estandarizada, ya que sus moldes fueron específicamente diseñados para este proyecto, pero al menos se lograron estandarizar las 56 vigas prefabricadas a partir de dos diseños de moldes.

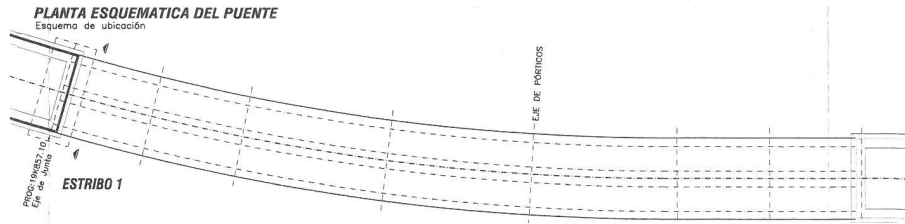
Es una combinación muy inteligente que logra sacar el mayor provecho posible de las ventajas de ambos sistemas. Es una buena muestra de cómo seguirán evolucionando estos sistemas constructivos.



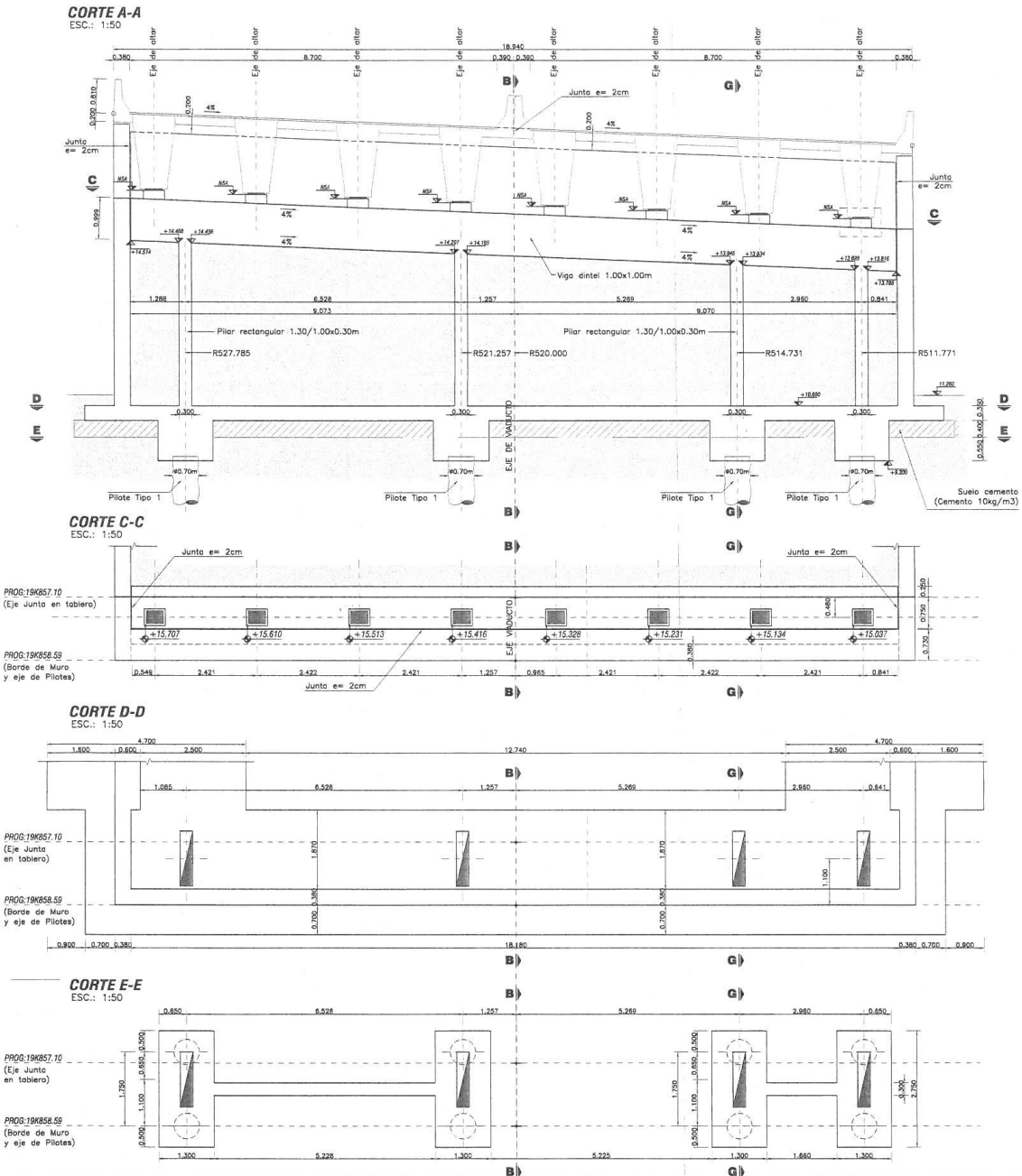
Corte longitudinal por el eje del proyecto. Se ven los 6 pórticos, los 2 estribos en los extremos y las vigas prefabricadas apoyadas sobre ellos. Ver plano a mayor escala en anexo.



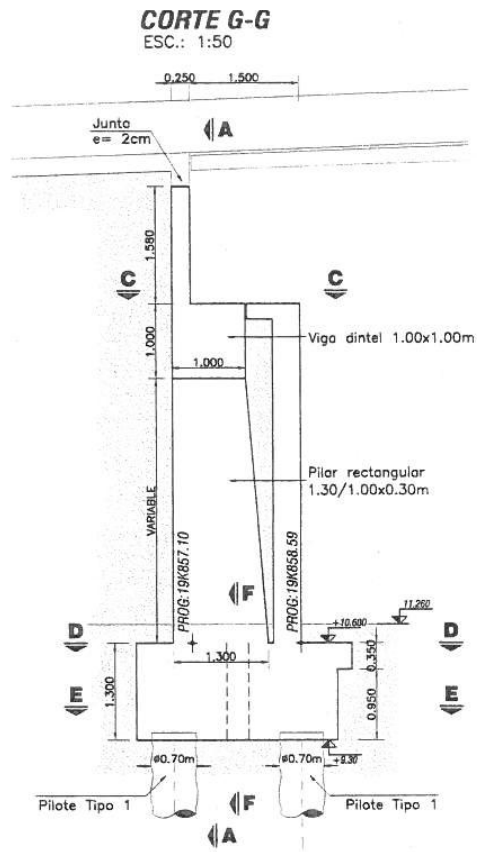
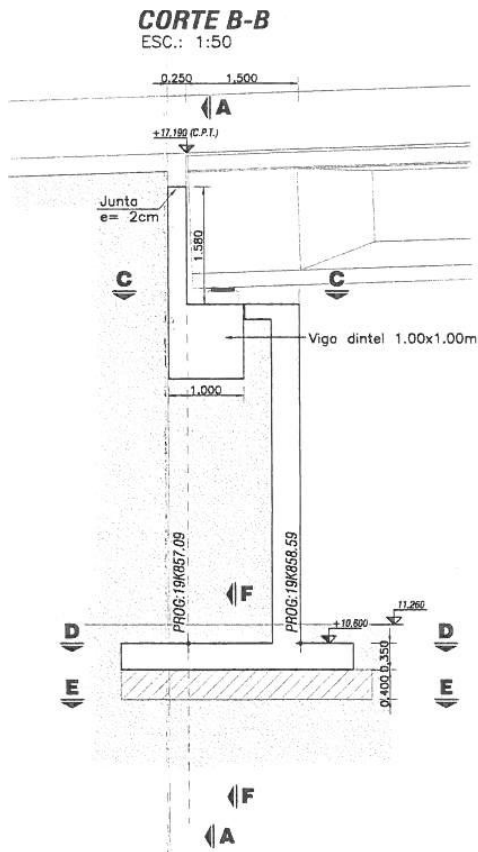
Planta de fundaciones. Ver plano a mayor escala en anexo.



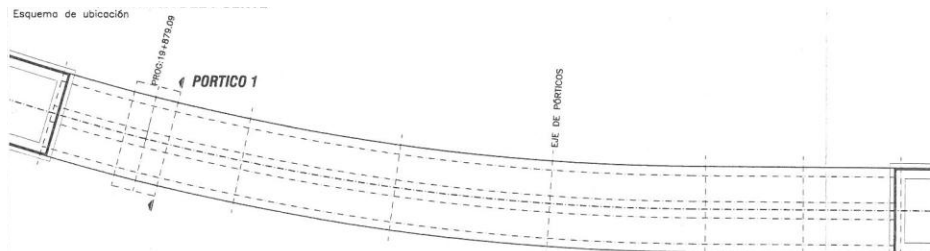
Planta esquemática con ubicación del estribo 1.



Geometría del estribo 1. Ver plano a mayor escala en anexo.



Geometría del estribo 1. Ver plano a mayor escala en anexo.

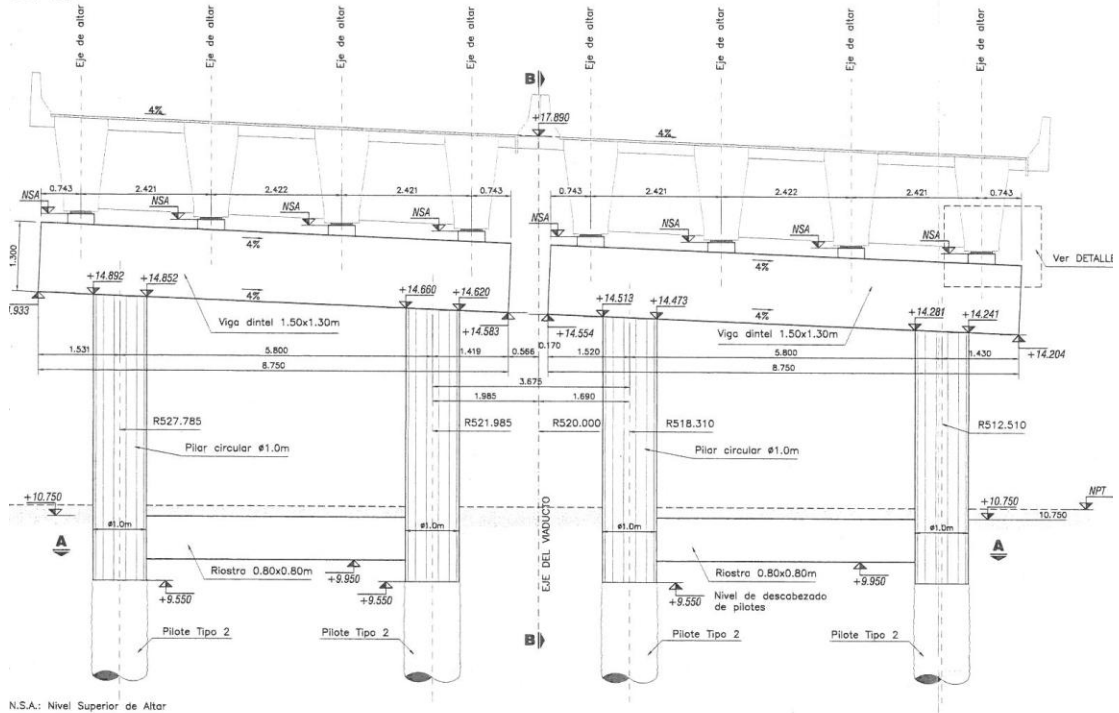


Planta esquemática con ubicación del pósito 1.

PORTICO N°1 - GEOMETRIA

VISTA FRONTAL

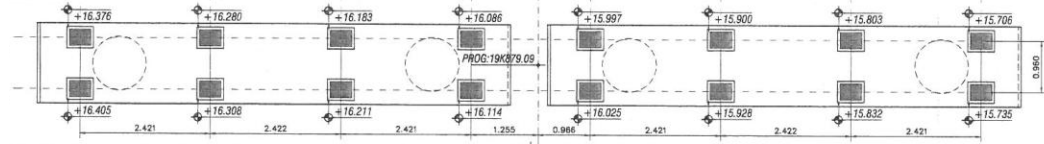
ESC.: 1:50



N.S.A.: Nivel Superior de Altar

PLANTA A NIVEL DE CARA SUPERIOR DE VIGA

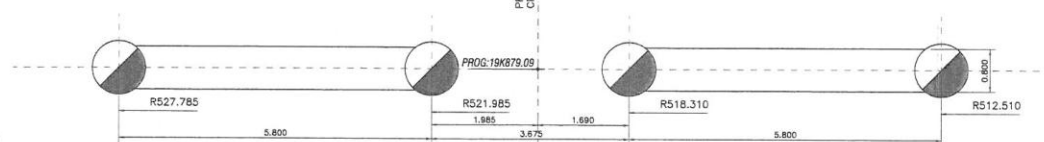
ESC.: 1:50



Los niveles indican la cara superior del altar

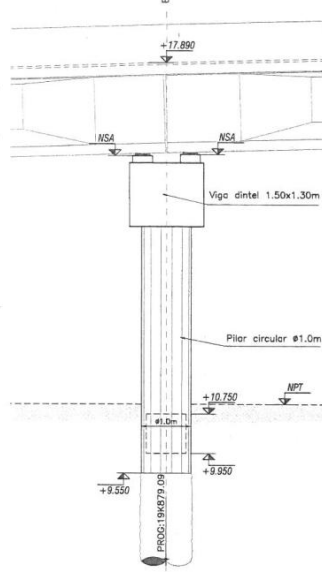
CORTE A-A

ESC.: 1:50



VISTA B-B

ESC.: 1:50



Geometría del pórtico 1. Ver plano a mayor escala en anexo.

El proyecto estructural es una combinación de varios sistemas, donde se utilizan vigas prefabricadas postesadas, unidas luego entre sí a través de otro sistema de cables postesados; otras vigas de mayor tamaño realizadas a pie de obra, ya que era imposible transportarlas; otras piezas premoldeadas sin pretensionar y otras partes realizadas con hormigón armado tradicional.

5.1.2. Determinantes de la elección del sistema estructural

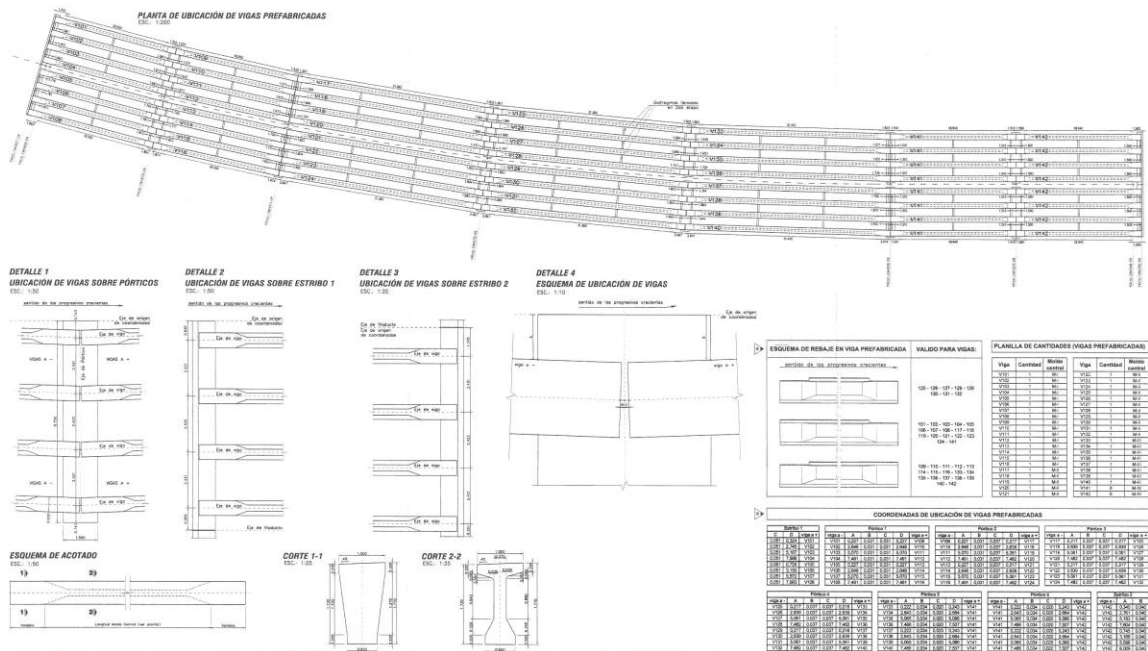
La determinante primordial que definió la elección del sistema estructural de vigas prefabricadas postesadas fue la rapidez. Con el uso de este sistema, se ahorró un enorme período de tiempo que hubiera llevado la realización de los encofrados, la confección de armaduras y la colocación de los cables, el apuntalamiento, el hormigonado y fraguado y la posterior puesta en tensión de los cables. Todo este trabajo se realizó paralelamente al tiempo que comenzó la obra, por lo que se pudo ahorrar un tiempo considerable.

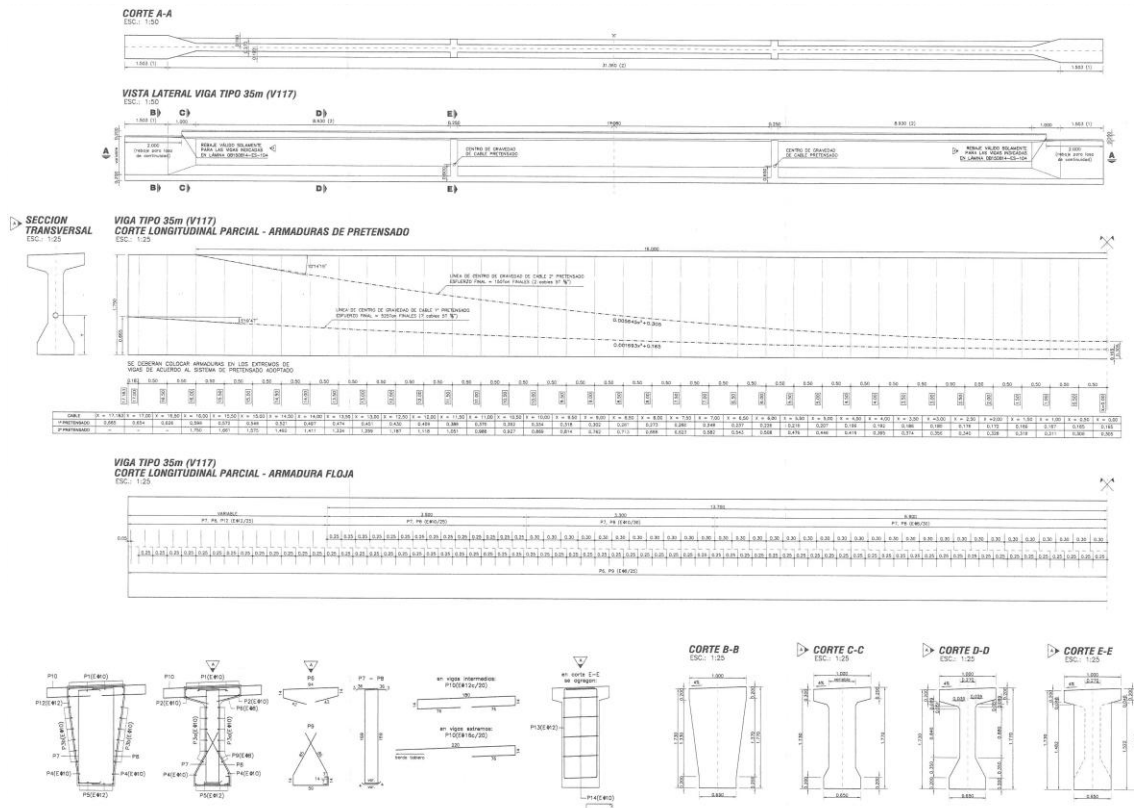
Se realizaron en la fábrica de Schmidt, las vigas de 22 metros de longitud, pero no se pudieron realizar de la misma forma las vigas de 35 metros, ya que su tamaño no permitía su transporte. Por lo tanto, se tuvieron que hacer a pie de obra. Desde el punto de vista económico, fue menos costoso utilizar un sistema de vigas postesadas ya que el tiempo y las grandes cargas fueron las causas determinantes de la elección del sistema. Al reducir en tiempo y utilizar estructuras más eficientes, se redujo en mano de obra, tamaño de las piezas y materiales, y por lo tanto se redujo en costo. De esta forma, el elevado precio de este eficiente sistema, en el largo plazo de la obra resultó menos costoso que la utilización de un sistema tradicional, gracias a estas compensaciones.

5.1.3. Elementos del sistema y puesta en obra

Se utilizó un hormigón con una resistencia característica mayor a 250 kg/cm², con un contenido mínimo de cemento de 300kg/m³ y una relación agua cemento no mayor a 0,5. El acero empleado tenía un ADN 500 (límite de fluencia de 5000 Dan/cm²), con una tensión de rotura a la tracción de 550 MPa. Los recubrimientos en las vigas fueron de 3 cm.

El total de la obra del viaducto se realizó en un plazo de 7 meses. Al mismo tiempo de iniciada la obra, comenzó la producción de las 32 vigas prefabricadas de 22m en la planta de Schmidt, la cual conllevó tres meses aproximadamente. En paralelo a esto y a la etapa de pilotaje y la construcción de los cabezales, pilares y dinteles de los pórticos y estribos, comenzó también la producción de las 24 vigas prefabricadas pretesadas de 35m de longitud a pie de obra.

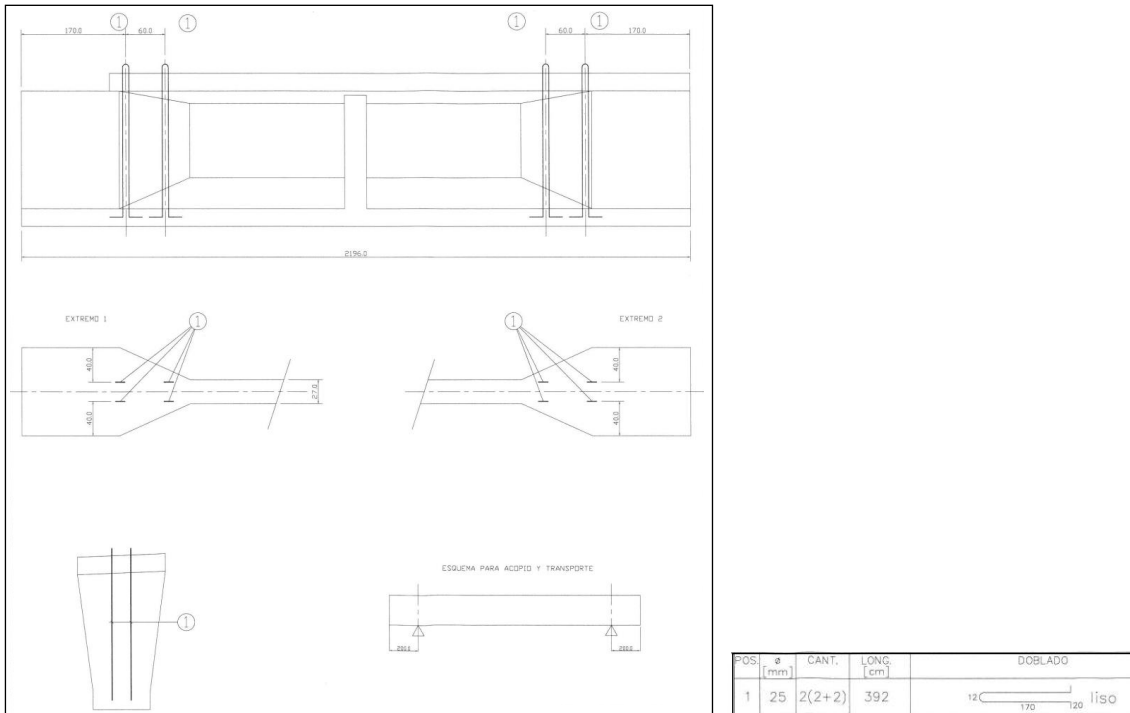




Cortes longitudinales y vista lateral de las vigas de 35m. La viga se ensancha en 2 puntos ubicados a una distancia de un tercio de la luz, por cuyos orificios pasarán los cables postesados que unirán cada grupo de 4 vigas. Cortes transversales de ambas vigas. Observar palabra “pretensado” en el plano = pretensionado (postesado). Ver plano a mayor escala en anexo.

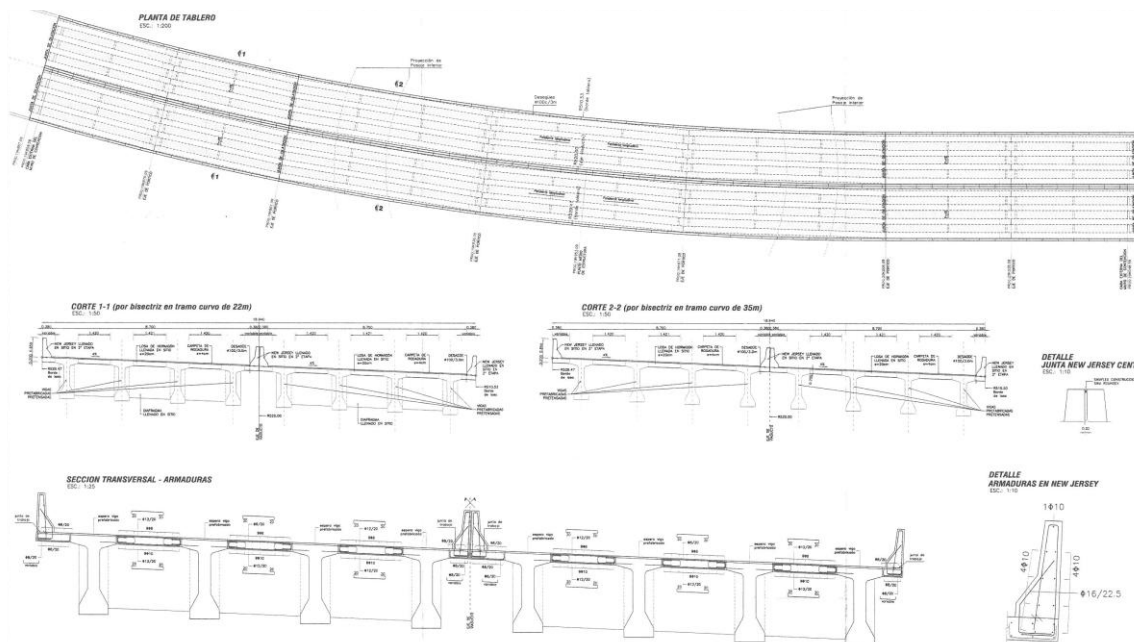
Una vez colocado cada grupo de 4 vigas prefabricadas sobre dos vigas dintel, se unieron todas por cables enhebrados en los orificios previstos en las vigas (nombrados en los 2 planos anteriores) y luego se postesaron. Una de las tareas más engorrosas en todo el proceso de la obra, para la cual se tuvo que consultar al Ingeniero Ponce fue el llenado de la vaina con lechada, ya que había mucha cantidad de cables dentro de cada vaina y era muy difícil verificar con el cálculo de volúmenes si la lechada había terminado de llenar todos los espacios vacíos.

La sexta semana después del inicio de la obra se comenzó con el izaje y posicionamiento de las primeras vigas prefabricadas sobre la estructura. El total de esta tarea se realizó en un período de 20 semanas (4 meses y medio). En la etapa de izaje surgieron 2 imprevistos, ya que cedió el suelo en dos momentos con el peso de las vigas de 35m y se cayeron dos grúas en el momento de su traslado. En ninguno de los casos hubo ningún herido. En uno de ellos se rompió la viga, la cual tuvieron que reparar.



Puntos de anclaje para izaje y transporte de vigas

La semana posterior al comienzo del posicionamiento de vigas (séptima semana), se inició la construcción de la losa tablero que conforma la superficie continua de la ruta. Consiste en una losa de hormigón de 20cm llenada en sitio, colmando los espacios longitudinales de 1,42m de ancho entre viga y viga, y las superficies sobre los pórticos donde se unen las cabezas de las vigas prefabricadas.



Planta y cortes de losa tablero y vigas prefabricadas intercaladas. Ver plano a mayor escala en anexo.

En el tercer mes de iniciada la obra (décima semana) comenzaron la realización de las barandas de hormigón tipo vigas, llenadas en sitio. Los últimos dos meses de la obra se realizó el sobrepiso que es una carpeta de rodadura de 4cm de espesor y se culmina la obra con los muros de contención iniciados en la quinta semana.

5.1.4. Integración con los acondicionamientos y las terminaciones

En las piezas prefabricadas se dejaron huecos previstos para el pase de instalaciones, lo cual no causó ningún inconveniente al ser planteados con antelación. El resto de instalaciones fueron colocadas colgantes como suele realizarse en los puentes.

5.1.5. Unión con otras piezas estructurales no pretensionadas

La utilización de piezas pretensionadas no genera ningún problema adicional a la hora de unirse con otras piezas estructurales. Las vigas prefabricadas fueron simplemente apoyadas sobre unas piezas de espera de forma cuadrada que descansan sobre las vigas dintel de cada pórtico, denominados altares. Se utilizaron como unión entre estos altares y las vigas, unas piezas de neopreno formadas por goma y chapas metálicas.

Hoy en día queda pendiente un problema a solucionar en este viaducto: el neopreno utilizado tiene forma de prisma rectangular y no se tuvo en cuenta el 4% de inclinación de peralte de la vía; lo que, a largo plazo, derivará en un problema en estos puntos. La solución a este inconveniente que no fue previsto con anticipación y hoy va a causar grandes esfuerzos repararlo, será, en el corto plazo, levantar todo el puente con más de 60 gatos y llenar todas estas cuñas bajo las vigas, de forma que transmitan las cargas de manera uniforme sobre las superficies de neopreno.

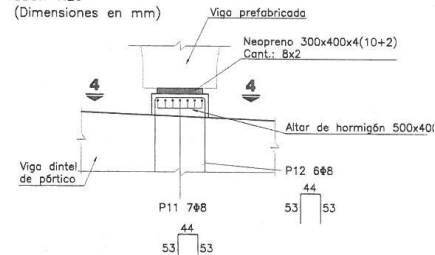


Pieza de neopreno sobre altar

DETALLE 1: GEOMETRIA Y ARMADURAS ALTAR

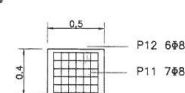
ESC.: 1:25

(Dimensiones en mm)



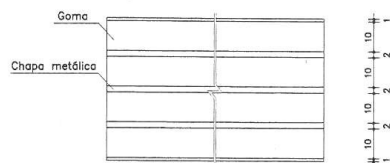
CORTE 4-4

ESC.: 1:25



NEOPRENO

(Dimensiones en mm)



Cada grupo de cuatro vigas apoyadas entre dos vigas dintel son unidas por dos diafragmas colocados transversalmente al eje de las vigas y por un manojó de cables posteriormente tensados, como se mencionó anteriormente.

5.1.6. Previsiones frente a incendios

No se requirió de ningún tipo de previsión adicional frente a incendios.

5.2 WTC AVENIDA (dentro del complejo World Trade Center Montevideo): SISTEMA POSTESADO DE LOSAS SIN VIGAS

El World Trade Center Montevideo es un complejo edilicio con destino empresarial situado en el barrio de Buceo, obra de los arquitectos Isidoro Singer, Ernesto Kimelman y David Ruben Flom. Comenzó con la puesta en marcha de la torre WTC 1, de 22 pisos y 17.100 m², inaugurada en 1998. Ese mismo año, se inauguró el **WTC Avenida** (edificio a estudiar), de dos pisos y 5.600m² de construcción, para ser destinado a locales comerciales de planta baja y oficinas, ubicado longitudinalmente sobre la calle Luis Alberto de Herrera. Luego en 2002 se inauguró la torre WTC 2, gemela de la WTC 1, y en 2009 el WTC 3, edificio de 19 pisos y 27.000 m², destinado a oficinas y locales comerciales en la planta baja. Además se inauguró el WTC Plaza, de dos pisos y 6.300 m², con el fin de constituir locales gastronómicos en la planta baja y la Plaza de las Torres, con 4.200m² de extensión.



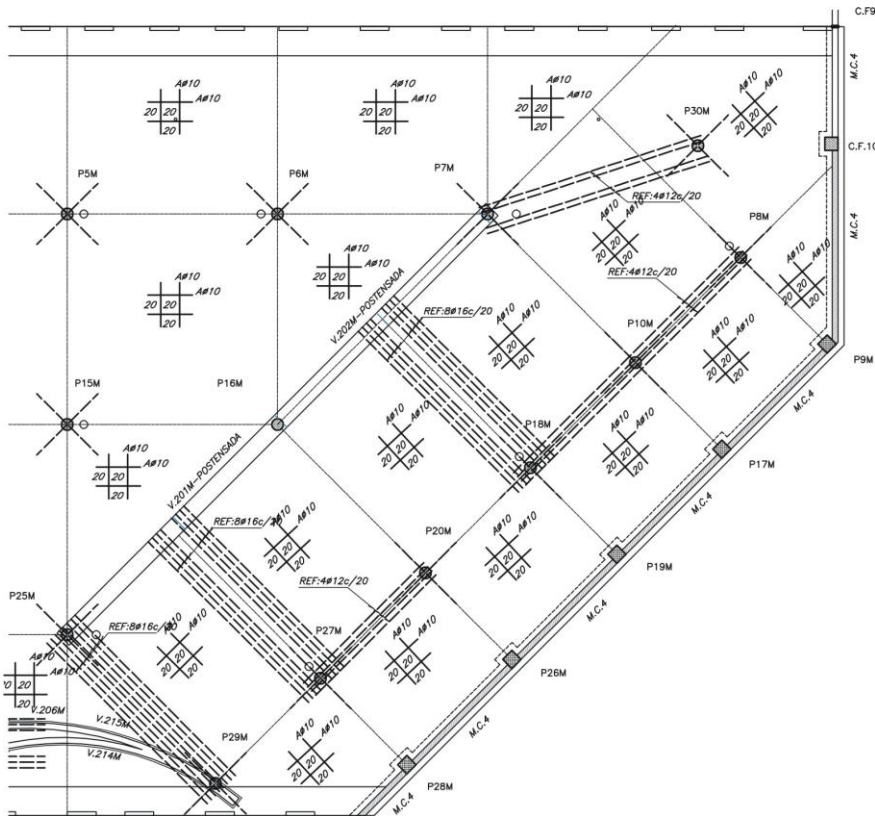
5.2.1. Planteo estructural general

El edificio WTC Avenida consta de 2 plantas de oficinas y un subsuelo destinado a estacionamiento. Dadas las exigencias de flexibilidad y comodidad del proyecto, se opta por la utilización de un sistema de estructura de losas sin vigas postesadas y pilares de hormigón armado.

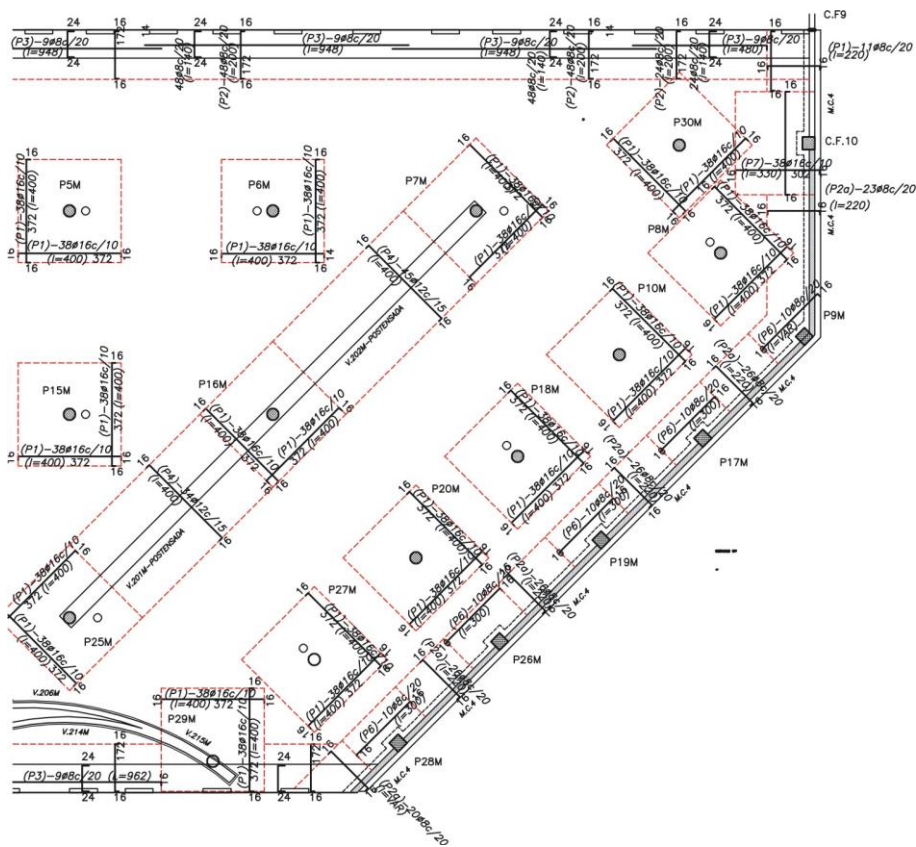
La estructura se diseñó a partir del método europeo de distribución de cables concentrados sobre pilares. El Momento máximo se encuentra en la zona de los pilares, por lo que el 75% de la armadura se concentra allí mejorando la distribución de la carga en el pilar.

Se utilizan cables no adherentes de 0.6" constituidos por 7 alambres envueltos en grasa y con vaina de plástico que tiran cada uno de ellos 21TN. Como armadura pasiva se utilizan hierros $\phi 10$ o $\phi 12$ según el caso, logrando una baja cuantía de acero, controlando la deformación de la losa. También, al estar comprimida la losa, se está dimensionando a preso flexión, por lo que se requiere menos armadura y se produce una menor fisuración. La sección es NETA, no tengo parte inferior con tracción.

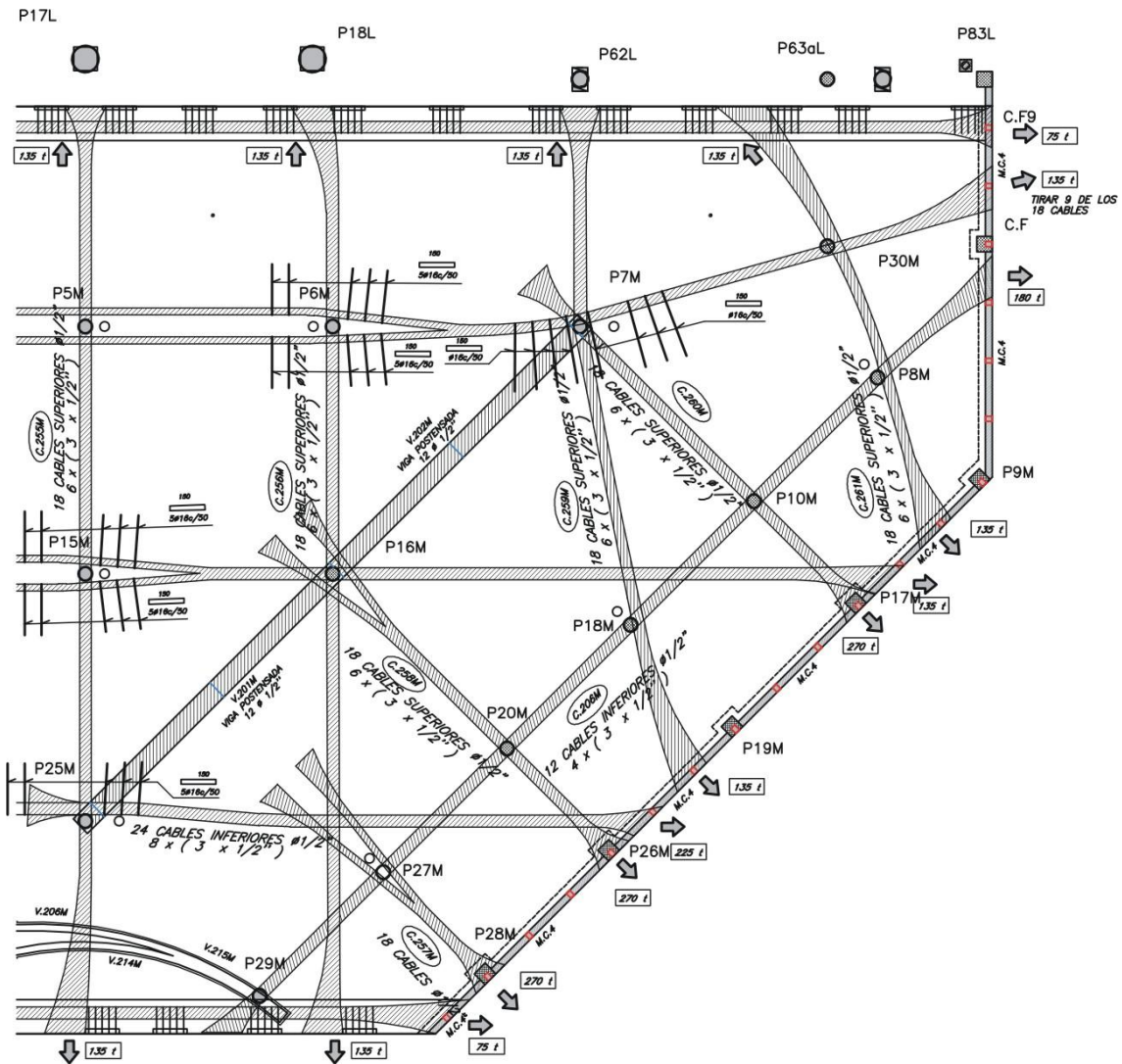
Las losas proyectadas son de 16 cm de espesor, por lo que al disminuir unos 15 cm del cerramiento habitual, se está disminuyendo el peso a las fundaciones así como la cantidad de H.A. a utilizar.



Planta de estructura con armadura inferior de losa sobre nivel de ss.

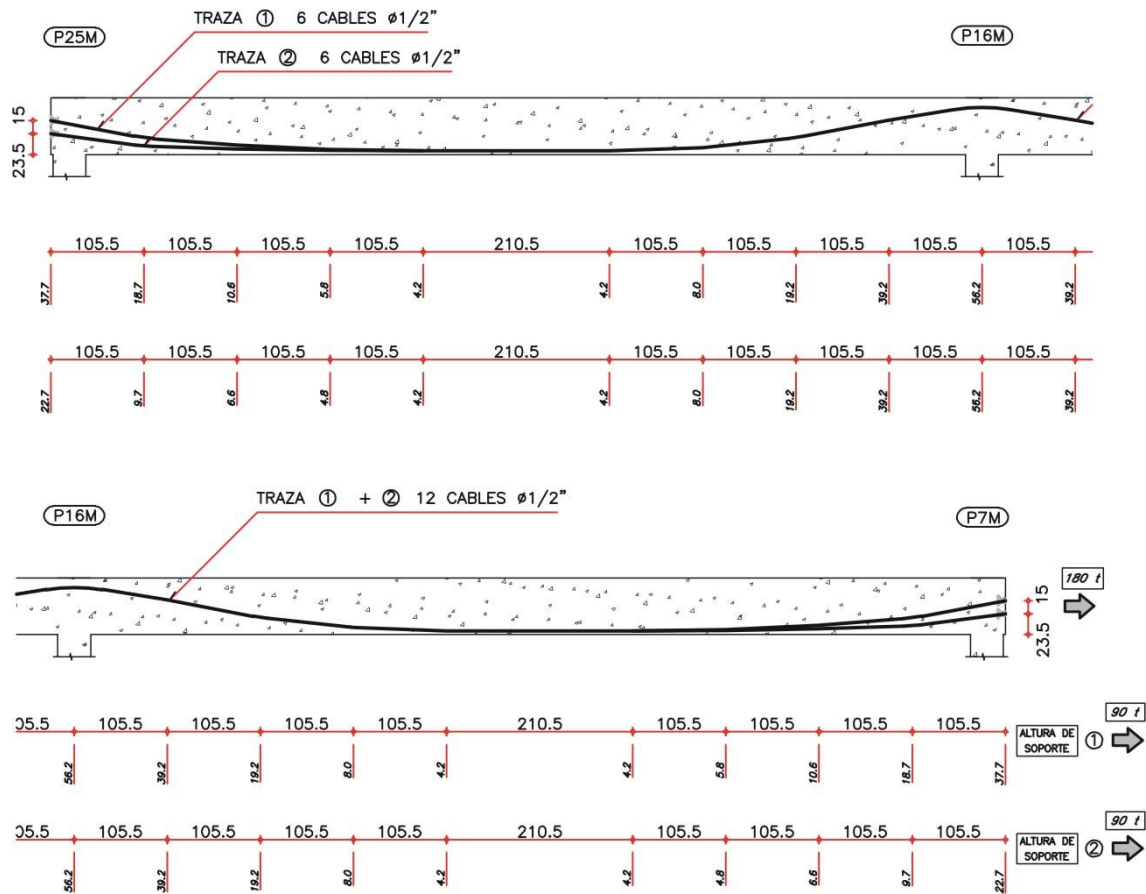


Planta de estructura con armadura superior de losa sobre nivel de SS, concentrada en zona de pilares y en ménsulas debido a las tracciones generadas por los momentos en dichas zonas.



Plano de cables postesados, especificando disposición, cantidades y exigencias. Como se menciona anteriormente, se puede observar la concentración de dichos cables sobre pilares según el método Estadounidense de distribución, otorgando libertad y flexibilidad para la integración de acondicionamientos.

En el sector mostrado en los planos, se complementa la estructura mencionada con una única viga postesada que genera el cambio de ritmo en la ochava del extremo del edificio que da hacia la esquina de L.H.de Herrera y 26 de marzo. Dicha viga sirve de fijación a los cables postesados que aparecen dispuestos diagonalmente con respecto a la cuadrícula formada por el resto del sistema de postesado. Dicha viga aparece entonces por razones de exigencias proyectuales como apoyo al sistema general de losas sin vigas.



Alzado de viga postesada especificando disposición, cantidad, trayectoria, altura y exigencias de los cables.

En este tipo de obras en las que se recurre a la técnica de postesado, se adjunta para la obra junto a los planos habituales del proyecto de estructura, nuevos planos con los trazados, detalles de refuerzos en los anclajes y protocolo de tesado. (Ver anexo para mayor detalle de planos).

5.2.2. Determinantes de la elección del sistema estructural

La elección del sistema de losas sin vigas postesadas se debió a 3 razones fundamentales:

1. El uso destinado al edificio en subsuelo: con una luz libre de 7.5m entre pilares, se aprovechaba a colocar 3 plazas de estacionamiento de 2.50m cada una.
2. Al usar losas sin vigas obtengo mayor libertad de altura, pudiendo generar mayor cantidad de pisos y evitando tener cielorrasos o vigas vistas en el estacionamiento.
3. La velocidad de construcción exigida por el propietario obligaba a reducir plazos. Ello se logra en parte evitando el recorte de madera y el doblado de la armadura con la utilización de encofrados planos, llenando una losa cada 5 días. Se ahorra también en mano de obra y se obtiene una estructura más limpia.

5.2.3. Elementos del sistema y puesta en obra

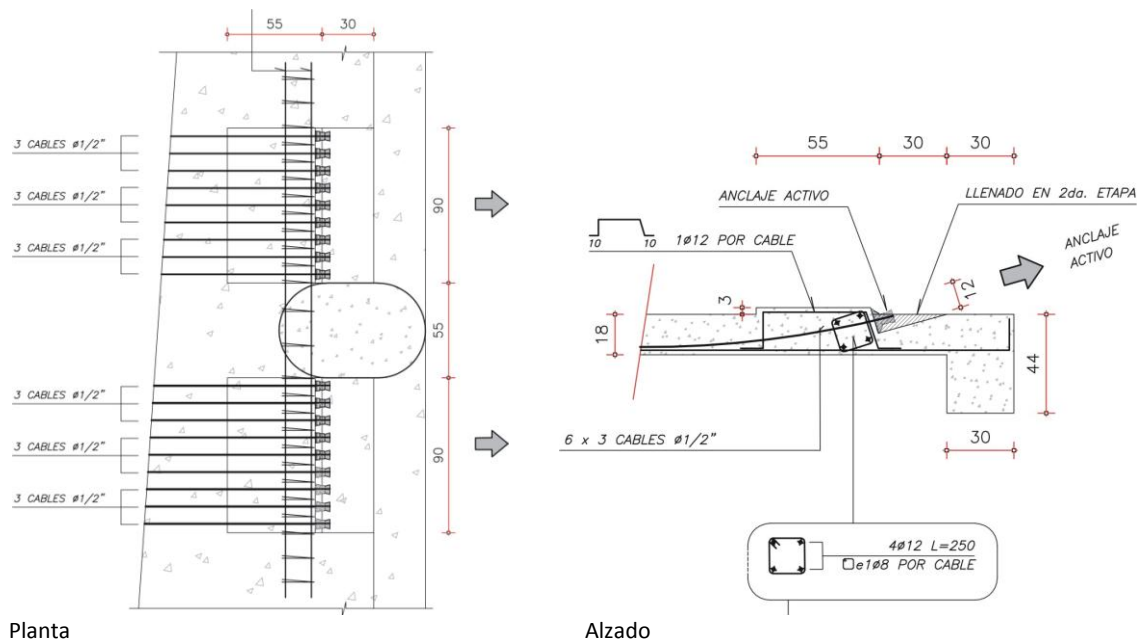
La norma española exige para este sistema la utilización de un hormigón con $f_{ck} > 250 \text{ kg/cm}^2$. A su vez, era un requisito impuesto por el cliente trabajar en todo el edificio con un $f_{ck} > 350 \text{ kg/cm}^2$. Para la obra de WTC Avenida, los ingenieros Marella y Pedoja especificaron un hormigón con $f_{ck} = 450 \text{ kg/cm}^2$. Este incremento se debió a los cortos tiempos de ejecución

exigidos, ya que los cables debían ser estirados a los 5 días del hormigonado para poder así reutilizar los encofrados y poder cumplir con los plazos mínimos impuestos de 3 a 5 losas por mes. Se colocan entonces los cables, se llena la losa, y con el 80% de resistencia del hormigón, se tesan. Logro así introducir un estado de carga favorable manejado y calibrado por el calculista.

Se recurre en esta obra a la utilización de monotorones no adherentes de acero de baja relajación, con anclajes de hierro fundido de la firma española de tensados MK4. Los cables son llevados a obra en bovinas y cortados in situ.

La puesta en obra se ve simplificada por el encofrado plano y por el hecho de que la losa lleva solamente armadura abajo y un refuerzo superior en la zona de pilares. Esto deriva a una reducción en la mano de obra, una disminución del 50% en los tiempos con respecto a losas tradicionales con vigas, y, por lo tanto, a una reducción en los costos.

En estos proyectos se debe tener especial precaución de verificar la flecha y la vibración. Se debe también reforzar las zonas de anclaje teniendo especial cuidado en colocar las placas de anclaje estrictamente verticales para que los cables tesados con cierta inclinación no desprendan parte del hormigón. Con los planos de postesado generales mencionados, entregados por los ingenieros a la empresa constructora, se deben adjuntar los detalles necesarios para la correcta aplicación del sistema.



Detalle del extremo activo de anclaje de cables postesados en losa, con especificación de diámetro, cantidad, distancias y otros datos relevantes.

5.2.4. Integración con los acondicionamientos y las terminaciones

Las losas planas sin vigas facilitan a la hora de coordinar y distribuir la gran cantidad de instalaciones existentes en este tipo de obras. En estos casos se recurre a la utilización de bandejas bajo losa en las que se colocan ductos de aire, instalaciones de incendio, eléctrica, etc, evitando así tener que agujerear vigas, facilitando la puesta en obra. A su vez se facilita la colocación de la losa radiante, ya que al ser las losas postesadas más gruesas que las tradicionales, dicha instalación se hace dentro de la losa misma.

Todo esto trae además aparejadas varias ventajas en cuanto al diseño de los espacios, otorgando mayor libertad de distribución de ambientes, brindando espacios diáfanos y, en este caso, garajes más cómodos.

5.2.5. Unión con otras piezas estructurales no postesadas

El sistema postesado se adapta perfectamente a las distintas terminaciones, no teniendo grandes diferencias con los sistemas utilizados tradicionalmente.

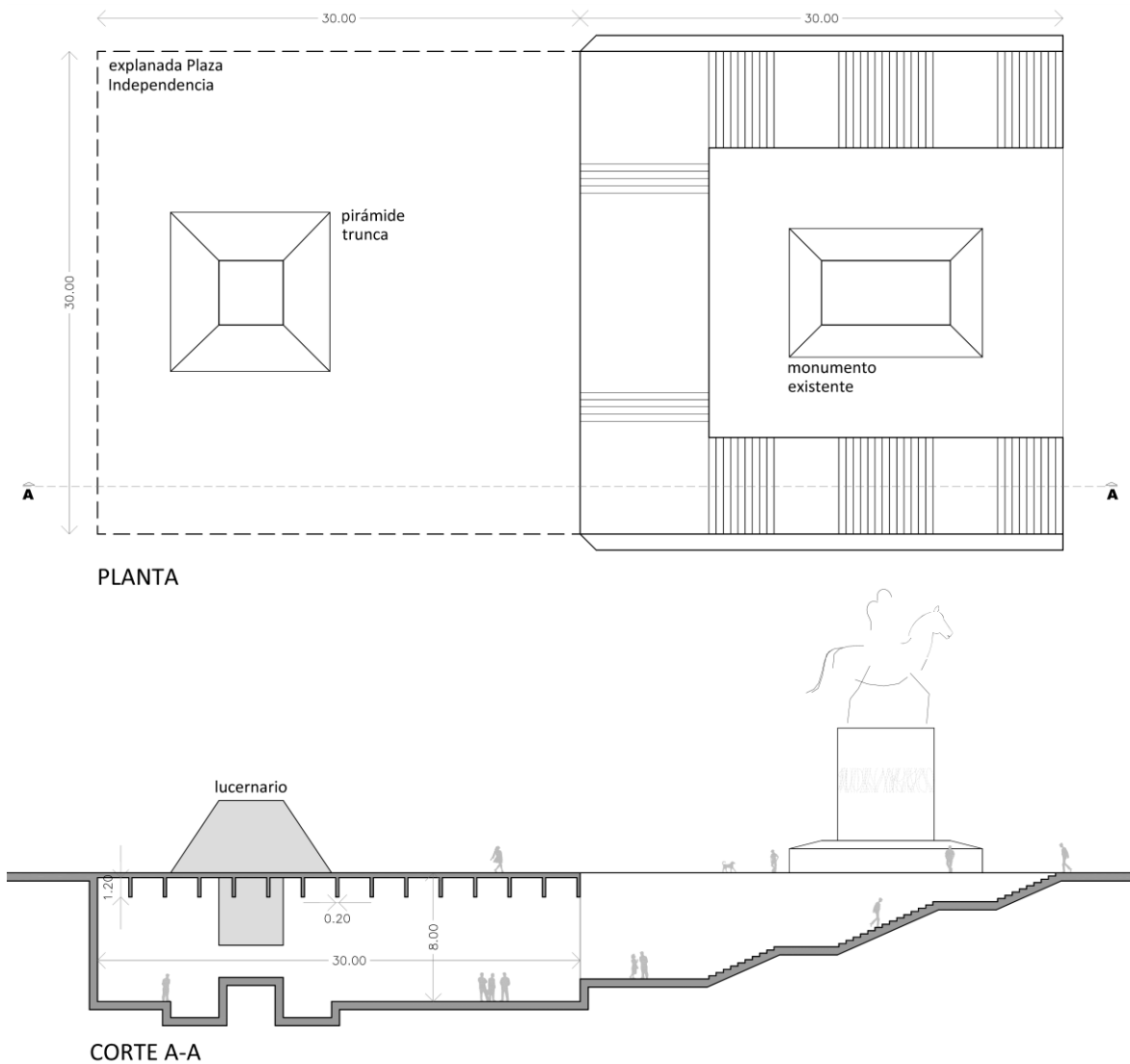
En el ejemplo analizado se evitó la realización de contrapisos, colocando las baldosas directamente sobre la losa postesada, regulándola previamente con un alisado. Esta decisión fue tomada como consecuencia de los 20 cm de espesor que ya alcanza dicho cerramiento horizontal, requeridos por norma para aislación, pudiendo así prescindir de los 10 cm de relleno realizados habitualmente para cumplir con los requerimientos legales.

5.2.6. Previsiones frente a incendios

En este punto se debe tener sumo cuidado en los recubrimientos utilizados en las losas postesadas. Al estar tesados los cables, y a los efectos de evitar que revienten por calor en caso de incendio, la norma exige como mínimo 3 cm de recubrimiento para todos los casos, y en algunas ocasiones, y según distintas exigencias, puede llegar a ser aún mayor. Este índice se fija en función al tiempo en que la losa debe resistir frente al fuego.

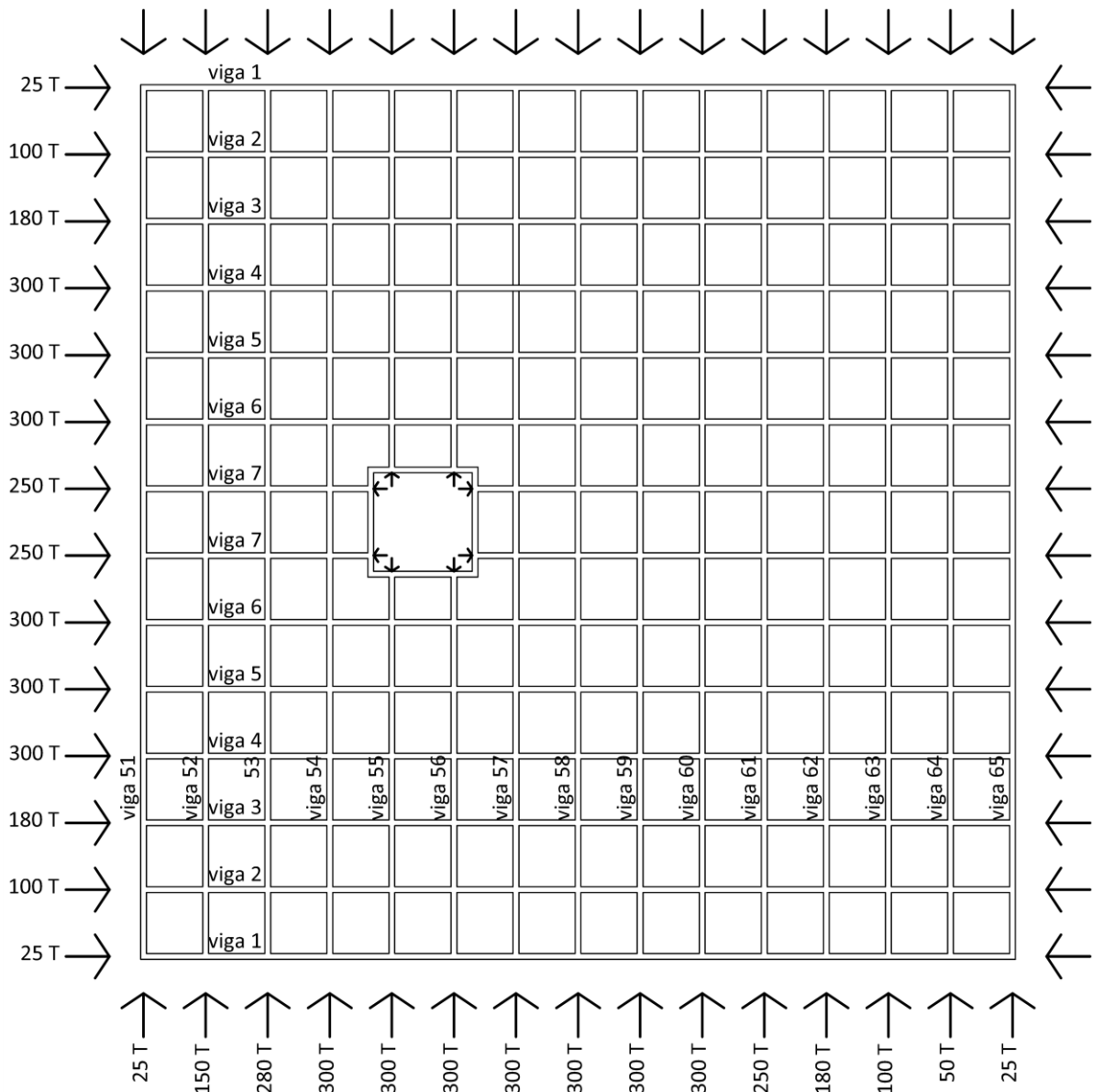
5.3 MAUSOLEO AL GENERAL ARTIGAS: SISTEMA POSTESADO CON ADHERENCIA DEL ACERO AL HORMIGÓN

El mausoleo fue obra de los arquitectos Lucas Ríos Demalde y Alejandro Morón, ganadores de un concurso de anteproyecto realizado en 1975. Agregaron al monumento existente un mausoleo al que se accede a través de amplias escalinatas a cielo abierto, que bordean al monumento, llegando hasta un subsuelo en el que se custodia la urna con los restos del General. Paredes y pisos de estas escalinatas fueron revestidos en su totalidad en granito Artigas. El recinto del mausoleo es un cuadrado de 30 x 30m, situado 8m bajo el nivel de piso de la Plaza, realizado con paredes y techo de hormigón visto y un piso de granito que continúa el material del acceso. Una pirámide trunca permite que penetre el sol directamente hasta la urna.





5.3.1. Planteo estructural general



La estructura se diseñó a partir de una cuadrícula formada por vigas postesadas en ambos sentidos, que componen el encasetonado del techo del mausoleo. La organización de estas vigas no es simétrica en un sentido, debido al desplazamiento del prisma colgante del centro, el cual genera una discontinuidad en las vigas y aporta su peso. La transmisión se hace por las

vigas paralelas inmediatas al hueco. Las tensiones se calculan un 10% mayor que para el postesado normal, para compensar pérdida por fricción.

Esta cuadrícula está formada por 15 vigas en un sentido y 14 en el otro, de 1,19m de alto y 20cm de ancho, unidas por una losa de 11cm de altura que forma parte de este encasetonado. Todas las vigas, excepto las 4 perimetrales, contienen 2 vainas, una superior y otra inferior. La posición inicial de las vainas es una curva parabólica, que en todas las vigas de un sentido será transformada a una curva poligonal para evitar el problema del cruce de las vigas. Estas vigas llevan además hierros longitudinales de montaje y estribos.

5.3.2. Determinantes de la elección del sistema estructural

La forma de la planta cuadrada y la fortaleza de los 4 muros de contención llevaron a los proyectistas a concebir desde el principio, una losa encasetonada apoyada en sus 4 lados.

Tres elementos fundamentales incidieron fuertemente en la elección del sistema estructural:

- La sobrecarga a considerar: el techo del mausoleo conforma el suelo de una plaza considerada como un importante espacio público donde, desde el punto de vista de la seguridad, se debía prever el peso de grandes aglomeraciones e incluso del posible tránsito de vehículos pesados.
- La existencia de un hueco en la losa, de grandes dimensiones y de gran peso. Es un hueco de hormigón armado revestido en mármol blanco de 4cm en el interior y losas de granito negro en el exterior, de 3,80 x 3,80m x 2,90m de altura.
- Valoraciones de carácter formal en cuanto al tamaño de las vigas y de los casetones, que serian extremadamente altas y profundos en caso de realizarse con el sistema tradicional de hormigón armado.

5.3.3. Elementos del sistema y puesta en obra

Se utilizó el sistema BBRV de postesado, que consiste en fijar los extremos de todos los alambres de cada viga a una cabeza de anclaje común, de forma de tesar todos de una vez con la ayuda de un dispositivo tractor que va anclado a esta cabeza que se apoya en el propio hormigón de la viga. El dispositivo tractor se conforma por un gato hidráulico y un manómetro que controla la tracción ejercida por el gato.

Para facilitar el armado de las vigas del encasetonado, se colocaron los casetones en primer lugar en forma de damero, colocando unos sí y otros no, para permitir el trabajo de armado.



Colocación de casetones formando un damero



Armado de vigas

Etapas de construcción del dispositivo BBRV:

En primer lugar se cortaron los alambres en fábrica, con una máquina especial que garantiza una dimensión exacta de los alambres para cada viga según la tensión a la que serán sometidos y su diámetro. Los alambres llegan a la obra en rollos. Los anclajes son remachados en frío por una máquina especial que asegura la resistencia de las cabezas de remache.

Se colocan las vainas de 5m de largo, mediante un sistema de “carritos”, utilizándose en los puntos de unión, una pieza especial de metal que las recubre y se envuelve luego con fieltro asfaltado y se ata con alambre. Se colocan los dispositivos del anclaje móvil en orden: trompeta, cabeza de anclaje, placa y tuerca de fijación y se estiran las vainas.



Tendido de cables



Máquina remachadora y pieza de unión de vainas



Anclaje fijo tipo S enhebrado



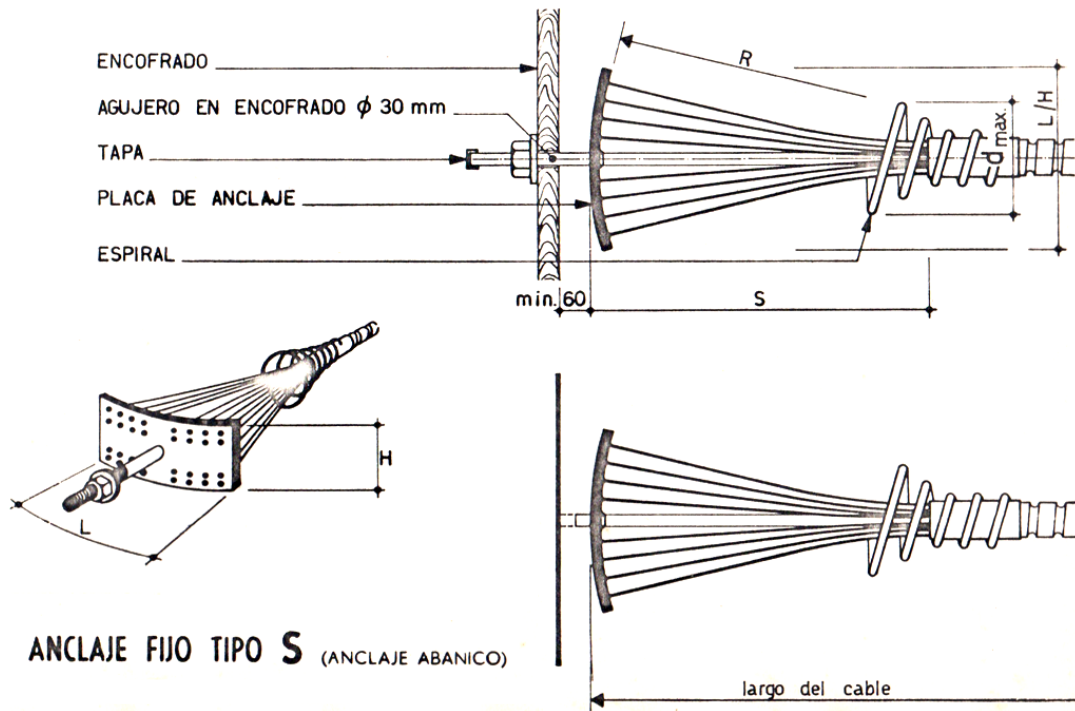
Sistema de carritos para el enhebrado de cables en las vainas

Elección de los tipos de anclaje:

Para el anclaje fijo se usó el Tipo S.

La puesta en tensión fraccionada impuesta por el cálculo, determinó un sistema mixto de cabezas de anclaje móvil. Para las vigas de mayor tensión se usó el anclaje Tipo B formado por una tuerca roscada no recuperable. Estas piezas se construyeron en fábrica de acuerdo a las dimensiones requeridas para cada viga. Para las vigas perimetrales de menor tensión se usó el anclaje Tipo J. Las fijaciones necesarias antes de la inyección (fijación final) se hicieron por medio de un dispositivo recuperable, formado por un vástago, un tornillo de fijación y un anclaje.

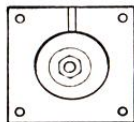
La tensión fraccionada (10%) no permitió, como en otros casos, la utilización de los mismos dispositivos para las distintas vigas de la misma estructura, al no poderse retirar hasta la última vuelta de tensión. Por lo tanto, se usaron 54 de estos dispositivos.



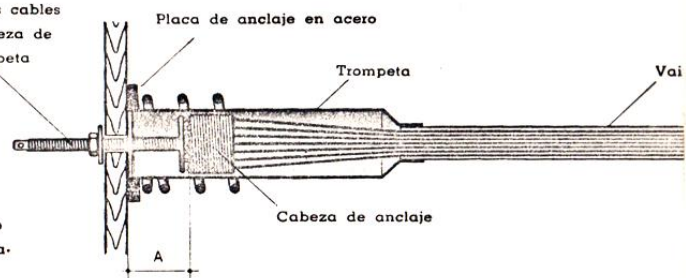
Cabeza Movil B

1. Colocación

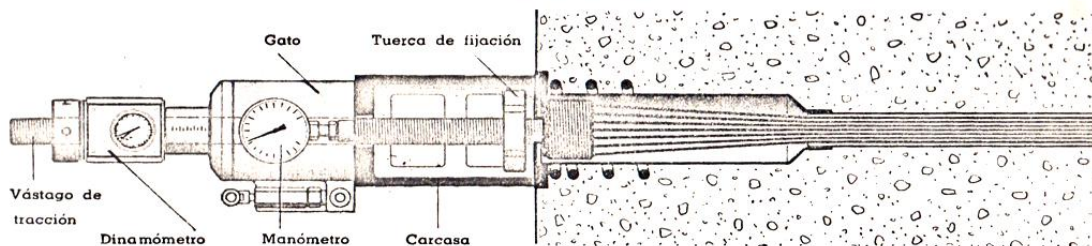
Dispositivo para fijar los cables al encofrado y la cabeza de anclaje en la trompeta



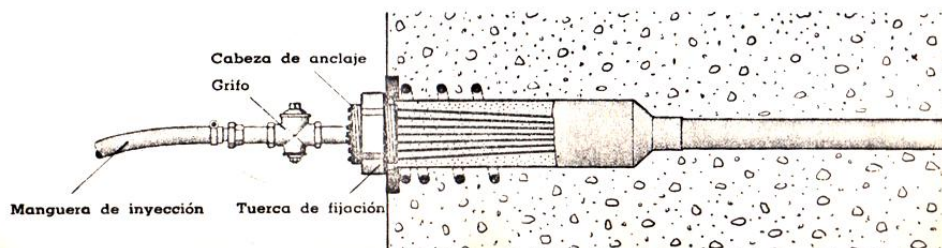
El dispositivo está fijado provisoriamente a la placa de anclaje



2. Pretensionado



3. Inyección de mortero especial



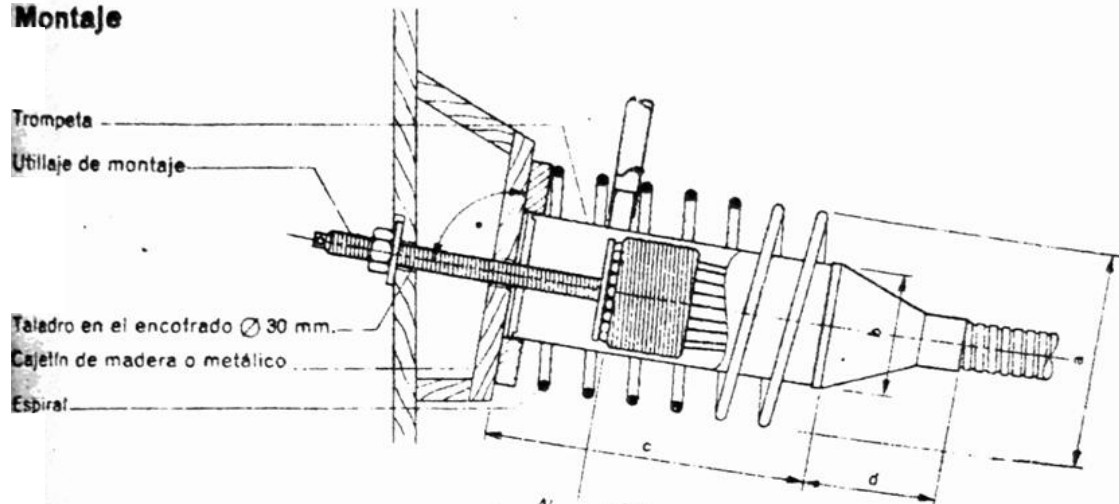
Anclaje móvil Tipo B

Anclaje móvil más corriente. Introducción concentrada del esfuerzo.

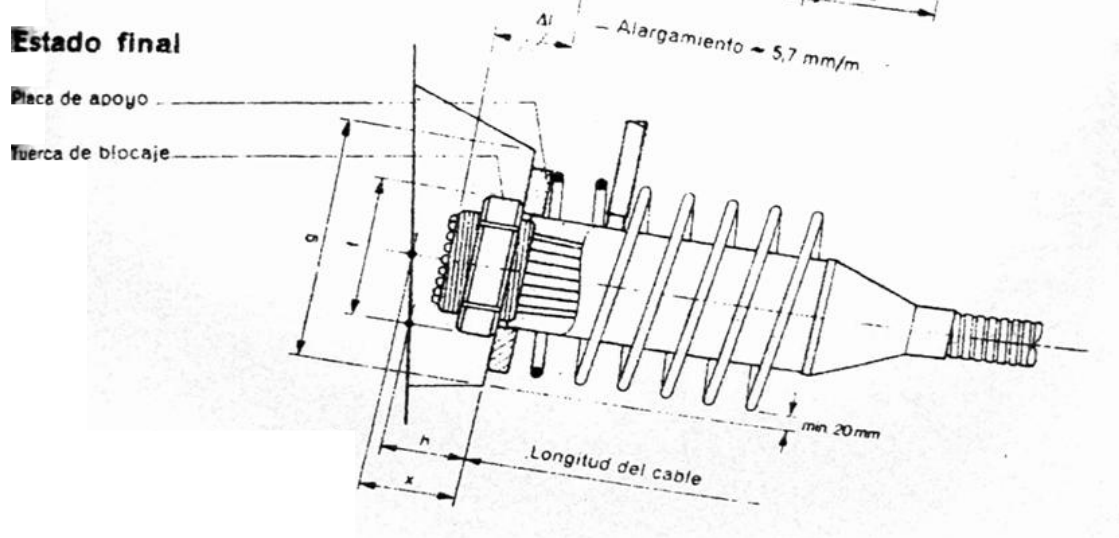
Anclaje por tuerca. Taladro central para colocación del utilaje de montaje, para roscar la barra de tracción y como punto de inyección.

El núcleo del anclaje se apoya mediante la tuerca sobre una placa embebida en el hormigón.

Montaje

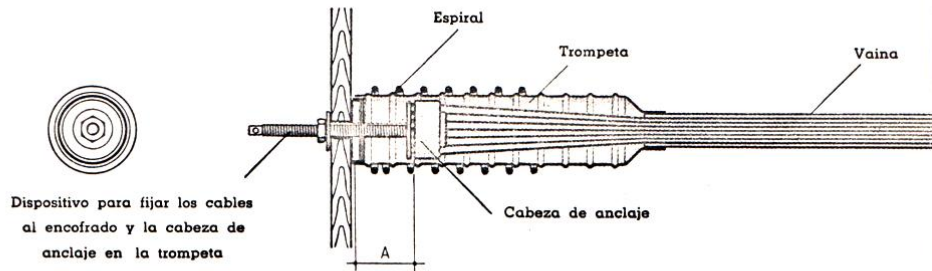


Estado final

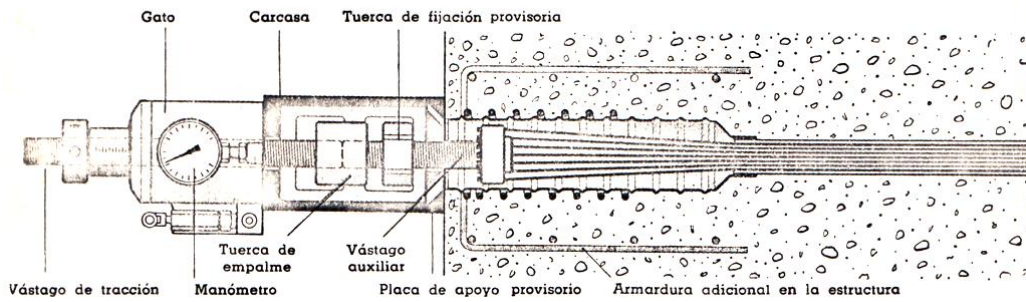


Cabeza Movil J

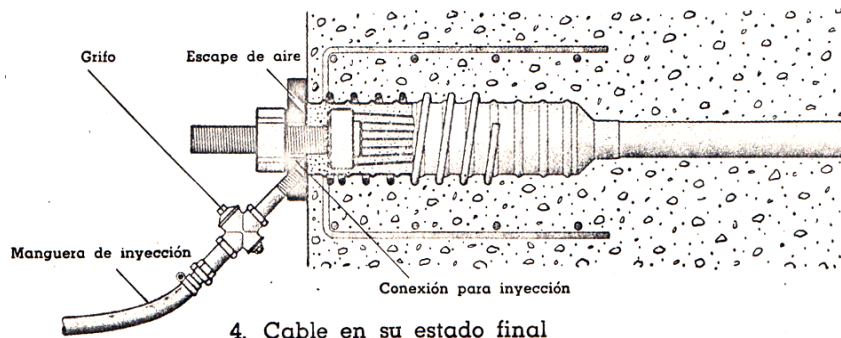
1. Colocación



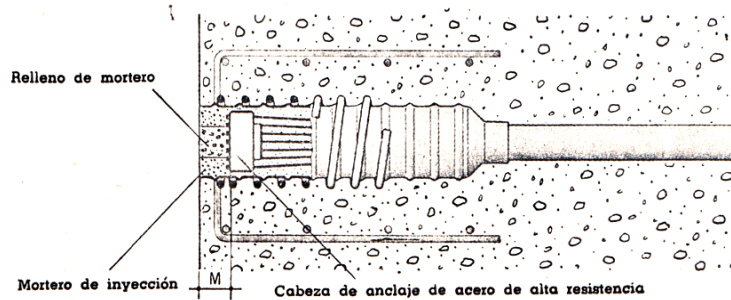
2. Pretensionado



3. Inyección con anclaje provisional



4. Cable en su estado final





Ancales fijos tipo S y vainas sin enhebrar

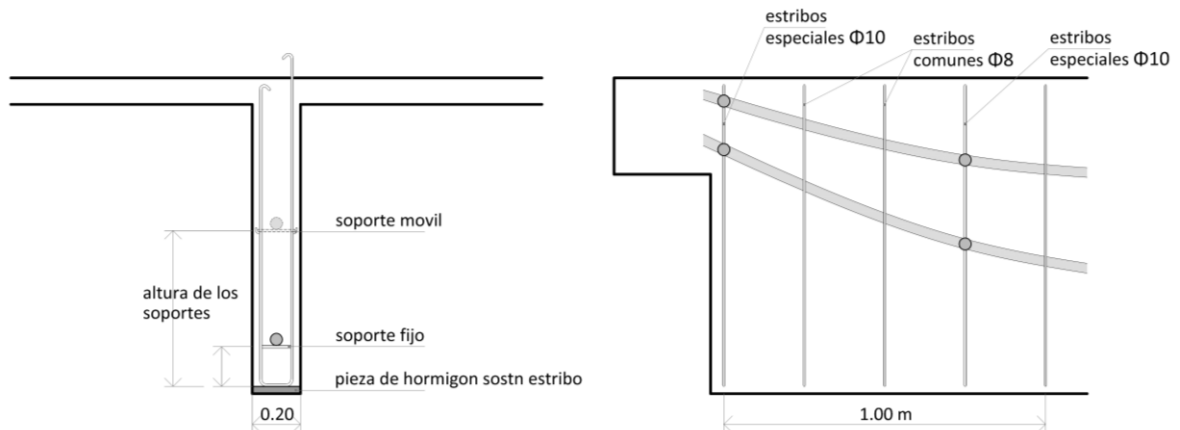


Anclajes móviles tipo J y tipo B

Armado de vigas:

Estribos

Para hacer posible la puesta en obra de las vainas y obtener una ubicación perfecta de acuerdo a las curvas o poligonal pre-fijadas se colocaron en los estribos un soporte fijo de sostén del cable inferior (incluido en el estribo), y un soporte móvil que se calza a dos ganchos del estribo luego de colocado el cable superior. Las vigas se dividieron en tramos de un metro y se tomaron las cotas de cada tipo de soporte con precisión milimétrica. De esta manera, los estribos se espaciaron cada 33cm y uno de cada 3 llevaría los soportes para los cables. Estos estribos con soportes se ejecutaron en $\phi 10$, los comunes en $\phi 8$.



Hierros longitudinales

Los hierros longitudinales formaban una cuadrícula que imposibilitaba la colocación de las vainas. Por eso se colocaron hierros cerrados que formaban cuadrados alrededor de cada casetón. Sólo se mantuvieron longitudinales los hierros de la parte inferior.



Vista de la viga libre de cruces de hierros longitudinales de las vigas ortogonales.



Puesta definitiva de las cabezas de anclaje

Colocación del dispositivo BBRV:

Terminada la etapa de armado del dispositivo, armado de vigas y construcción de los casetones, se colocaron los cables con sus respectivas cabezas móvil y fija dentro de cada viga.



Colocación del sistema bbrv



Colocación del sistema bbrv

Llenado de la losa:

El llenado de la losa estaba previsto realizarlo en una sola etapa. Por razones de seguridad, se realizó en varias etapas, para permitir un control perfecto en la dosificación y preparación del hormigón, así como en el vibrado. Se llenaron primero las cabezas de anclaje y luego se fue llenando sucesivamente por tramos el resto de la estructura. Se tuvo especial cuidado en esta etapa, pues el hormigón debía cumplir con 2 condiciones fundamentales: las requeridas por el sistema de postesado y las determinadas por el hecho de ser elementos que se mantendrían en hormigón visto. La proporción de las vigas, por su esbeltez y su ancho mínimo, requirió el empleo tanto de vibradores especiales como de mano de obra capacitada para evitar roturas en las vainas e incluso abolladuras que impidieran el correcto tensado de los alambres.



Vibrado de un cruce de vigas



Llenado y recubrimiento de la superficie con antisol

Puesta en tensión:

La puesta en tensión se realizó, tal como estaba fijada en el cálculo, en dos etapas: Se tensaron los cables un 10% comenzando por las vigas centrales (una en cada sentido) y desde allí, simétricamente de un lado al otro de la estructura hasta completar una vuelta. Esta operación se repitió 5 veces hasta llegar a una tensión en cada viga del 50% de la total. Luego se desencofró y desapuntaló toda la estructura. Se tensaron los restantes 50% en la misma forma que se hizo para los anteriores.



Puesta en tensión del sistema bbrv

Durante la puesta en tensión se verificó un alargamiento (deformación) mayor del estipulado por el fabricante para el tipo de alambre usado. Para asegurarse que las deformaciones mayores a las previstas no se debieran a fallas en las características del material usado, se llevaron trozos de alambres para ensayar en la Facultad de Ingeniería. Los resultados obtenidos fueron coincidentes en un todo con las indicaciones del fabricante, verificándose exactamente el límite de fluencia. Se comprobó así que el problema surge de la tensión en doble sentido dada a la estructura que determina una disminución en la fricción y por lo tanto

una disminución de la pérdida de tensión. Cada tensión fue controlada por un operario de la Compañía de Pretensado BBRV quién llevaba una planilla.

5.3.4. Integración con los acondicionamientos y las terminaciones

El techo encasetonado formado por las vigas postesadas y la losa, no es atravesado en ningún punto por instalaciones eléctricas o sanitarias hacia el interior, solamente es atravesado estructuralmente por el lucernario. Todo el encasetonado se encuentra totalmente libre de cualquier instalación. Toda la iluminación se encuentra en el suelo iluminando desde abajo hacia arriba, bañando las paredes de luz y marcando los distintos niveles en el suelo.

En cuanto a la terminación del encasetonado, el hormigón visto se encuentra simplemente pintado de un color gris oscuro.

Casi 40 años después de su construcción, hoy en día toda la construcción carece de mantenimiento. Si observamos detenidamente podemos apreciar varias humedades y filtraciones de agua que están herrumbrando las armaduras. Lo podemos apreciar en una imagen tomada con flash, ya que con la escasa luz interior no son apreciables a simple vista.



Imagen del encasetonado con la iluminación existente



Imagen del encasetonado tomada con flash donde se pueden apreciar las patologías en la estructura



Humedades en la estructura encasetonada



Humedades en la estructura encasetonada y herrumbre de las armaduras

5.3.5. Unión con otras piezas estructurales no postesadas

El gran encasetonado descansa sobre tres muros de contención y el muro de entrada.

5.3.6. Previsiones frente a incendios

Los anclajes exteriores del postesado, que serían los puntos más débiles de la estructura en caso de incendio, cuentan todos con sus recubrimientos correspondientes. En este caso hay muy pocos riesgos estructurales frente a un posible incendio, ya que, además de sus recubrimientos, un 75% de los anclajes se encuentra bajo tierra y el otro 25% está recubierto de granito sobre el acceso. Este riesgo es menor que en el caso de los cables engrasados que se pueden usar hoy en día en estructuras postesadas, por tratarse de cables que se encuentran dentro de una vaina con lechada que fija los cables en todos los puntos de la viga y no sólo en sus extremos.

6. CONCLUSIÓN

Hoy en día la cantidad de obras construidas con los sistemas de pretensionado en todo el mundo es cada vez mayor. Se observa en nuestro país un gran incremento en la recurrencia a dichos sistemas, con una ascendente estandarización de los procesos constructivos y un incremento en la cantidad de mano de obra capacitada.

Lo más destacable de este fenómeno es el crecimiento de la utilización de estos sistemas para obras arquitectónicas, como edificios residenciales, de oficinas, o galpones, ya que, hasta hace algunos años, éstos se limitaban casi totalmente a obras de ingeniería civil. Las razones de este aumento son varias: son cada vez más accesibles a nivel económico, así como más reutilizables en la relación costo-beneficio. A su vez se simplifican mucho los procesos constructivos por tratarse ya sea de piezas prefabricadas trasladadas a obra por el subcontrato, o estructuras generalmente de losas sin vigas que conllevan a encofrados planos reutilizables.

Si bien la cantidad de obras construidas con estos sistemas en nuestro país ha ido aumentando, todavía sigue siendo el hormigón armado tradicional el sistema preferido hoy en día en la mayoría de los casos. Sin embargo, la oferta en el mercado ha ido aumentando en cantidad y variedad, llegando a ofrecer muchísimas alternativas para diversos tipos de obra, como fue analizado en los capítulos anteriores, y brindando muchísimas ventajas no solo a nivel estructural, sino también desde el punto de vista constructivo y programático.

Son varios los casos en los que los sistemas de pretensionado se vuelven más adecuados, y todos ellos poseen alguna condicionante que conlleva a recurrir a los mismos. Se utilizan mayormente en proyectos que debido a su programa requieren de grandes luces o que aspiren a bajos espesores de losas para lograr mayor cantidad de niveles en una misma altura; en programas que requieran tiempos de ejecución cortos y elementos estandarizados prefabricados, etc.

A nuestro entender, se puede concluir a modo general, que ambos sistemas, tanto el tradicional como el pretensionado, poseen sus ventajas y desventajas relativas, y se debe analizar la viabilidad de cada uno en cada caso en particular. Se destaca que trabajar con los sistemas de pretensionado nos permite utilizar el potencial que nos brindan las nuevas técnicas del mercado basadas en los avances tecnológicos, intentando resolver cada problema del modo más óptimo posible, minimizando los costos de producción y construcción, y logrando reducir el factor tiempo en el plazo de ejecución de la obra.

BIBLIOGRAFÍA

Ing. Marzio Marella, Estudio Marella y Pedoja. Ingenieros calculistas del WTC Avenida.

Ing. Ramón Díaz. Ingeniero calculista del Viaducto sobre el acceso al AIC.

Ing. Pablo Lanzaro, Empresa Flasur. Gerente de producción.

Arq. Invernizzi. Empresa Hopresa.

Arq. Haroutun Chamlian. Profesor Facultad de Arquitectura.

“El hormigón precomprimido” _ Dres. M. Ritter y P. Lardy

Tesis “Hormigón Pretensado” _ Farq. _ Udelar.

“Diseño de vigas de concreto presforzado” _ Dan Branson.

“Fundamentos para el análisis de estructuras de hormigón armado y pretensado” _ Juan Murcia Vela.

“Construcción de estructuras de concreto presforzado” _ Ben Gerwick.

“Hormigón pretensado: estudio teórico y experimental” _ Y. Guyon.

“Elementos y estructuras preesforzadas” _ Alfonso Olvera López.

Informes de la Construcción 1988 – 89. Revista no 398. Artículo: “El hormigón pretensado en la arquitectura” _ Alfredo Páez Balaca.

pretenssed concrete BBRV 1957

Tesis “Mausoleo al General Artigas. Estudio de una estructura de hormigón pretensionado en dos sentidos” _ Denise Bentancourt _ Farq. _ Udelar.

<http://www.construaprende.com/tesis02/2006/09/24-concreto.html>

<http://www.anippac.org.mx/capitulo02.pdf>

http://es.wikipedia.org/wiki/Hormig%C3%B3n_pretensado